

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE TOPOGRAFÍA, CATASTRO Y GEODESIA**



Trabajo Final de Graduación en la modalidad de:
Proyecto de Graduación

**Análisis de la Tendencia de Erosión y Acreción en la Línea de Costa
del Caribe de Costa Rica, Utilizando la Plataforma Google Earth
Engine (GEE) y las Imágenes Satelitales Sentinel-2**

Sergio David Quirós Arce

CAMPUS OMAR DENGO
HEREDIA, COSTA RICA
SEPTIEMBRE, 2025

Este trabajo fue _____ por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Topografía, Catastro y Geodesia de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Topografía y Geodesia

Grado académico. Nombre completo
Presidente del Tribunal Evaluador

Grado académico. Nombre completo
Director o representante de la ETCG

M.Sc. Diana Paniagua Jiménez
Tutor

M.Sc. Sara Bastos Gutiérrez
Asesora

M.Sc. José Francisco Valverde Calderón
Asesor

Ing. Sergio David Quirós Arce
Graduando

Dedicatoria

A Dios, por ser luz en mi camino, por sostenerme en los momentos de incertidumbre y por enseñarme que cada esfuerzo tiene su recompensa cuando se hace con fe y propósito. A lo largo de este proceso, su presencia ha sido mi guía silenciosa, mi consuelo y mi motor para no rendirme. Este logro es también testimonio de su amor infinito.

A mis padres, por ser la base firme sobre la que he construido mi camino. Gracias por su amor incondicional, por su entrega diaria y por haber creído en mí incluso en los días en que yo no lo hacía. Cada palabra de aliento, cada consejo, cada madrugada de preocupación y cada gesto de apoyo han sido parte esencial de este proceso. Nada de esto habría sido posible sin su ejemplo, su fortaleza y su inmenso corazón. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos, con quienes he compartido risas, retos y aprendizajes. Gracias por ser mi impulso en los momentos difíciles y por alegrarse conmigo en cada paso adelante. Su apoyo constante, su presencia cercana y su cariño sincero me han motivado más de lo que podrían imaginar. Han sido un pilar silencioso pero fundamental, y estoy profundamente agradecido por tenerlos en mi vida.

Este proyecto no es solo el cierre de una etapa académica; es también una muestra del amor, la unión y el respaldo que he recibido a lo largo de este camino. A ustedes, con todo mi corazón, les dedico este logro.

Reconocimientos

Quiero reconocer de manera muy especial a Lorenzo Aguilar Elizondo, quien ha sido más que un compañero de universidad ha sido un verdadero hermano. Desde que decidimos compartir un apartamento, formamos un lazo de amistad y apoyo incondicional que marcó profundamente este camino académico y personal. Gracias a su ejemplo, dedicación y amor por lo que hace, me motivé a dar lo mejor de mí. Su cercanía, sus consejos y su constante impulso fueron fundamentales en los momentos más desafiantes. Admiro profundamente su compromiso, su inteligencia y su nobleza. Gracias por estar a mi lado mi hermano.

A mis compañeros de universidad, quienes con su compañía, apoyo y espíritu de colaboración hicieron posible cada paso de este proceso. Gracias por los trabajos compartidos, las madrugadas de estudio, las risas, las frustraciones y las victorias. En especial, a Daniela Flores y Daniel Hidalgo, por su amistad sincera y su disposición constante para ayudar, escuchar y estar.

A mis profesores de la Universidad Nacional, quienes han dejado una huella imborrable en mi formación profesional y personal. En especial, a Diana Paniagua Jiménez, José Francisco Valverde Calderón, Sara Bastos Gutiérrez y a Jorge Moya Zamora; por su entrega, su sabiduría, y por ser modelos a seguir dentro y fuera de la institución. Su guía, exigencia y motivación fueron claves para alcanzar esta meta.

Índice de contenidos

Contenido	Página
Resumen	xii
Abstract	xiii
Capítulo 1: Introducción	1
Capítulo 2: Marco teórico	2
2.1 Zonas Costeras	2
2.2 Línea de Costa.....	3
2.3 Delimitación de las Zonas Costeras en Costa Rica	4
2.4 Erosión	6
2.5 Sedimentación	8
2.6 Teledetección Satelital	9
2.6.1 Instrumentos de teledetección.....	11
2.6.2 Imágenes satelitales.....	12
2.7 Copernicus.....	13
2.7.1 Sentinel-2.....	14
2.8 Índices espectrales.....	15
2.8.1 Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).....	16
2.8.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada (MNDWI).....	17
2.8.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	19
2.9 Método Otsu	20
2.10 Google Earth Engine	22
Capítulo 3: Objetivos	24
Objetivo general:	24
Objetivos específicos:.....	24
Capítulo 4: Metodología	25
4.1 Área de estudio.....	25
4.2 Selección de imágenes satelitales.....	26

4.3	Cálculo del NDWI y clasificación.....	29
4.4	Extracción y procesamiento de la línea de costa.....	30
4.5	Análisis de la línea de costa	33
4.6	Generación de mapas para la interpretación espacial de resultados.....	34
Capítulo 5: Análisis de resultados.....		35
5.1	Imágenes Sentinel-2 utilizadas.....	35
5.2	Extracción de la línea de costa mediante NDWI.....	38
5.3	Comparación entre NDWI y NDVI para la delimitación costera.	42
5.4	Análisis de la variación de la línea de costa por zonas	43
5.4.1	Playa Punta Castilla.....	43
5.4.2	Playa Moín (sector cercano a la terminal de contenedores)	45
5.4.3	Playa Moín.....	47
5.4.4	Playa Cieneguita.....	49
5.4.5	Aeropuerto de Limón	51
5.4.6	Playa Manzanillo	53
5.4.7	Playa Gandoca.....	56
Capítulo 6: Conclusiones		59
Capítulo 7: Recomendaciones		62
Referencias.....		64
Anexos		69

Índice de cuadros

Contenido	Página
Cuadro 4.1. Ejemplo de colección de imágenes Sentinel-2 utilizadas.....	29
Cuadro 5.1. Colección de imágenes Sentinel-2 utilizadas.	37

Índice de figuras

Contenido	Página
Figura 2.1. Divisiones físicas y políticas de la línea de costa	5
Figura 2.2. Ejemplos de playas con retroceso en la línea de costa.....	7
Figura 2.3. Efectos de la erosión y la sedimentación	9
Figura 2.4. Clasificación y funcionamiento de sensores remotos pasivos y activos.....	12
Figura 2.5. Ejemplo de visualización del MNDWI durante una inundación	19
Figura 2.6. Segmentación de masas de agua con el Método de Otsu.....	21

Índice de mapas

Contenido	Página
Mapa 2.1. Ejemplo de visualización del NDWI.....	17
Mapa 4.1. Delimitación del área de estudio	25
Mapa 4.2. Área abarcada por los Tiles 17PKN, 17PKM, 17PKL, 17PLL.....	28
Mapa 4.3. Línea de Costa, Año 2023.....	32
Mapa 5.1. Imagen satelital Sentinel-2 del año 2017	39
Mapa 5.2. Índice NDWI generado para el año 2017.....	40
Mapa 5.3. Línea de costa generada para el año 2017.....	41
Mapa 5.4. Comparación NDWI y NDVI año 2017.....	42
Mapa 5.5. Comparación líneas de costa de los años 2017 y 2023 en playa Punta Castilla.	44
Mapa 5.6. Comparación entre las líneas de costa en playa Moín (Norte).....	46
Mapa 5.7. Comparación entre las líneas de costa en playa Moín.	48
Mapa 5.8. Comparación líneas de costa en en Playa Cieneguita.	50
Mapa 5.9. Comparación líneas de costa de los años 2017 y 2023 en el Aeropuerto de Limón.	52
Mapa 5.10. Líneas de costa 2017 al 2023 Playa Mazanillo.	54
Mapa 5.11. Comparación entre líneas de costa Playa Mazanillo 2017 al 2023.	55
Mapa 5.12. Comparación entre las líneas de costa de los años 2018 y 2019 en playa Gandoca. ..	57

Índice de anexos

Contenido	Página
Anexo 1. Script utilizado para buscar imágenes satelitales.....	70
Anexo 2. Script utilizado para la obtención de la línea de costa.....	72
Anexo 3. Resultados obtenidos para cada año	75

Lista de acrónimos y siglas

ESA:	European Space Agency Agencia Espacial Europea
GEE:	Google Earth Engine
ID:	Identificador de la imagen
IMN:	Instituto Meteorológico Nacional
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NDWI:	Normalized Difference Water Index Índice de Agua de Diferencia Normalizada
MGRS:	Military Grid Reference System Sistema de Referencia de Cuadrícula Militar
MNDWI:	Modified Normalized Difference Water Index Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada
NIR:	Near Infrared Infrarrojo Cercano
SIG:	Sistemas de Información Geográfica
SMBWI:	Sentinel Multi-Band Water Index Índice Multibanda de Agua Sentinel

SWIR: Short Wave Infrared
 Infrarrojo Cercano Visible

VNIR: Visible and Near-Infrared
 Infrarrojo Cercano Visible

Resumen

El litoral Caribe de Costa Rica presenta una notable dinámica costera, con zonas especialmente vulnerables a procesos de erosión y acreción. Si bien en el Caribe Sur se han realizado investigaciones relevantes sobre estos fenómenos, persiste la necesidad de ampliar el conocimiento en sectores menos documentados, particularmente en el Caribe Norte y áreas intermedias. Este Trabajo Final de Graduación surge como una respuesta a esa necesidad, buscando generar información actualizada, geoespacialmente detallada y comparable en el tiempo sobre los cambios ocurridos en la línea de costa entre los años 2017 y 2023.

En este estudio se desarrolló un análisis multitemporal de la línea de costa entre 2017 y 2023, mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2 y la implementación del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) junto con el método de umbralización de Otsu, todo ejecutado en la plataforma Google Earth Engine. Se generó una línea de costa por año, lo cual permitió evaluar posibles patrones de erosión y acreción en distintos sectores del Caribe costarricense, con especial atención a aquellos donde se han reportado afectaciones significativas.

La metodología permitió comparar espacial y temporalmente las líneas de costa generadas, identificando cambios notables en áreas como Playa Moín y Playa Gandoca. Además, se realizó una comparación entre los índices NDWI y NDVI, demostrando la mayor claridad del NDWI en la delimitación agua-tierra para este tipo de análisis costero. Se incorporó también un componente de validación comparativa con estudios previos, lo que aportó solidez a las interpretaciones realizadas.

Si bien el trabajo presenta limitaciones como la disponibilidad de imágenes libres de nubes y la limitación metodológica para aplicar una corrección por marea, los resultados obtenidos constituyen una base sólida para estudios futuros. Este análisis demuestra el potencial de las herramientas de teledetección y procesamiento automatizado para la investigación costera en Costa Rica, ofreciendo un insumo valioso tanto para la academia como para la gestión ambiental.

Palabras clave: línea de costa, erosión costera, Sentinel-2, NDWI, Google Earth Engine

Abstract

The Caribbean coast of Costa Rica presents a remarkable coastal dynamic, with areas particularly vulnerable to processes of erosion and accretion. While significant research has been conducted in the Southern Caribbean on these phenomena, there is still a need to expand knowledge in less-documented sectors, particularly in the Northern Caribbean and intermediate areas. This Graduation Project arises as a response to that need, aiming to generate updated, geospatially detailed, and temporally comparable information on the changes that occurred along the coastline between 2017 and 2023.

In this study, a multitemporal analysis of the coastline between 2017 and 2023 was carried out using Sentinel-2 satellite imagery and the implementation of the Normalized Difference Water Index (NDWI) together with Otsu's thresholding method, all executed on the Google Earth Engine platform. A coastline was generated for each year, which allowed for the evaluation of possible erosion and accretion patterns in different sectors of the Costa Rican Caribbean, with special attention to those where significant impacts have been reported.

The methodology made it possible to compare the coastlines generated both spatially and temporally, identifying notable changes in areas such as Moín Beach and Gandoca Beach. In addition, a comparison between NDWI and NDVI indices was performed, demonstrating the greater clarity of NDWI in delimiting the water-land boundary for this type of coastal analysis. A comparative validation with previous studies was also incorporated, which added robustness to the interpretations made.

Although the study presents limitations such as the availability of cloud-free imagery and the methodological constraint of not applying a tidal correction, the results obtained provide a solid basis for future studies. This analysis demonstrates the potential of remote sensing and automated processing tools for coastal research in Costa Rica, offering valuable input for both academia and environmental management.

Keywords: shoreline, coastal erosion, Sentinel-2, NDWI, Google Earth Engine.

Capítulo 1: Introducción

Las zonas costeras a nivel mundial constituyen entornos dinámicos, vulnerables a múltiples presiones naturales y antrópicas. Entre los principales fenómenos que afectan estos espacios están la erosión costera, el ascenso del nivel del mar y las alteraciones provocadas por tormentas o actividades humanas, todos con implicaciones ambientales, económicas y sociales. En este contexto, el monitoreo preciso de la línea de costa se ha convertido en una necesidad urgente para una gestión territorial sostenible.

En Costa Rica, el litoral Caribe se extiende desde el delta del río San Juan hasta la desembocadura del río Sixaola, abarcando una franja de gran importancia ecológica, turística y socioeconómica. Sin embargo, esta zona ha enfrentado diversos procesos de erosión y cambios morfológicos a lo largo de las últimas décadas, sin contar con un sistema de monitoreo regular y actualizado que permita evaluar su evolución espacial y temporal, tal como han señalado investigaciones previas en el Caribe Sur ([Barrantes et al., 2020](#); [Barrantes & Sandoval, 2021](#)). Esto ha generado vacíos de información que dificultan la toma de decisiones para el ordenamiento territorial y la conservación ambiental.

Ante esta situación, se planteó la necesidad de desarrollar un análisis multitemporal de la línea de costa del Caribe costarricense, entre los años 2017 y 2023, mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2, el índice NDWI y el método de umbralización de Otsu, implementados en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Esta combinación de herramientas y metodologías permite automatizar el procesamiento de datos, mejorar la precisión en la identificación del límite tierra-mar y generar resultados comparables a través del tiempo.

El propósito central de este trabajo es identificar y analizar los patrones de erosión y acreción costera en distintos sectores del litoral Caribe, aportando así conocimiento actualizado que sirva como base para futuras investigaciones o planes de gestión costera. Además, se propone evaluar la aplicabilidad del índice NDWI frente al NDVI en este tipo de estudios, con el fin de establecer cuál ofrece una delimitación más precisa en las condiciones específicas de la costa del Caribe costarricense.

Capítulo 2: Marco teórico

2.1 Zonas Costeras

Las zonas costeras son definidas como aquellas en las cuales existe una marcada interacción entre el medio marino y el terrestre, considerando por lo tanto una porción del territorio “seca” y otra “húmeda”, las cuales entran en contacto a través de lo que se conoce como el litoral ([Ortiz et al. 2010](#)). En otras palabras, son áreas que se encuentran en la interfaz entre la tierra y el mar, en donde se extiende desde la línea de costa hasta el límite donde empiezan las aguas profundas del océano.

Estas zonas poseen una alta relevancia ecológica debido a su biodiversidad, actuando como hábitats clave para numerosas especies marinas y terrestres. Asimismo, cumplen funciones esenciales como la protección frente a tormentas, la regulación del clima local, el reciclaje de nutrientes y la estabilización de los sedimentos. Esta combinación de funciones ecológicas convierte a las zonas costeras en una de las regiones más dinámicas y complejas del planeta.

Desde el punto de vista socioeconómico, las zonas costeras sostienen actividades humanas fundamentales, entre ellas la pesca, el turismo, la navegación y la recreación, generando así una alta concentración de población y actividades ejerciendo así una presión considerable sobre estos ecosistemas.

Sin embargo, las zonas costeras enfrentan múltiples amenazas. Entre las principales se encuentran el aumento del nivel del mar, la contaminación, la urbanización descontrolada y la pérdida de ecosistemas críticos como manglares y arrecifes coralinos. El cambio climático ha agravado muchos de estos problemas, incrementando la vulnerabilidad de las comunidades humanas asentadas en estos territorios. Esta vulnerabilidad es especialmente marcada en países tropicales y en vías de desarrollo, como lo es Costa Rica.

Por su ubicación geográfica y características ambientales, las zonas costeras de Costa Rica representan áreas de alta sensibilidad ambiental y de gran valor estratégico. Estas albergan ecosistemas de alto valor biológico y brindan sustento a numerosas comunidades locales. No obstante, se ha reportado una creciente presión sobre estos espacios debido al crecimiento urbano

costero, las actividades turísticas no reguladas y el deterioro de sus ecosistemas ([Barrantes et al., 2023](#)).

2.2 Línea de Costa

La línea de costa constituye el límite dinámico entre el medio terrestre y el medio marino, y representa un elemento geográfico de gran relevancia tanto desde el punto de vista ambiental como territorial. Según [Barrantes y Sandoval \(2021\)](#), esta línea se corresponde con el término inglés *shoreline* y puede definirse como la intersección del nivel medio del mar con la superficie terrestre, trazándose usualmente a partir del promedio de los niveles de pleamar y bajamar.

En términos prácticos, la línea de costa no es una línea única ni fija, sino que presenta variaciones continuas debido a la acción de procesos naturales como las mareas, el oleaje, las corrientes y los cambios en los niveles del mar. Por esta razón, en estudios técnicos se diferencian dos componentes principales: la línea de pleamar (línea de marea alta) y la línea de bajamar (línea de marea baja), lo cual genera una franja costera intermareal que cambia en el tiempo y el espacio ([Boak & Turner, 2005](#)).

El estudio de la línea de costa resulta fundamental en la planificación territorial, la gestión del riesgo por inundaciones, la conservación de ecosistemas costeros y la evaluación de los efectos del cambio climático. Su monitoreo permite detectar desplazamientos que reflejan procesos de erosión o acreción, especialmente en regiones vulnerables como el Caribe costarricense.

Según [Pajak y Leatherman \(2002\)](#), aunque la línea de pleamar puede variar por factores meteorológicos y oceanográficos, sigue siendo uno de los indicadores más utilizados en análisis comparativos de evolución costera.

Asimismo, la línea de costa también tiene implicaciones legales y administrativas, ya que la Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre en Costa Rica (Ley N.º 6043) utiliza como referencia la línea de pleamar ordinaria para definir las zonas de uso público y restringido. De ahí la necesidad de contar con criterios técnicos y consistentes para su delimitación.

Por lo tanto, la línea de costa representa una frontera dinámica con implicaciones físicas, ambientales, legales y sociales. Su observación y monitoreo son esenciales para comprender las transformaciones del espacio costero, establecer políticas públicas adecuadas y orientar el desarrollo sostenible en estas zonas.

2.3 Delimitación de las Zonas Costeras en Costa Rica

En Costa Rica, el litoral costero se divide entre el océano Pacífico, con una extensión aproximada de 1254 km, y el mar Caribe, con una longitud cercana a los 220 km, que se extiende desde la desembocadura del río San Juan en la frontera norte, hasta el río Sixaola en la frontera con Panamá ([González, 2013](#); [Barrantes et al., 2020](#)).

La delimitación jurídica y administrativa de estas zonas está regulada principalmente por la Ley sobre la Zona Marítimo-Terrestre (Ley N° 6043), promulgada en 1977. Esta ley define una franja de 200 metros de ancho a partir de la línea de pleamar ordinaria. Dentro de esta franja, los primeros 50 metros son considerados de uso público inalienable, y los 150 metros restantes corresponden a una zona de uso restringido, sujeta a concesiones, permisos especiales o regulación por parte del Estado ([Asamblea Legislativa de Costa Rica, 1977](#)).

La gestión costera también contempla distintas categorías de protección ambiental, tales como: parques nacionales marino-costeros, reservas biológicas, humedales de importancia internacional, refugios de vida silvestre, zonas de protección forestal, y áreas bajo régimen turístico o de conservación. La delimitación precisa de estas áreas está sujeta a múltiples marcos legales y técnicos, incluyendo los planes reguladores costeros y las evaluaciones de impacto ambiental.

Estas divisiones, tanto físicas como legales, se alinean con las definiciones adoptadas internacionalmente y se ilustran en la Figura 2.1.

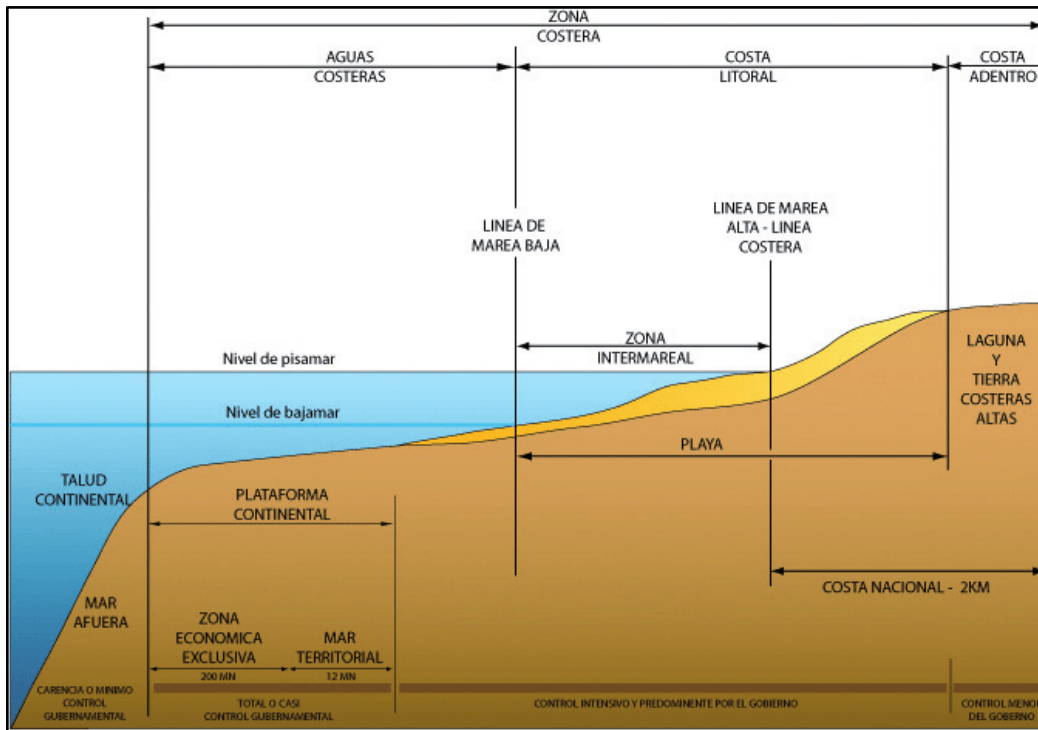


Figura 2.1. Divisiones físicas y políticas de la línea de costa

Fuente: [Moreno et al., 2013](#)

En el caso del Caribe costarricense, esta región no solo tiene relevancia ecológica por su alta biodiversidad y variedad de ecosistemas marino-costeros, como manglares, playas, humedales y arrecifes coralinos, sino también una dimensión sociocultural clave. Es el hogar de comunidades indígenas como los Bribri y Cabécar, así como de poblaciones afrodescendientes que han desarrollado modos de vida vinculados a la pesca artesanal, el ecoturismo y la conservación ([Barrantes et al., 2020](#)).

Desde el punto de vista geológico y geomorfológico, la costa Caribe se puede dividir en dos sectores contrastantes. El sector norte, entre Tortuguero y Moín, presenta un margen continental pasivo con playas largas, barras de arena y zonas de acumulación sedimentaria; mientras que el sector sur, desde Puerto Limón hasta Manzanillo, muestra un régimen compresivo con actividad sísmica, acantilados rocosos, y playas embayadas o “de bolsillo” (*pocket beaches*), altamente vulnerables a la erosión ([Barrantes et al., 2020](#)).

Esta configuración geomorfológica influye directamente en la forma en que se deben delimitar y gestionar las zonas costeras. Por ejemplo, en el sector norte es posible establecer líneas de costa más regulares y con mayor margen de control territorial, mientras que en el sur, la irregularidad del terreno y la cercanía de las formaciones rocosas a la línea de pleamar requieren criterios más ajustados y sensibles a las condiciones naturales.

La delimitación y caracterización de estas zonas es esencial para garantizar la gestión sostenible del litoral costarricense, sobre todo en contextos de cambio climático, donde fenómenos como el aumento del nivel del mar, la erosión costera y los eventos extremos se están intensificando. La adecuada planificación y zonificación permite equilibrar la conservación ambiental con el desarrollo económico y social de las comunidades costeras.

2.4 Erosión

La erosión de playas arenosas puede entenderse como un desequilibrio negativo en el transporte de sedimentos, es decir, cuando la salida de materiales supera su ingreso. Este fenómeno genera una pérdida progresiva de volumen en la playa y es comúnmente percibido por los habitantes costeros como un retroceso de la línea de costa ([Barrantes et al., 2020](#)). En términos generales, la erosión es un proceso natural de desgaste de suelo, sedimentos o rocas en áreas litorales, producto de la acción continua del viento, las olas, las mareas y las corrientes marinas.

Este proceso puede originarse por múltiples factores y manifestarse a distintas escalas temporales. A corto plazo, las tormentas representan una de las principales causas de erosión debido a la energía intensa que descargan sobre el litoral, lo que se traduce en un efecto del oleaje producido por estos eventos. Marejadas ciclónicas, oleajes extremos e inundaciones súbitas también pueden inducir eventos erosivos severos en períodos breves ([U.S. Army Engineer Institute for Water Resources, 2011](#)). Por otro lado, la erosión a largo plazo está frecuentemente asociada con el aumento del nivel del mar (vinculado al cambio climático) y la disminución del suministro natural de sedimentos, como ocurre cuando se interrumpe el transporte fluvial por represas o dragados. Asimismo, los procesos tectónicos constituyen otro factor que puede incidir en la evolución de la línea de costa a largo plazo.

Adicionalmente, otros factores antropogénicos como la extracción de arena, la ocupación desordenada del litoral y la presencia de estructuras rígidas como espigones o rompeolas pueden agravar la erosión al alterar la dinámica natural de las playas y promover la pérdida de sedimentos. La clasificación granulométrica de las arenas también juega un rol importante, ya que los sedimentos más finos suelen ser removidos más fácilmente por la acción del oleaje.

Las consecuencias de la erosión costera pueden ser significativas tanto a nivel ambiental como económico. Según [Haddow et al. \(2017\)](#), la pérdida de playas compromete ecosistemas frágiles como manglares, dunas y áreas de anidación de tortugas; además, debilita la protección natural de la costa frente a fenómenos extremos. Desde el punto de vista económico, se pueden perder infraestructuras, viviendas e incluso fuentes de empleo asociadas al turismo costero.

La Figura 2.2 ilustra distintos casos documentados en la costa caribeña de Costa Rica, donde se observan retrocesos significativos en la línea de costa, afectando tanto zonas naturales como áreas intervenidas con infraestructura.



Figura 2.2. Ejemplos de playas con retroceso en la línea de costa
Fuente: [Barrantes, & Sandoval, 2021](#)

Este fenómeno representa una amenaza directa para las comunidades costeras, no solo por la pérdida del recurso playa, vital para la recreación y el turismo, sino también por la degradación de hábitats, el aumento del riesgo ante inundaciones y la afectación directa a propiedades y medios de vida. Ante este panorama, contar con información confiable sobre la tasa anual de erosión resulta fundamental para la planificación territorial, ya que permite identificar áreas donde el desarrollo urbano debe restringirse o adaptarse mediante el uso de medidas de mitigación y resiliencia ([Islam & Ryan, 2016](#)).

2.5 Sedimentación

La sedimentación, también conocida como acumulación, es el proceso mediante el cual materiales erosionados, como gravas, arenas y arcillas, son transportados por agentes como el agua, el viento o el hielo, y depositados en zonas de menor energía. Este proceso, opuesto a la erosión, se da comúnmente en depresiones topográficas, cuerpos de agua interiores y áreas costeras con baja dinámica de oleaje ([Estado de Veracruz, 2021](#)).

La sedimentación cumple un papel esencial en la dinámica costera, ya que contribuye a la formación y mantenimiento de ambientes como playas, barras litorales, deltas, humedales, y sistemas coralinos. En particular, los sedimentos depositados en la línea de costa pueden funcionar como barreras naturales que mitigan el impacto de eventos extremos como tormentas e inundaciones, al absorber parte de la energía del oleaje y del aumento temporal del nivel del mar.

Las causas de la sedimentación pueden ser tanto naturales como antrópicas. Factores como ciclones, mareas vivas, patrones de oleaje y estacionalidad fluvial influyen en la redistribución de sedimentos a lo largo de las costas ([Kaliraj et al., 2013](#)). Por otro lado, intervenciones humanas como la minería no regulada, la deforestación o la construcción de represas pueden modificar significativamente los patrones de transporte y acumulación sedimentaria, alterando la morfología costera de manera no sostenible.

Tanto la erosión como la sedimentación pueden tener efectos positivos o negativos dependiendo de su magnitud y ubicación. Por esta razón, es fundamental comprender su comportamiento mediante herramientas que permitan monitorear su evolución en el tiempo.

Una de las herramientas más utilizadas actualmente es la teledetección satelital, que ha demostrado ser tan precisa como los métodos tradicionales en el análisis de cambios morfológicos en el litoral, permitiendo su estudio a escalas regionales y temporales amplias.

En la Figura 2.3 se ilustran de forma comparativa los efectos morfológicos de la erosión y la sedimentación sobre los sistemas litorales, destacando cómo ambos procesos, aunque opuestos, están intrínsecamente relacionados dentro del ciclo natural del modelado costero.

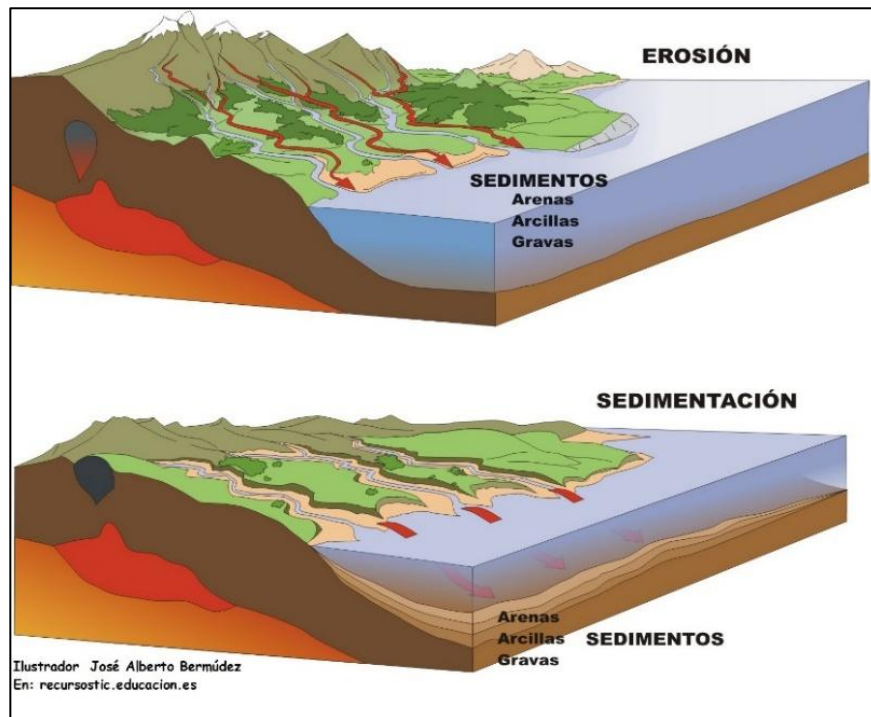


Figura 2.3. Efectos de la erosión y la sedimentación

Fuente: [Barrantes, & Sandoval, 2021](#)

2.6 Teledetección Satelital

La teledetección satelital permite observar y analizar fenómenos que ocurren en la superficie terrestre mediante sensores instalados en satélites artificiales que orbitan la Tierra. Este sistema está conformado por una fuente de energía radiante (natural o artificial), objetos que reflejan o emiten dicha energía, sensores capaces de registrar la radiación en diferentes longitudes de onda, un mecanismo de transmisión de los datos a centros de procesamiento, y una etapa final de análisis e interpretación ([Bella et al., 2008](#)).

Gracias a su cobertura espacial amplia y a su capacidad de generar datos multitemporales, la teledetección se ha convertido en una herramienta esencial en áreas como la planificación territorial, la agricultura, el monitoreo ambiental, la gestión de recursos hídricos, el análisis del cambio climático y la evaluación de desastres naturales.

En este contexto, destaca el programa europeo EARTH, impulsado por la Comisión Europea en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), el cual ofrece acceso gratuito a imágenes de alta resolución provenientes de los satélites Sentinel, ampliamente utilizados en estudios ambientales y costeros.

El desarrollo moderno de la teledetección ambiental comenzó con el lanzamiento del satélite LANDSAT 1 en 1972, que permitió obtener información sistemática sobre la superficie terrestre. En sus inicios, existía una brecha técnica entre los ingenieros y los usuarios finales de los datos, como geógrafos, geólogos y planificadores, sin embargo, con el tiempo esta diferencia fue reduciéndose gracias al avance en herramientas de procesamiento digital y a la colaboración interdisciplinaria ([Romero, 2016](#)).

Actualmente, los satélites de observación terrestre capturan imágenes con alta frecuencia temporal y resolución espacial, permitiendo analizar tanto condiciones actuales como cambios históricos. Esto resulta especialmente útil en el estudio de ambientes costeros, donde la teledetección ha demostrado ser tan precisa como los métodos tradicionales para detectar dinámicas como la erosión, sedimentación o desplazamiento de la línea de costa ([Ding et al., 2021](#); [Marius, 2024](#)).

Adicionalmente, herramientas como GEE y paquetes especializados como CoastSat han facilitado el acceso y análisis de grandes volúmenes de imágenes satelitales. Estos permiten identificar líneas de costa de forma semi-automatizada a partir de índices como el NDWI, logrando precisiones cercanas a los 10 metros ([Vos et al., 2019](#)).

Por lo tanto, la teledetección satelital se consolida como una herramienta clave para el estudio y gestión sostenible de las zonas costeras. La evolución constante de esta tecnología, con la

incorporación de inteligencia artificial, fusión de sensores y análisis en la nube, promete una mayor precisión, eficiencia y accesibilidad para el monitoreo ambiental a nivel global.

2.6.1 Instrumentos de teledetección

Los sensores remotos son los instrumentos que permiten recopilar información de la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico con el área de estudio. Esta tecnología es clave para observar fenómenos a gran escala y con alta precisión.

Según [Veneros et al. \(2020\)](#), estos sensores son instalados en plataformas aéreas o satelitales y registran la energía electromagnética reflejada o emitida por los objetos en diferentes longitudes de onda. Esta información puede ser integrada y analizada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Las mediciones abarcan un amplio rango del espectro electromagnético, desde longitudes de onda cortas, como ultravioleta, visible e infrarroja, hasta microondas. Esto permite detectar características físicas, térmicas o estructurales de la superficie terrestre.

Existen dos grandes tipos de sensores remotos: pasivos y activos. Los sensores pasivos captan la energía natural emitida o reflejada por los objetos, como la radiación solar. Operan comúnmente en el espectro visible, infrarrojo cercano, térmico y microondas ([Earthdata, 2023a](#)).

Por otro lado, los sensores activos emiten su propia señal, como un pulso de radar o láser, y miden el tiempo y la intensidad del rebote. Estos sistemas funcionan eficientemente en condiciones de nubosidad o sin luz solar ([Earthdata, 2023b](#)).

Ambos tipos de sensores son complementarios y esenciales para estudios ambientales, geológicos y costeros. Su integración permite generar datos útiles para monitorear cambios en el uso del suelo, cuerpos de agua, costas, entre otros.

En la Figura 2.4 se observa una representación esquemática del funcionamiento de los sensores pasivos y activos, diferenciando sus fuentes de energía y tipos de sensores empleados.

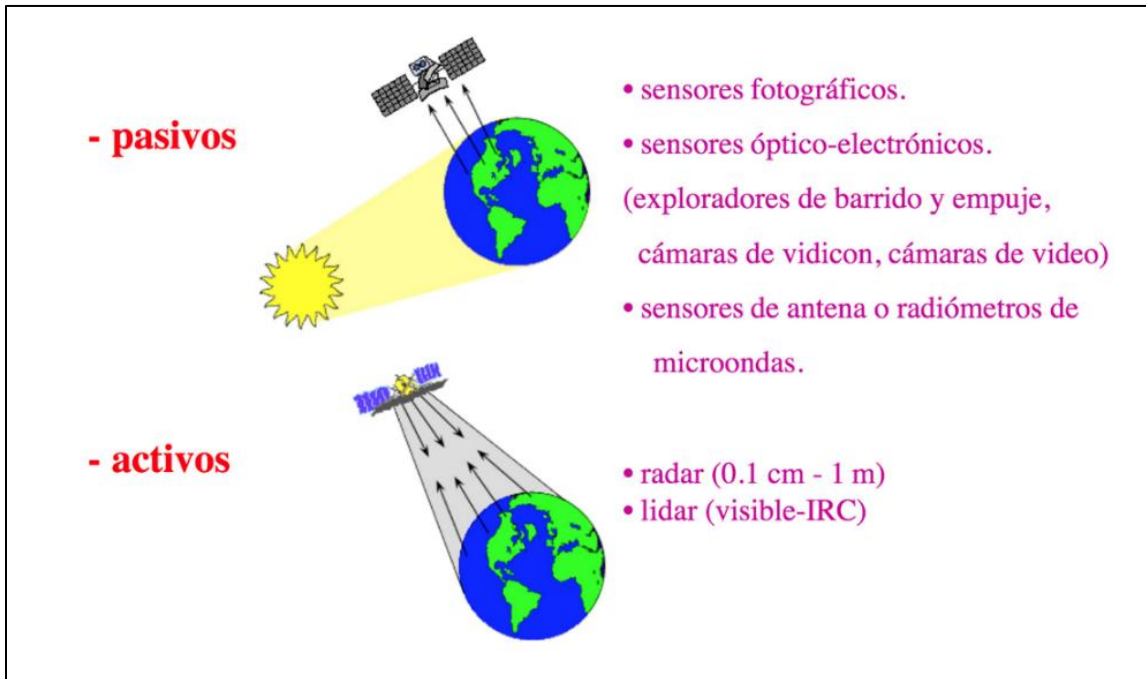


Figura 2.4. Clasificación y funcionamiento de sensores remotos pasivos y activos.

Fuente: Universidad Virtual de Quilmes. Recuperado de <https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-2.html>

El resultado del uso de sensores remotos son las imágenes satelitales, que ofrecen una visión detallada y multispectral de grandes áreas. Estas imágenes, tras ser procesadas, permiten identificar patrones, medir distancias y observar procesos dinámicos.

2.6.2 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son captadas por sensores instalados en satélites artificiales. Estos sensores registran la radiación electromagnética reflejada o emitida por objetos en la superficie terrestre, que luego es transmitida a estaciones terrenas para su procesamiento y análisis (Axess, 2023).

Estas imágenes tienen múltiples aplicaciones, desde la planificación urbana y la gestión de recursos naturales hasta la vigilancia ambiental, el monitoreo de desastres y el estudio del cambio climático. También son útiles para detectar cambios costeros, evaluar la cobertura vegetal y medir la expansión urbana (Axess, 2023; Ding et al., 2021).

Existen tres tipos principales de imágenes satelitales: pancromáticas, multiespectrales e hiperespectrales. Las pancromáticas tienen alta resolución espacial pero en escala de grises; las multiespectrales capturan información en varias bandas del espectro visible e infrarrojo, mientras que las hiperespectrales registran cientos de bandas, permitiendo análisis más detallados ([Geosolutions Consulting, 2023](#)).

Las imágenes multiespectrales, como las del satélite Landsat 8, se componen de una matriz de datos numéricos que representan la intensidad de la radiación en distintas longitudes de onda. Este satélite, por ejemplo, cuenta con 11 bandas espectrales, lo que permite analizar una misma escena desde diferentes porciones del espectro ([Sánchez & Arguijo, 2018](#)).

La información contenida en cada píxel de una imagen ráster incluye datos sobre posición, textura y firma espectral de los elementos de la superficie terrestre. Esto hace posible identificar tipos de cobertura, monitorear la deforestación, evaluar procesos de erosión y analizar áreas urbanas ([Christofi et al., 2025](#); [Geosolutions Consulting, 2023](#)).

Técnicas como la fusión de sensores, el *pansharpening* o el uso de modelos como U-Net permiten aumentar la resolución y precisión del análisis. Estas tecnologías han sido aplicadas en estudios recientes para la detección de líneas de costa, mapeo multitemporal y monitoreo de ecosistemas litorales ([Ding et al., 2021](#)).

2.7 Copernicus

Copernicus es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, diseñado para proporcionar datos precisos sobre el planeta y su medio ambiente para el beneficio de la ciudadanía europea ([Copernicus, 2023b](#)). A través de sus servicios, ofrece información basada en datos de satélites y de sistemas in situ, como sensores terrestres, marítimos y aéreos.

Estos servicios permiten una observación casi en tiempo real del entorno terrestre, marino y atmosférico, así como el monitoreo del cambio climático, la gestión de emergencias y la seguridad ([Copernicus, 2023a](#)). Además, Copernicus está concebido para ajustarse a necesidades locales y regionales, facilitando decisiones estratégicas informadas.

El sistema se basa en seis servicios operativos: atmósfera, medio marino, terrestre, cambio climático, seguridad y gestión de emergencias. Todos ellos utilizan datos recopilados por la familia de satélites Sentinel y por satélites colaboradores internacionales y nacionales ([Copernicus, 2023a](#)).

Cada Sentinel está diseñado para un propósito específico: Sentinel-1, por ejemplo, realiza observaciones todo clima, día y noche, usando radar. Sentinel-2 proporciona imágenes multispectrales de alta resolución útiles para agricultura, uso del suelo y monitoreo de costas.

Copernicus facilita la elaboración de mapas temáticos, predicciones meteorológicas, evaluaciones de riesgos y la detección de anomalías ambientales. Los conjuntos de datos son accesibles y comparables históricamente, permitiendo análisis de largo plazo y visualización de tendencias ([Copernicus, 2023a](#)).

Así mismo, esta examina los patrones y los utilizan para realizar previsiones más precisas, como lo es para el comportamiento de las atmósferas, de los océanos, entre otros. Además, se realizan mapas a partir de datos de representación de imágenes, se identifican características y anomalías y se extrae información estadística.

2.7.1 Sentinel-2

Sentinel-2 fue diseñado específicamente para ofrecer una gran cantidad de datos e imágenes. El satélite está equipado con un sensor multispectral optoelectrónico para levantamientos con una resolución de 10 a 60 m en las zonas espectrales visible, infrarrojo cercano visible (VNIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), incluidos 13 canales espectrales, lo que asegura la captura de las diferencias en el estado de la vegetación, incluidos los cambios temporales, y también minimiza el impacto en la calidad de la fotografía atmosférica ([EOS Data Analytics, 2021](#)).

Según lo publicado en [Sentinel Online \(2023\)](#), las 13 bandas espectrales de SENTINEL-2 van desde el visible VNIR y el infrarrojo cercano (NIR) hasta SWIR:

- Bandas de 4 x 10 metros: las tres bandas RGB clásicas ((azul (~493nm), verde (~560nm) y roja (~665nm)) y una banda de infrarrojo cercano (~833nm);

- Bandas de 6 x 20 metros: 4 bandas estrechas en el dominio espectral de borde rojo de vegetación VNIR (~704nm, ~740nm, ~783nm y ~865nm) y 2 bandas SWIR más anchas (~1610nm y ~2190nm) para aplicaciones como nieve/hielo/ detección de nubes o evaluación del estrés por humedad de la vegetación;
- Bandas de 3 x 60 metros enfocadas principalmente a detección de nubes y corrección atmosférica (~443nm para aerosoles y ~945nm para vapor de agua) y detección de cirros (~1374nm).

Además, Sentinel-2 proporciona imágenes de alta resolución que están disponibles de forma gratuita para su descarga y uso por parte del público, las cuales son utilizadas para una amplia gama de aplicaciones, desde la planificación urbana y la gestión de recursos naturales hasta la detección de desastres naturales y la vigilancia militar. También se utilizan para monitorear el clima y la atmósfera de la Tierra, así como para ayudar en la investigación científica y el estudio del medio ambiente.

En la actualidad existen dos satélites Sentinel-2 en órbita, los cuales son:

- Sentinel-2 A, el cual fue lanzado en junio de 2015.
- Sentinel-2 B, lanzado en marzo de 2017.

Con el lanzamiento del Sentinel-2C en septiembre de 2024, se espera mejorar la continuidad operativa y la frecuencia de observación.

2.8 Índices espectrales

Según [GEO University \(s.f\)](#), los índices espectrales son combinaciones matemáticas entre bandas satelitales que permiten destacar ciertas características de la superficie terrestre. Su uso en teledetección es esencial para detectar cuerpos de agua, vegetación, humedad y otras variables relevantes del entorno.

En zonas costeras, estos índices son herramientas clave para el monitoreo de fenómenos como la erosión, sedimentación y cobertura vegetal. Esto a través de los datos satelitales ofrecidos por Sentinel-2 y Landsat, así como al procesamiento de imágenes en plataformas como GEE.

Además, recientemente se han desarrollado índices avanzados como el MNDWI, el SMBWI, o índices específicos para vegetación y suelos, ampliando la capacidad de discriminación espectral en entornos complejos. Estos índices mejoran la detección de agua, especialmente en áreas urbanas, húmedas o turbias, siendo valiosos para estudios costeros.

2.8.1 Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

El índice NDWI fue planteado por McFeeters en 1996. Hoy en día, su uso principal es detectar y controlar los cambios leves en la cantidad de agua de las masas de agua. Según [EOS Data Analytics \(2023\)](#), el NDWI se utiliza para resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite. Para esto, se debe reducir la reflectancia del suelo y la vegetación, lo que permite que las masas de agua destaquen en la imagen.

Al utilizar las bandas espectrales el NDWI puede aumentar la masa de agua en las imágenes satelitales. La debilidad de este índice es que puede sobreestimar el tamaño de la masa de agua si no se tiene en cuenta la estructura construida. ([EOS Data Analytics, 2023](#)).

El cálculo del NDWI se realiza a través de la siguiente fórmula.

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (1)$$

Donde:

NIR: valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

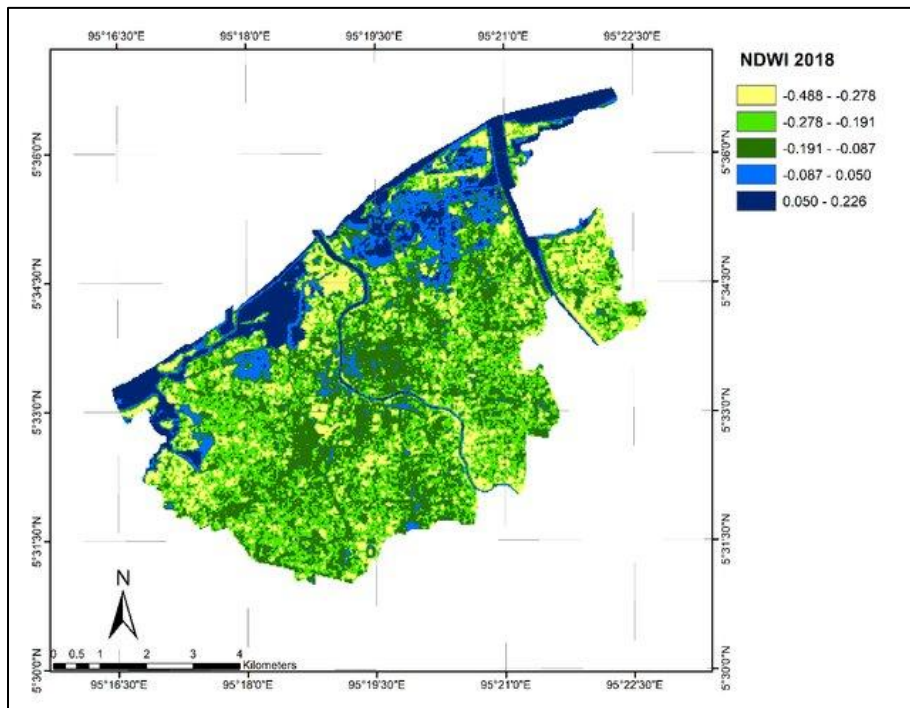
G: valor de reflectancia en la banda del verde visible

En donde según [EOS Data Analytics \(2023\)](#), las longitudes de onda del verde visible van a maximizar la reflectancia habitual de la superficie del agua y las longitudes de onda del infrarrojo cercano maximizan la alta reflectancia de la vegetación terrestre y las zonas de suelo, mientras que minimizan la baja reflectancia de las masas de agua.

Así mismo, para los datos de Sentinel-2, las bandas utilizadas son la Banda 3 para el verde visible y la Banda 8 para el infrarrojo cercano.

Para lograr interpretar los valores del NDWI es necesario conocer que los valores de las masas de agua son superiores a 0,5, mientras que la vegetación presenta valores más pequeños, lo que permite distinguir más fácilmente la vegetación de estas ([EOS Data Analytics, 2023](#)). Estos se encuentran en los siguientes rangos y un ejemplo al aplicar este índice, se puede visualizar en el mapa 2.1:

- 0,0 a 0,2 = Inundación, humedad.
- 0,2 a 1 = Superficie del agua.
- 0,3 a 0,0 = Sequía moderada, superficie sin agua.
- -1 a -0,3 = Sequía, superficie sin agua.



Mapa 2.5. Ejemplo de visualización del NDWI

Fuente: [Achmad et al., 2019](#)

2.8.2 Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificada (MNDWI)

El índice MNDWI fue planteado por Xu en el año 2006, como una mejora del NDWI original. El propósito del índice es optimizar la detección de masas de agua en entornos urbanos y reducir la confusión causada por suelos, sombras o superficies construidas ([Xu, 2006](#)).

Según [Xu \(2006\)](#), el MNDWI sustituye la banda del infrarrojo cercano (NIR) por una banda del infrarrojo de onda corta (SWIR), permitiendo reducir la reflectancia del suelo seco o artificial y resaltar mejor los cuerpos de agua. Este índice se vuelve particularmente útil para analizar cuerpos hídricos en zonas urbanas, costeras o con alta turbidez.

La fórmula para calcular el MNDWI es la siguiente:

$$MNDWI = \frac{G-SWIR}{G+SWIR} \quad (2)$$

Donde:

G: valor de reflectancia en la banda del verde visible.

SWIR: valor de reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta.

Para imágenes Sentinel-2, se utiliza la banda 3 para el verde visible (~560 nm) y la banda 11 para el SWIR (~1610 nm).

La interpretación de valores del MNDWI permite identificar zonas con mayor o menor contenido de agua superficial. De forma general:

- Valores mayores a 0 indican presencia de agua.
- Valores entre 0 y -0.3 representan suelos húmedos o con vegetación rala.
- Valores menores a -0.3 indican suelo seco o superficies construidas.

En la Figura 2.5 se ilustra un ejemplo de aplicación del índice MNDWI durante un evento de inundación. Las zonas en azul oscuro representan cuerpos de agua claramente identificables, mientras que los tonos más claros reflejan áreas con menor contenido de humedad o superficies no inundadas. Esta visualización permite delimitar con precisión las áreas afectadas por agua superficial, demostrando la utilidad del MNDWI para el análisis de eventos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones.

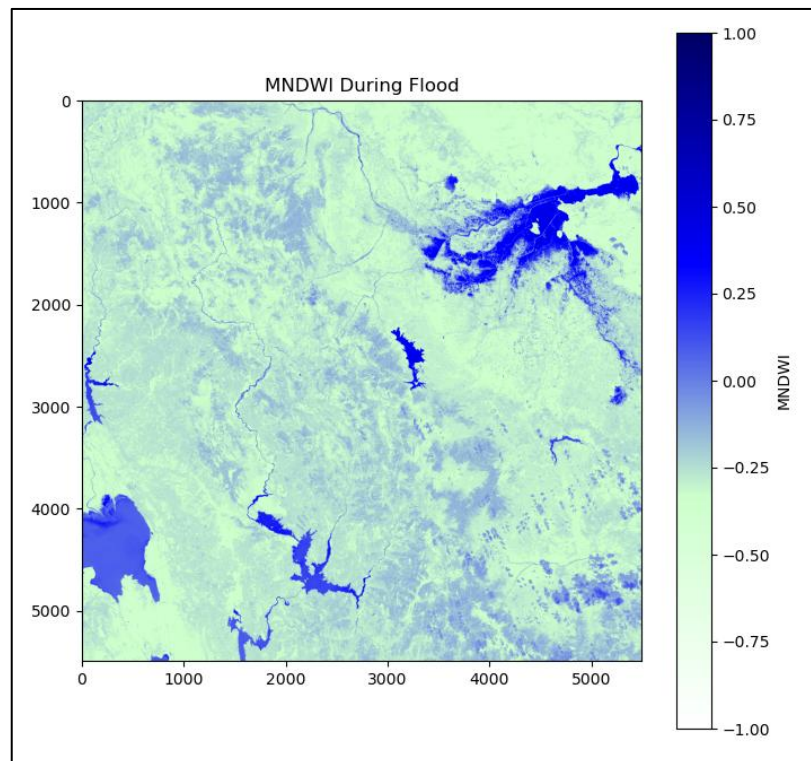


Figura 2.6. Ejemplo de visualización del MNDWI durante una inundación
Fuente: [CloudFerro, 2023](#)

2.8.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los índices de vegetación son utilizados para diferenciar aquellas zonas que presentan cobertura con vegetación de alta actividad fotosintética y con vegetación en bases fenológicas. Así mismo, son utilizados para determinar zonas de vegetación cubiertas con otros tipos de coberturas antes mencionados ([López, 2012](#)). Los cuales, se realizan mediante la implementación de las bandas espectrales adecuadas para el proceso y su principal objetivo corresponde a resaltar la cubierta vegetal de acuerdo con la respuesta espectral ([Pérez & Rosario, 2019](#)).

El índice de vegetación mayormente utilizado corresponde al NDVI, este proceso se basa en la diferencia que existe en las reflectancias que la vegetación verde muestra en la banda visible y en el infrarrojo cercano ([Gómez, 2004](#)).

La diferencia que se presenta en las bandas mencionadas anteriormente se presenta en un rango de entre -1 y 1, para los cuales, de acuerdo con [Gómez \(2004\)](#), los valores positivos que se obtienen corresponden a las zonas con vegetación presente y, por otro lado, cuyos resultados sean valores

negativos se relacionan con nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas, esto debido a una mayor reflectancia en el visible infrarrojo. Además, cabe mencionar que al obtener un valor elevado de NDVI se debe a la existencia de una vegetación vigorosa y cuando este valor es bajo indica la presencia de nubes y cuerpos de agua ([López, 2012](#)).

Basado en lo anterior, el NDVI se define por medio de la siguiente ecuación ([Gómez, 2004](#)):

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (3)$$

Donde:

NIR: valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

R: valor de reflectancia en la banda del rojo visible

2.9 Método Otsu

El método de Otsu, desarrollado por Nobuyuki Otsu en 1979, es una técnica de umbralización automática ampliamente utilizada en el procesamiento de imágenes. Su objetivo principal es determinar un umbral óptimo que divida los niveles de gris de una imagen en dos clases: una que representa el objeto de interés y otra que representa el fondo ([Otsu, 1979](#)). Este umbral se selecciona maximizando la varianza interclase, lo que garantiza una separación estadísticamente significativa entre ambas regiones.

En teledetección, esta técnica es utilizada para segmentar índices espectrales como el NDWI, NDVI y MNDWI, con el fin de identificar zonas con características particulares, como cuerpos de agua, áreas vegetadas o regiones urbanas. Su aplicación permite automatizar el proceso de clasificación binaria a partir de imágenes satelitales, eliminando la necesidad de establecer umbrales subjetivos o definidos empíricamente.

El objetivo principal del método es separar el contenido de una imagen en clases relevantes, como agua y no agua, utilizando un valor umbral óptimo derivado automáticamente del histograma de la imagen. Esta técnica es eficaz para definir cuerpos de agua a partir de índices espectrales como el

NDWI. En la Figura 2.6, se observa una segmentación de cuerpos de agua obtenida mediante esta metodología, la cual permite distinguir con claridad las áreas acuáticas en color azul.

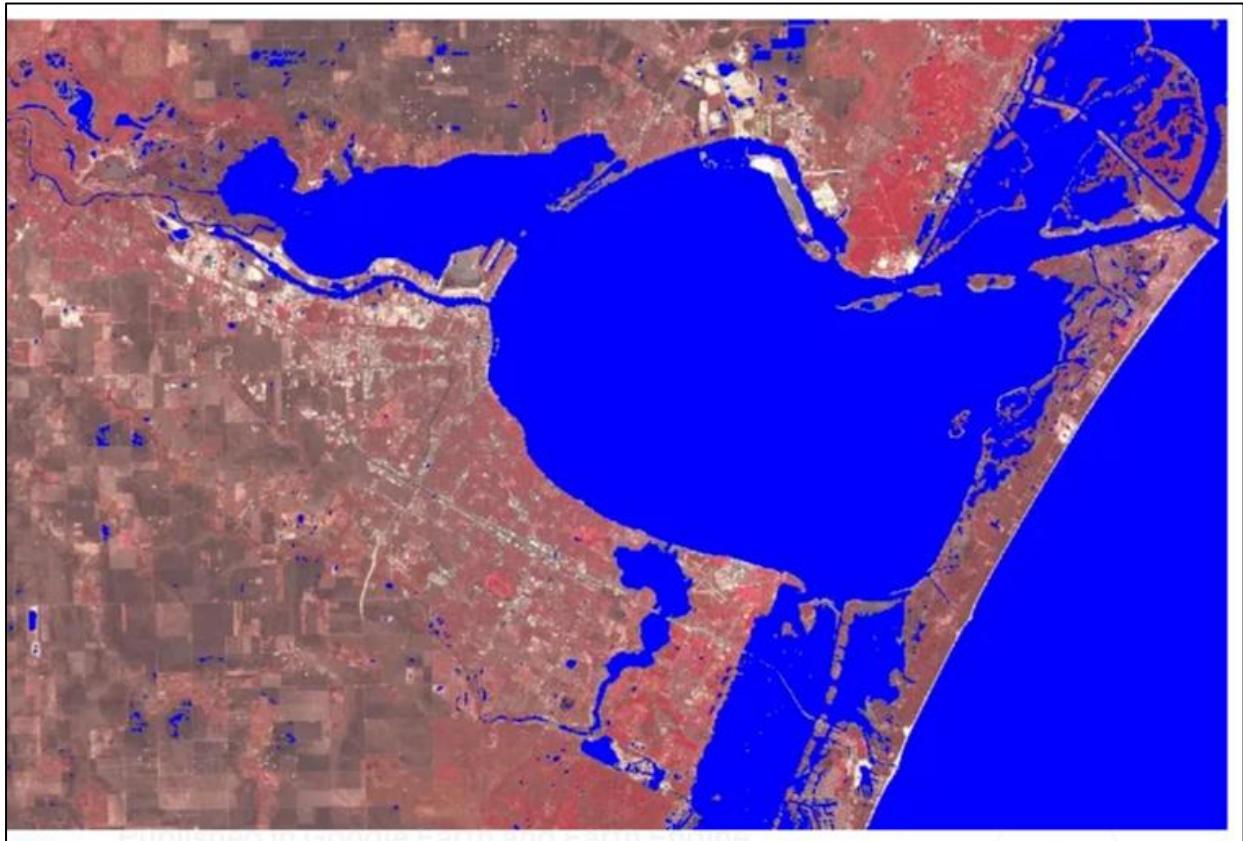


Figura 2.7. Segmentación de masas de agua con el Método de Otsu
Fuente: [Google Earth Engine, 2023](#)

Diversos estudios han demostrado la utilidad del método de Otsu en el análisis de eventos hidrológicos extremos, como inundaciones, mediante la segmentación de zonas afectadas utilizando índices como el NDWI. Asimismo, se ha aplicado en el seguimiento de la dinámica costera, permitiendo la extracción automática de líneas de costa a partir de imágenes de satélite.

A pesar de su efectividad, el método presenta limitaciones cuando se aplica a imágenes con histogramas complejos o distribuciones no bimodales, ya que está optimizado para separar dos clases. Sin embargo, su integración con filtros espaciales o técnicas de posprocesamiento mejora significativamente los resultados, lo que justifica su uso en proyectos de análisis ambiental a gran escala.

2.10 Google Earth Engine

GEE es una plataforma tecnológica que permite monitorear y medir los cambios en el entorno terrestre, a escala planetaria, en un amplio catálogo de datos de observación de la tierra. La plataforma ofrece acceso computacional intrínsecamente paralelo a miles de computadoras en los centros de datos de Google ([Moore & Hansen, 2011](#)).

Además, esta herramienta proporciona una gran cantidad de datos satelitales de alta resolución, así como herramientas de análisis y visualización para ayudar a los usuarios a entender mejor los patrones y cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

Así mismo, GEE cuenta con múltiples capas de datos ya disponibles en la plataforma, algunas de las cuales han sido previamente analizadas para eliminar obstáculos como la cobertura de nubes. Estas capas se han transformado en datos como la reflectancia de la parte superior de la atmósfera, la reflectancia de la superficie y la georreferenciación ([Kumar & Mutanga, 2018](#)).

El editor de código de esta plataforma es un IDE basado en la web para la API de JavaScript de GEE. Este requiere iniciar sesión con una cuenta de Google que se haya habilitado para el acceso a esta herramienta. Las características del Editor de código están diseñadas para hacer que el desarrollo de flujos de trabajo geoespaciales complejos sea rápido y fácil ([Google Earth Engine, 2023](#)).

Una característica adicional de la plataforma es la posibilidad de compartir códigos informáticos, lo que significa que los usuarios no necesitan ser expertos en lenguajes de programación como Javascript o Python. Esta accesibilidad se ve respaldada por una comunidad en línea activa, que proporciona asistencia y apoyo. La velocidad, la flexibilidad y la facilidad de uso de GEE generan una excelente oportunidad para que la comunidad de investigación aproveche esta herramienta en estudios de observación terrestre ([Kumar & Mutanga, 2018](#)).

Por lo general, según [Kumar y Mutanga \(2018\)](#), GEE desempeña un papel significativo al ofrecer soluciones realistas para abordar desafíos relacionados con el procesamiento de grandes conjuntos de datos, convirtiéndolos en información útil para enfrentar problemáticas ambientales. Su diseño

se centra en la gestión de volúmenes masivos de información, un obstáculo crucial para los científicos que trabajan con imágenes satelitales.

Así mismo, GEE permite la implementación del método de Otsu gracias a su capacidad de procesamiento en la nube y su compatibilidad con algoritmos de reducción de histogramas. Esto permite aplicar el umbral sobre extensas áreas geográficas y en análisis multitemporales, lo cual resulta útil en estudios ambientales que requieren observar cambios a lo largo del tiempo.

Por otra parte, GEE también brinda la capacidad de realizar cálculos de índices fundamentales para el procesamiento de las imágenes, como los índices de vegetación y de agua, entre otros. Estos cálculos son esenciales para evaluar la salud de los ecosistemas y la disponibilidad de recursos hídricos.

Capítulo 3: Objetivos

Objetivo general:

- Analizar los cambios en la línea de costa en el Caribe de Costa Rica, utilizando la plataforma Google Earth Engine y las imágenes satelitales Sentinel-2, en el periodo de agosto 2017 a agosto 2023, como insumo para estudios del impacto de los cambios en la línea de costa.

Objetivos específicos:

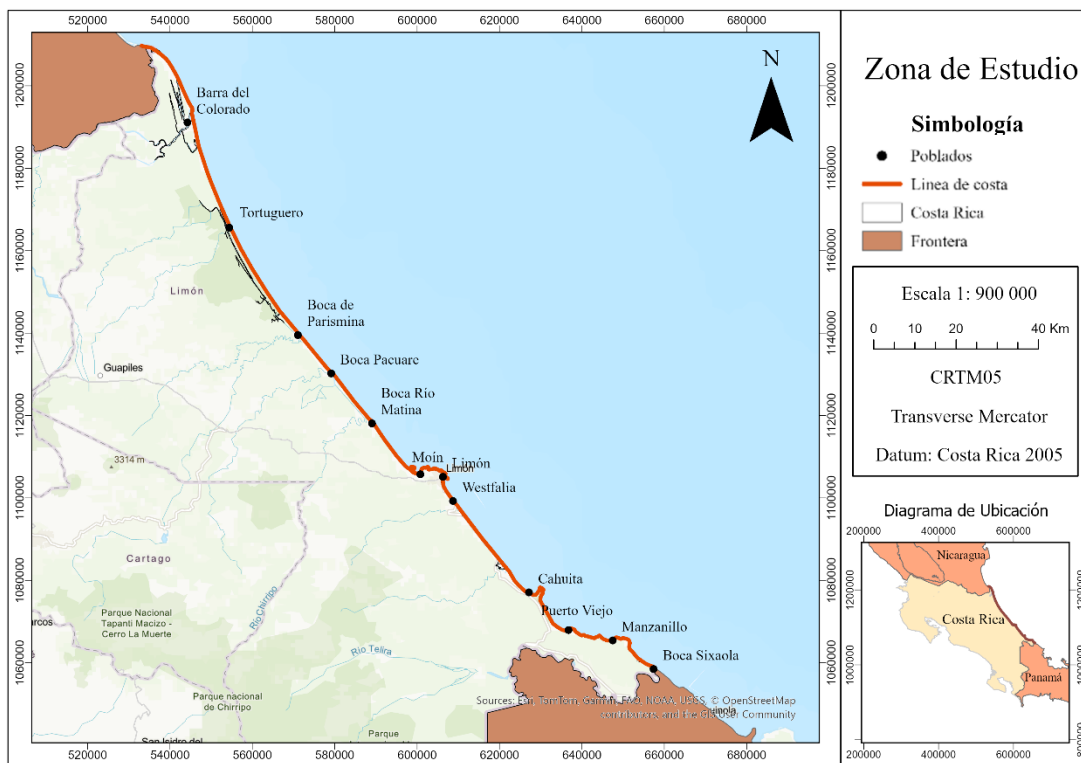
1. Calcular los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada y los Índices de Agua de Diferencia Normalizada usando Google Earth Engine y las imágenes de la misión Sentinel 2 de forma que se genere información que permita la delimitación de la línea de costa.
2. Identificar la línea de costa utilizando los índices previamente calculados y la herramienta Google Earth Engine (GEE), de forma que se calcule la tendencia del cambio en la línea de costa y se identifiquen las zonas con procesos de erosión o acreción.
3. Ubicar las áreas con procesos de erosión o acreción mediante la generación de mapas a través de la herramienta QGIS para la caracterización de las áreas afectadas por estos procesos.

Capítulo 4: Metodología

4.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la franja costera del mar Caribe en Costa Rica, comprendida entre la frontera con Nicaragua y el límite con Panamá. Esta zona fue delimitada digitalmente en un SIG, considerando únicamente los sectores de contacto directo entre el continente y el mar. De esta manera, se excluyeron cuerpos de agua interiores y áreas continentales sin influencia marina, concentrando el análisis en la franja litoral propiamente dicha.

Dentro de esta franja costera se ubican diversos poblados de interés que sirven como puntos de referencia territorial. Entre ellos destacan Barra del Colorado, Tortuguero, Boca de Parismina, Boca Río Matina, Moín, Limón, Westfalia, Cahuita, Puerto Viejo, Manzanillo y Boca Sixaola, todos ellos visibles la Mapa 4.1.



Mapa 4.1. Delimitación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia por medio del programa QGIS versión 3.32.3

Esta representación cartográfica muestra con claridad los límites del área de estudio, los principales centros poblados, la línea de costa y su ubicación geográfica dentro del territorio nacional. La inclusión de este mapa permite contextualizar espacialmente el alcance del análisis y refuerza la comprensión metodológica del enfoque adoptado en la investigación.

4.2 Selección de imágenes satelitales

La adecuada selección de imágenes satelitales representó un paso esencial para garantizar la calidad y precisión del análisis de la línea de costa. En este estudio se utilizaron productos del satélite Sentinel-2, disponibles a través del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Estas imágenes ofrecen una resolución espacial de 10 metros y una alta frecuencia de adquisición (cada 5 días en el ecuador, combinando los satélites Sentinel-2A y 2B), lo cual resulta especialmente útil para estudios de monitoreo costero, donde los cambios pueden producirse en periodos de tiempo relativamente cortos.

Para la obtención de las imágenes se utilizó la plataforma GEE, donde se elaboró un *script* específico que permitió consultar la colección COPERNICUS/S2. Este código filtró los productos por ubicación, rango de fechas y porcentaje de nubosidad menor al 20%. Además, permitió extraer metadatos clave como el identificador de la imagen (ID), la fecha, la hora local de adquisición y el porcentaje de nubes sobre la zona de estudio. Este código puede ser consultado en el Anexo 1.

Una de las decisiones metodológicas más relevantes fue la necesidad de trabajar con imágenes capturadas durante condiciones de marea baja. Esto se debe a que la opción ideal es aplicar una corrección de marea mediante modelos hidrodinámicos, sin embargo, esto no fue viable, ya que este tipo de corrección requiere información detallada de las condiciones atmosféricas, mareográficas y de presión superficial al momento exacto de la captura. Dado que tales datos no están disponibles de forma sistemática para todas las fechas e imágenes, se optó por seleccionar únicamente productos cuya adquisición coincidiera con momentos de marea baja.

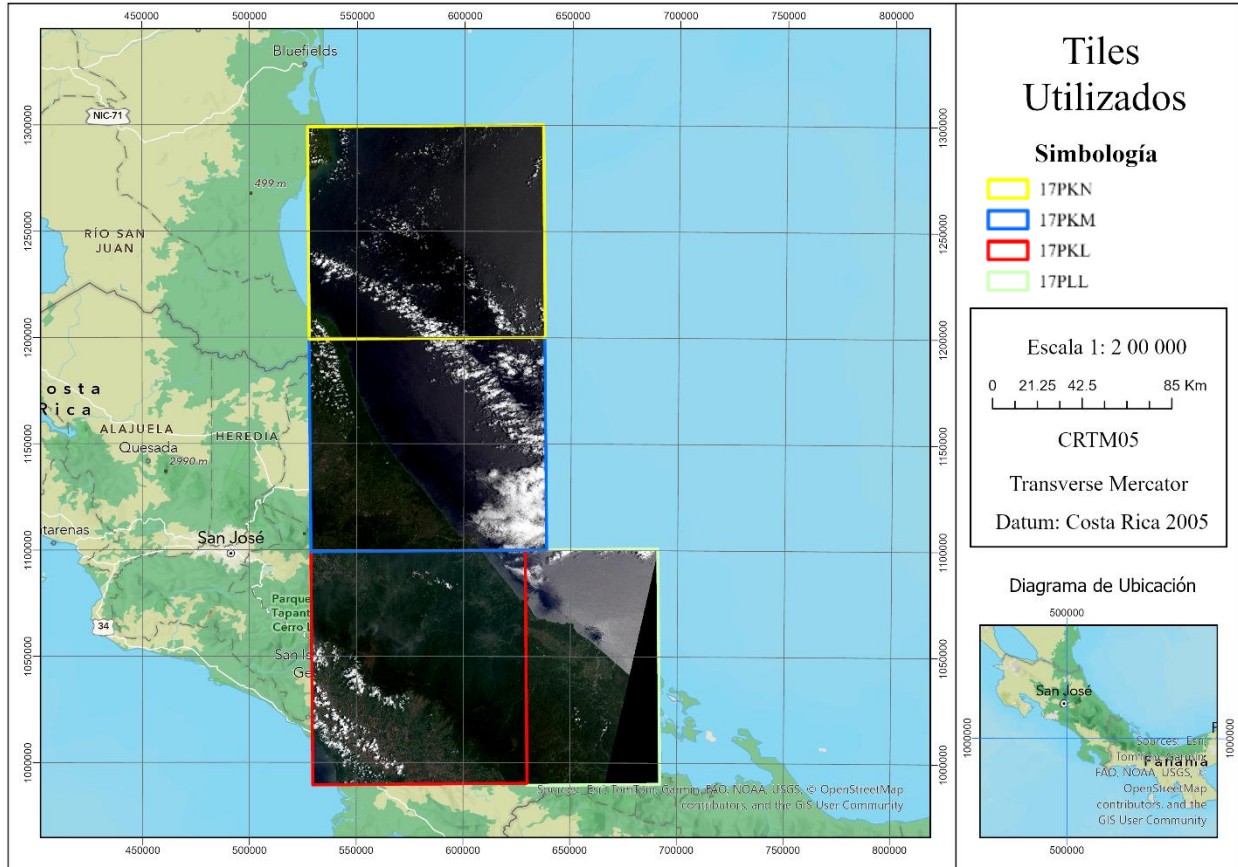
Para validar esta condición, se consultaron registros de marea históricos provenientes de fuentes oficiales como lo es el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y plataformas de monitoreo oceanográfico en línea (como IMN: <https://www.imn.ac.cr/tabla-de-mareas>; Tabla de Mareas:

<https://tablademareas.com/cr/costa-mar-caribe/limon>). Cada imagen potencial fue comparada con los niveles de marea registrados para su fecha y hora de adquisición. Solo se consideraron adecuadas aquellas imágenes capturadas durante marea baja o en condiciones cercanas a ella, con el objetivo de asegurar una representación precisa del límite tierra-agua y garantizar que la comparación entre diferentes fechas se realizara bajo condiciones semejantes. Este criterio permitió reducir errores derivados de variaciones en la línea de costa ocasionadas por el efecto de la marea.

Una vez filtradas las imágenes por porcentaje de nubosidad y altura de marea, fue necesario realizar una inspección visual detallada de cada una de ellas. Para ello, se utilizó el *script* que se encuentra en el Anexo 1 en GEE, el cual permitió visualizar individualmente cada producto en el visor de la plataforma. Aunque muchas imágenes cumplían con los filtros establecidos, algunas presentaban nubes o sombras localizadas justo sobre la zona costera, lo cual las volvía inadecuadas. Esta revisión manual permitió depurar el conjunto de imágenes y seleccionar solo aquellas con visibilidad clara y sin obstrucciones sobre el área de interés.

La zona costera del Caribe de Costa Rica no está contenida en una sola imagen satelital, sino que abarca distintas divisiones geospaciales denominadas “cuadrantes MGRS” (Military Grid Reference System). Este sistema es una cuadrícula estándar utilizada para dividir la superficie terrestre en áreas uniformes denominadas “*tiles*” o “cuadrantes”.

En este estudio, la costa se analizó a través de cuatro de estos cuadrantes: 17PKM, 17PKN, 17PKL y 17PLL. Cada uno de estos códigos identifica un área geográfica específica dentro de la cuadrícula MGRS, similar a las piezas de un rompecabezas que, al unirse, permiten cubrir toda la región de interés. Dividir el análisis en estas cuatro secciones facilitó la organización de la información espacial, evitó solapamientos entre imágenes contiguas y aseguró una cobertura completa y ordenada. En el Mapa 4.2 se muestra un ejemplo del área abarcada por los cuatro *tiles* utilizados.



**Mapa 4.2. Área abarcada por los Tiles 17PKN, 17PKM, 17PKL, 17PLL.
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.**

Para el periodo comprendido entre 2017 y 2023, se evaluaron múltiples productos por zona y por año. Luego del análisis visual y técnico, se seleccionó al menos una imagen representativa por año en cada cuadrante, procurando siempre cumplir con las condiciones ya descritas.

Estas imágenes seleccionadas constituyen la base del procesamiento posterior, incluyendo el cálculo de índices espectrales, la clasificación binaria, la extracción de la línea de costa y la generación de productos cartográficos. En el Cuadro 4.1 se puede observar un ejemplo de la colección de imágenes.

Tile	ID	Fecha	Hora local (CR)	Nubes (%)	Altura de marea (m)
17PKM	20170126T160501_20170126T160504_T17PKM	26/1/2017	10:05:04	1.20	0.3
17PKM	20180205T160509_20180205T160518_T17PKM	5/2/2018	10:05:18	8.94	0
17PKM	20180205T160509_20180205T161021_T17PKM	5/2/2018	10:10:21	0.06	0
17PKM	20190730T160519_20190730T160519_T17PKM	30/7/2019	10:10:38	3.81	0

Cuadro 4.1. Ejemplo de colección de imágenes Sentinel-2 utilizadas.

Fuente: Elaboración propia por medio del programa Excel.

4.3 Cálculo del NDWI y clasificación

Una vez seleccionadas las imágenes satelitales óptimas por zona y año, se procedió con el cálculo del índice de agua NDWI, el cual es ampliamente utilizado para la delimitación de cuerpos de agua y líneas de costa. Este índice se basa en la diferencia entre la reflectancia del espectro verde y la del infrarrojo cercano, expresada mediante la fórmula 1 mencionada en el capítulo del marco teórico. En el caso de Sentinel-2, se utilizaron las bandas B3 (Green) y B8 (NIR), que ofrecen una resolución espacial de 10 metros.

El cálculo del NDWI se realizó directamente en GEE, mediante un *script* diseñado para aplicar esta fórmula a cada imagen previamente seleccionada. La elección de este entorno de procesamiento permitió automatizar el cálculo sobre grandes volúmenes de datos y visualizar los resultados de forma inmediata. El código correspondiente a esta operación se encuentra documentado en el Anexo 2.

El resultado del índice NDWI generó una nueva imagen ráster para cada producto satelital, en la que los valores cercanos a +1 indican alta probabilidad de presencia de agua (como el mar), mientras que los valores cercanos a -1 corresponden a superficies no acuáticas (como arena, vegetación o infraestructura). Sin embargo, para obtener una separación clara entre el mar y la tierra firme, fue necesario convertir esta imagen continua en una imagen binaria, lo que implicó la aplicación de un umbral de clasificación.

Para definir el umbral óptimo de segmentación, se utilizó el método de Otsu, el cual permite realizar una clasificación automática dividiendo los valores de una imagen en dos clases mediante la maximización de la varianza interclase. Esta técnica, originalmente desarrollada para el procesamiento de imágenes en escala de grises, ha sido ampliamente adaptada para la segmentación de índices espectrales en el campo de la teledetección. En este estudio, el algoritmo se aplicó sobre los valores del NDWI de cada imagen para generar una clasificación binaria: agua (valor 1) y no agua (valor 0).

La principal ventaja del método de Otsu es su objetividad, ya que no requiere que el usuario defina manualmente un valor umbral, lo que reduce el sesgo y mejora la replicabilidad de los resultados. No obstante, también fue necesario revisar visualmente los resultados obtenidos, ya que en algunos casos el valor calculado por el algoritmo podía verse afectado por elementos no deseados en la imagen, como sombras o nubes. En tales casos, se procedió a realizar el ajuste de forma manual.

Una vez obtenida la imagen binaria resultante de la clasificación NDWI + Otsu, se extrajo la línea de costa mediante la conversión del raster a vector, identificando el contorno entre las clases de agua y no agua. Esta línea fue posteriormente exportada en un software SIG (ArcGIS Pro) para ser depurada.

Cabe destacar que todo este flujo de procesamiento, desde el cálculo del NDWI hasta la segmentación y la exportación de la línea, fue automatizado mediante un único script desarrollados en GEE, el cual se encuentra en el Anexo 2. Esta estrategia permitió aplicar de forma sistemática el mismo proceso a todas las zonas y años considerados en el estudio.

4.4 Extracción y procesamiento de la línea de costa

Una vez generadas las imágenes binarias resultantes de la clasificación del índice NDWI mediante el método de Otsu, se procedió con la extracción de la línea de costa. Este proceso consistió en identificar el límite entre las dos clases resultantes de la segmentación: áreas clasificadas como agua y áreas clasificadas como no agua. Para ello, se utilizó la función *reduceToVectors* de GEE, la cual aplica un algoritmo de trazado de contornos sobre la imagen clasificada, la cual generó un conjunto de polígonos vectoriales que representan el borde entre ambas zonas.

Dado que el objetivo era obtener una línea unidimensional que representara con precisión la interfaz tierra-mar, los polígonos fueron transformados en líneas mediante una función específica en GEE, cuyo código se documenta en el Anexo 2. Esta conversión permitió aislar exclusivamente el contorno externo de la clase “agua”, el cual se interpretó como la posición estimada de la línea de costa para la fecha de captura de cada imagen satelital.

El resultado de este procedimiento fue una colección de líneas de costa para cada zona (PKM, PKN, PKL y PLL) y para cada uno de los años analizados (2017–2023). Estas líneas fueron posteriormente exportadas en formato vectorial (*Shapefile*) para su procesamiento y análisis en un entorno SIG de escritorio. Durante esta exportación, se definió como sistema de referencia espacial el EPSG:5367 (CRTM05), correspondiente al sistema oficial de coordenadas de Costa Rica, lo cual aseguró la compatibilidad con otras capas cartográficas utilizadas en el estudio.

El postprocesamiento de las líneas se llevó a cabo en el software ArcGIS Pro, donde se aplicaron procedimientos de edición y suavizado geométrico para mejorar la continuidad y precisión de los trazados obtenidos. Esto fue especialmente necesario en zonas donde la línea extraída presentaba irregularidades, interrupciones o bordes dentados producto del ruido en la clasificación. El suavizado se realizó mediante la herramienta “*Smooth Line*”, con una tolerancia ajustada a 200 metros, que se determinó mediante pruebas preliminares buscando mantener un equilibrio entre fidelidad geométrica y limpieza visual.

Además del suavizado, se eliminaron segmentos espurios o fragmentos de línea que no correspondían al borde costero principal, como líneas generadas en áreas interiores, esteros o cuerpos de agua aislados. Esta limpieza fue realizada de forma manual en cada uno de los cuadrantes, con el objetivo de garantizar que el producto final representara únicamente la línea de costa marina. Esta etapa requirió una verificación visual detallada, superponiendo las líneas extraídas sobre imágenes de referencia para validar su coherencia geográfica.

El Mapa 4.3 muestra un ejemplo del resultado final del procedimiento de extracción y procesamiento, correspondiente a la línea de costa del año 2023. En esta se aprecia la línea generada mediante la metodología aplicada, superpuesta sobre la imagen satelital de referencia.

Este esquema cromático permitió distinguir fácilmente la evolución temporal de la línea de costa dentro de cada sector.

Además, se realizó una capa de grupo por cada año en donde se incorporaron tres capas principales: el polígono con la línea de costa extraída, el raster resultante del índice NDWI y la imagen satelital en combinación RGB. Esta estructura permitió validar visualmente los resultados y analizar desplazamientos espaciales.

4.5 Análisis de la línea de costa

Con las líneas de costa extraídas y organizadas por año y zona, se procedió a realizar un análisis multitemporal con el fin de identificar y cuantificar los cambios espaciales ocurridos en la costa caribeña de Costa Rica entre 2017 y 2023. Este análisis se llevó a cabo de forma independiente para cada uno de los cuadrantes MGRS (17PKM, 17PKN, 17PKL y 17PLL), permitiendo comparar los desplazamientos ocurridos en segmentos específicos del litoral y detectar patrones de erosión o acreción.

El primer paso consistió en superponer las líneas de costa de diferentes años dentro de una misma vista en ArcGIS Pro. Estas líneas fueron organizadas dentro de grupos de capas, una por cada zona de estudio. Esta estructura permitió mantener la organización por cuadrante y facilitó la comparación visual directa entre años. La simbología de cada línea se mantuvo constante, utilizando el mismo código de colores descrito anteriormente, lo cual permitió distinguir con claridad los desplazamientos ocurridos entre un año y otro.

Para mejorar la interpretación visual y facilitar la evaluación cualitativa, se habilitaron adicionalmente las capas ráster del índice NDWI y las imágenes RGB correspondientes a cada año. Esto permitió realizar una revisión detallada de cada situación costera, teniendo como referencia tanto la clasificación espectral como la imagen original. De esta manera, fue posible validar si los desplazamientos observados eran coherentes con las condiciones visibles en la imagen satelital, descartando posibles errores derivados de nubes, sombras o ruido de clasificación.

Además del análisis visual y comparativo, se procedió a calcular distancias entre líneas de costa de años distintos utilizando herramientas de medición en ArcGIS Pro. Esta tarea permitió cuantificar los desplazamientos de la línea costera en sectores clave, lo que facilitó la identificación de procesos de erosión o acreción con precisión. Para ello, se generaron transectos entre líneas de años extremos (por ejemplo, 2017 y 2023) en los puntos donde se observaron mayores variaciones, y se midieron las distancias en metros entre ellas. Estas distancias fueron posteriormente organizadas en tablas.

4.6 Generación de mapas para la interpretación espacial de resultados

Una vez organizadas las líneas de costa por año y cuadrante, se procedió a la generación de mapas temáticos con el fin de facilitar la visualización e interpretación espacial de los cambios detectados. Estos mapas fueron elaborados en el entorno SIG de ArcGIS Pro, integrando la información extraída mediante GEE con las capas de imágenes RGB y los índices NDWI procesados previamente.

Cada mapa fue construido incorporando tres elementos clave: la imagen satelital en composición RGB, el resultado del índice NDWI y la línea de costa correspondiente al año en análisis. Esta estructura permitió visualizar simultáneamente la información espectral, la segmentación binaria y la delimitación de la línea de costa, lo cual facilitó la validación y análisis multitemporal.

Para los mapas comparativos, se superpusieron las líneas de costa de los distintos años dentro de una misma vista, manteniendo el esquema cromático previamente definido. Este código de colores permitió identificar los desplazamientos de la línea costera, así como patrones recurrentes de erosión o acreción en cada zona.

Además, se incluyeron elementos cartográficos estándar como barra de escala, norte geográfico, leyenda simbólica y referencias de ubicación para mejorar la comprensión espacial de cada escena. Los mapas fueron generados por separado para los cuadrantes PKM, PKN, PKL y PLL, permitiendo así una evaluación detallada en cada sección del litoral analizado.

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1 Imágenes Sentinel-2 utilizadas

El conjunto de imágenes satelitales Sentinel-2 utilizado en este proyecto abarca un periodo de ocho años, desde 2017 hasta 2024, y constituye la base para la evaluación multitemporal de la línea de costa del litoral Caribe costarricense. Gracias a su resolución espacial de 10 m y su frecuencia de revisita, las imágenes seleccionadas permitieron capturar, con buen nivel de detalle, las variaciones espaciales de la costa a lo largo del tiempo.

Para cubrir completamente la zona de estudio que se extiende desde el límite norte con Nicaragua hasta la frontera sur con Panamá, fue necesario incorporar imágenes pertenecientes a cuatro *tiles* del sistema MGRS: 17PKM, 17PKN, 17PKL y 17PLL. Cada *tile* abarca una sección del litoral con características físicas y dinámicas propias, por lo que esta separación facilitó la organización del análisis por sectores y la posterior comparación entre regiones del Caribe costarricense.

En el Cuadro 5.1 se detallan las imágenes utilizadas, incluyendo su código ID, la fecha de adquisición, la hora local, el porcentaje de nubosidad registrado y la altura aproximada de la marea. Esta información fue clave para seleccionar imágenes en condiciones óptimas, favoreciendo tanto la precisión de la extracción de líneas de costa como la homogeneidad de los resultados entre años.

Tile	ID	Fecha	Hora local (CR)	Nubes (%)	Altura de marea (m)
17PKM	20170126T160501_20170126T160504_T17PKM	26/1/2017	10:05:04	1.20	0.3
17PKM	20180205T160509_20180205T160518_T17PKM	5/2/2018	10:05:18	8.94	0
17PKM	20180205T160509_20180205T161021_T17PKM	5/2/2018	10:10:21	0.06	0
17PKM	20190730T160519_20190730T160519_T17PKM	30/7/2019	10:10:38	3.81	0
17PKM	20200515T160509_20200515T160510_T17PKM	15/5/2020	10:10:29	3.24	0
17PKM	20210619T160509_20210619T160856_T17PKM	19/6/2021	10:10:30	10.14	-0.1

Tile	ID	Fecha	Hora local (CR)	Nubes (%)	Altura de marea (m)
17PKM	20220604T160509_20220604T160511_T1 7PKM	4/6/2022	10:10:30	3.33	-0.2
17PKM	20230922T160511_20230922T160511_T1 7PKM	22/9/2023	10:10:31	9.60	0
17PKM	20240325T160509_20240325T160643_T1 7PKM	25/3/2024	10:10:30	2.51	0
17PKN	20170126T160501_20170126T160504_T1 7PKN	26/1/2017	10:05:04	9.11	0.3
17PKN	20180205T160509_20180205T160518_T1 7PKN	5/2/2018	10:05:18	44.52	0
17PKN	20190730T160519_20190730T160519_T1 7PKN	30/7/2019	10:10:23	32.35	0
17PKN	20200326T160509_20200326T160509_T1 7PKN	26/3/2020	10:10:13	4.74	0
17PKN	20210619T160509_20210619T160856_T1 7PKN	19/6/2021	10:10:16	2.84	-0.1
17PKN	20220604T160509_20220604T160511_T1 7PKN	4/6/2022	10:10:16	0.75	-0.2
17PKN	20230922T160511_20230922T160511_T1 7PKN	22/9/2023	10:10:17	31.25	0
17PKN	20240330T160511_20240330T160556_T1 7PKN	30/3/2024	10:10:15	8.55	-0.1
17PKL	20170126T160501_20170126T160504_T1 7PKL	26/1/2017	10:05:04	1.38	0.3
17PKL	20181212T160509_20181212T160504_T1 7PKL	12/12/2018	10:10:37	1.99	0.1
17PKL	20190730T160519_20190730T160519_T1 7PKL	30/7/2019	10:10:52	28.05	0
17PKL	20200515T160509_20200515T160510_T1 7PKL	15/5/2020	10:10:43	17.28	0
17PKL	20210619T160509_20210619T160856_T1 7PKL	19/6/2021	10:10:45	9.19	-0.1
17PKL	20220604T160509_20220604T160511_T1 7PKL	4/6/2022	10:10:44	8.24	-0.2
17PKL	20230629T160519_20230629T160514_T1 7PKL	29/6/2023	10:10:49	18.30	0
17PKL	20240105T160509_20240105T160509_T1 7PKL	5/1/2024	10:10:44	7.95	0.2
17PLL	20170126T160501_20170126T160504_T1 7PLL	26/1/2017	10:05:04	0.82	0.3
17PLL	20180913T160459_20180913T160502_T1 7PLL	13/9/2018	10:05:02	7.57	0
17PLL	20190705T160521_20190705T160726_T1 7PLL	5/7/2019	10:10:46	1.74	-0.1
17PLL	20200515T160509_20200515T160510_T1 7PLL	15/5/2020	10:10:40	4.24	0

Tile	ID	Fecha	Hora local (CR)	Nubes (%)	Altura de marea (m)
17PLL	20210619T160509_20210619T160856_T1 7PLL	19/6/2021	10:10:41	7.12	-0.1
17PLL	20220604T160509_20220604T160511_T1 7PLL	4/6/2022	10:10:41	9.75	-0.2
17PLL	20230922T160511_20230922T160511_T1 7PLL	22/9/2023	10:10:42	17.33	0
17PLL	20240325T160509_20240325T160643_T1 7PLL	25/3/2024	10:10:41	4.44	0

Cuadro 5.1. Colección de imágenes Sentinel-2 utilizadas.
Fuente: Elaboración propia por medio del programa Excel

Una de las fortalezas más destacables de esta selección fue la capacidad de encontrar, para cada *tile* y cada año, al menos una imagen útil. Esto resulta especialmente valioso considerando que el Caribe costarricense presenta condiciones atmosféricas complicadas durante gran parte del año, con una alta frecuencia de nubosidad. Aun así, se lograron identificar imágenes con porcentajes de nubosidad notablemente bajos, incluso por debajo del 2 % en varias escenas, lo cual mejoró significativamente la visibilidad de la zona costera.

Otro elemento clave fue el control de las condiciones de marea. Para cada año se eligió la imagen con la marea más baja disponible en los registros del IMN. Las alturas oscilaron entre +0.3 m y – 0.2 m, de acuerdo con los valores registrados en las tablas de marea oficiales. Esto permitió maximizar la superficie costera expuesta, reduciendo el riesgo de interpretar como agua zonas que en realidad forman parte del área intermareal, las cuales podrían quedar cubiertas durante condiciones de marea alta.

Además de facilitar el análisis multitemporal, la colección de imágenes facilitó comparaciones espaciales entre regiones del Caribe, permitiendo identificar similitudes o diferencias en los patrones costeros según factores como la morfología local, la influencia de ríos, manglares o la presencia de asentamientos humanos.

Cabe destacar que la calidad de las imágenes no solo dependió del porcentaje de nubosidad total, sino también de su distribución dentro de la imagen. En algunos casos, se optó por imágenes con valores moderados de nubosidad, pero en las cuales las nubes no afectaban directamente la franja costera, lo cual resultó más ventajoso que seleccionar imágenes con menor nubosidad, pero con obstrucciones en el área de interés.

La organización por *tiles* también facilitó el manejo y procesamiento de las imágenes en GEE, permitiendo aplicar el análisis por sectores definidos, optimizar tiempos de ejecución y reducir errores de cobertura al trabajar con polígonos acotados a la zona visible de cada imagen.

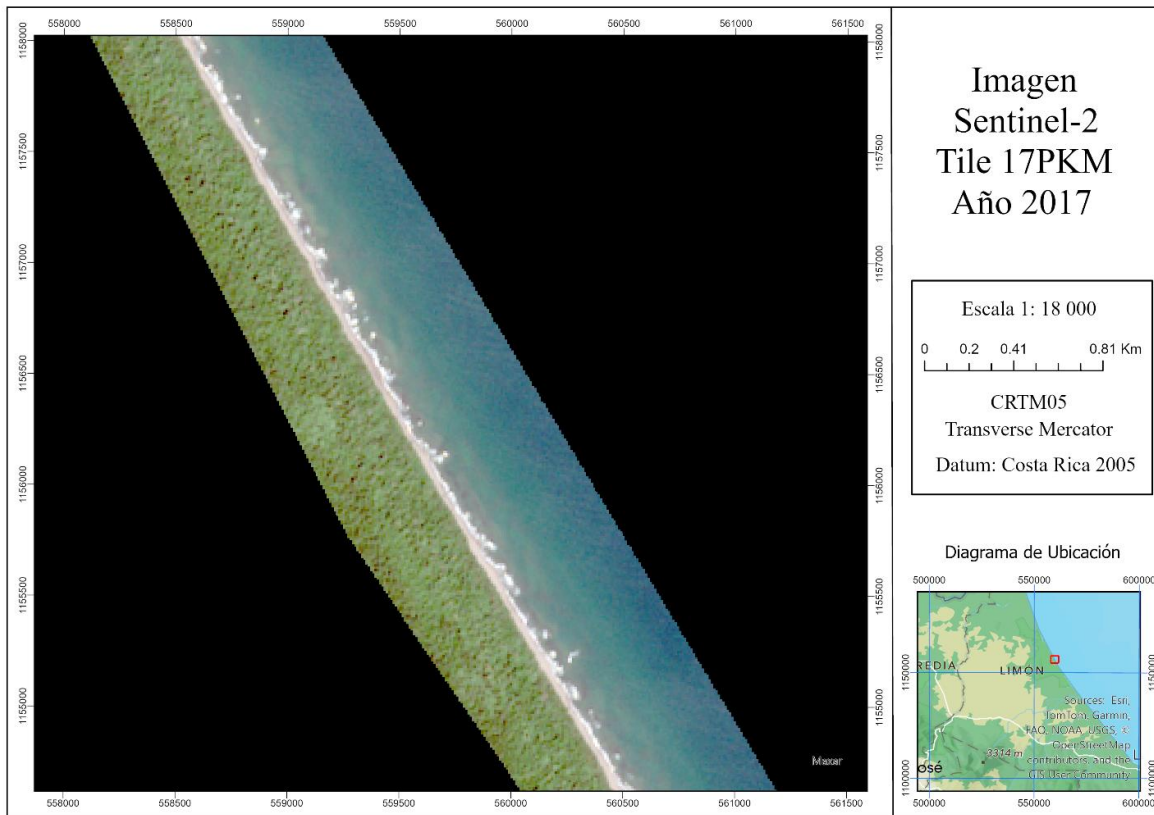
En conjunto, la colección seleccionada representa un insumo para el análisis de la dinámica costera del Caribe de Costa Rica. Este conjunto no solo permitió observar cambios puntuales entre los años extremos del periodo (2017 y 2024), sino también visualizar progresiones graduales, fluctuaciones interanuales y sectores donde la línea de costa se ha mantenido relativamente estable a lo largo del tiempo.

En términos generales, esta colección de imágenes constituye un insumo para el análisis exploratorio de la dinámica costera del Caribe costarricense. Si bien los resultados deben interpretarse con cautela, debido a factores como la resolución espacial, la cobertura de nubes y las condiciones locales de cada imagen, el conjunto seleccionado brinda un punto de partida para observar posibles patrones de cambio de la línea de costa en distintos sectores del litoral.

5.2 Extracción de la línea de costa mediante NDWI

La aplicación del índice NDWI permitió generar una serie de líneas de costa para el periodo 2017–2023 a lo largo del litoral caribeño costarricense. Estas líneas fueron extraídas a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 seleccionadas por su baja nubosidad y condiciones de marea baja, lo cual favoreció la visibilidad de la zona de transición entre tierra y mar en distintos puntos de la costa. El resultado principal fue una línea vectorial por año para cada zona, representando la posición estimada de la línea de costa.

A continuación, en el Mapa 5.1 se presenta la imagen satelital RGB utilizada como insumo base para el análisis del año 2017. Esta imagen corresponde a una porción del tile 17PKM, capturada en condiciones que permitieron una observación clara del entorno costero. Su inclusión permite contextualizar visualmente el área de trabajo y brinda una referencia inicial para la evaluación espacial.

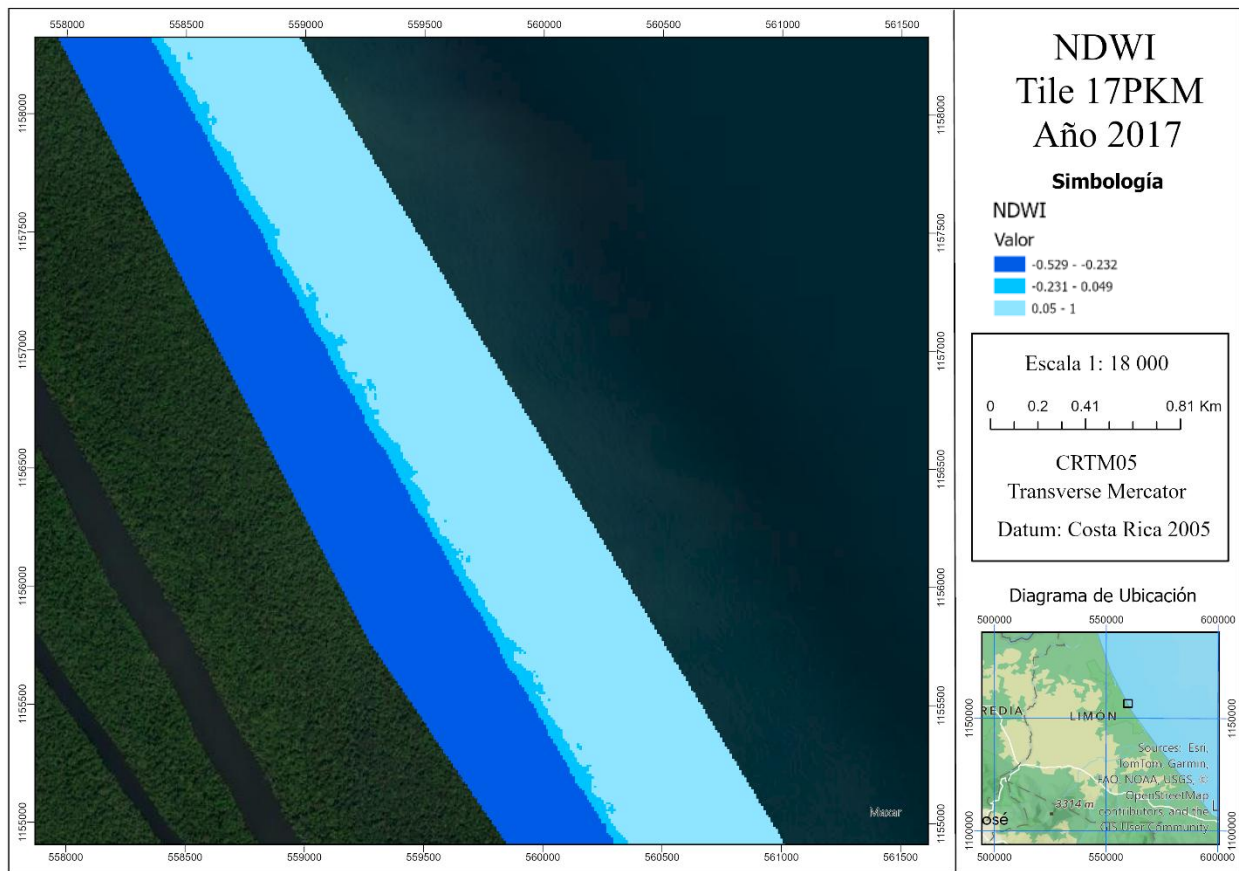


Mapa 5.1. Imagen satelital Sentinel-2 del año 2017
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS Pro

La imagen muestra sectores con presencia de vegetación densa cerca del litoral, zonas despejadas de playa y cuerpos de agua adyacentes a la línea costera. Esta combinación de elementos permite observar cómo se comportan los índices espectrales al momento de diferenciar entre componentes terrestres y acuáticos, lo cual resulta clave para la interpretación de los productos derivados.

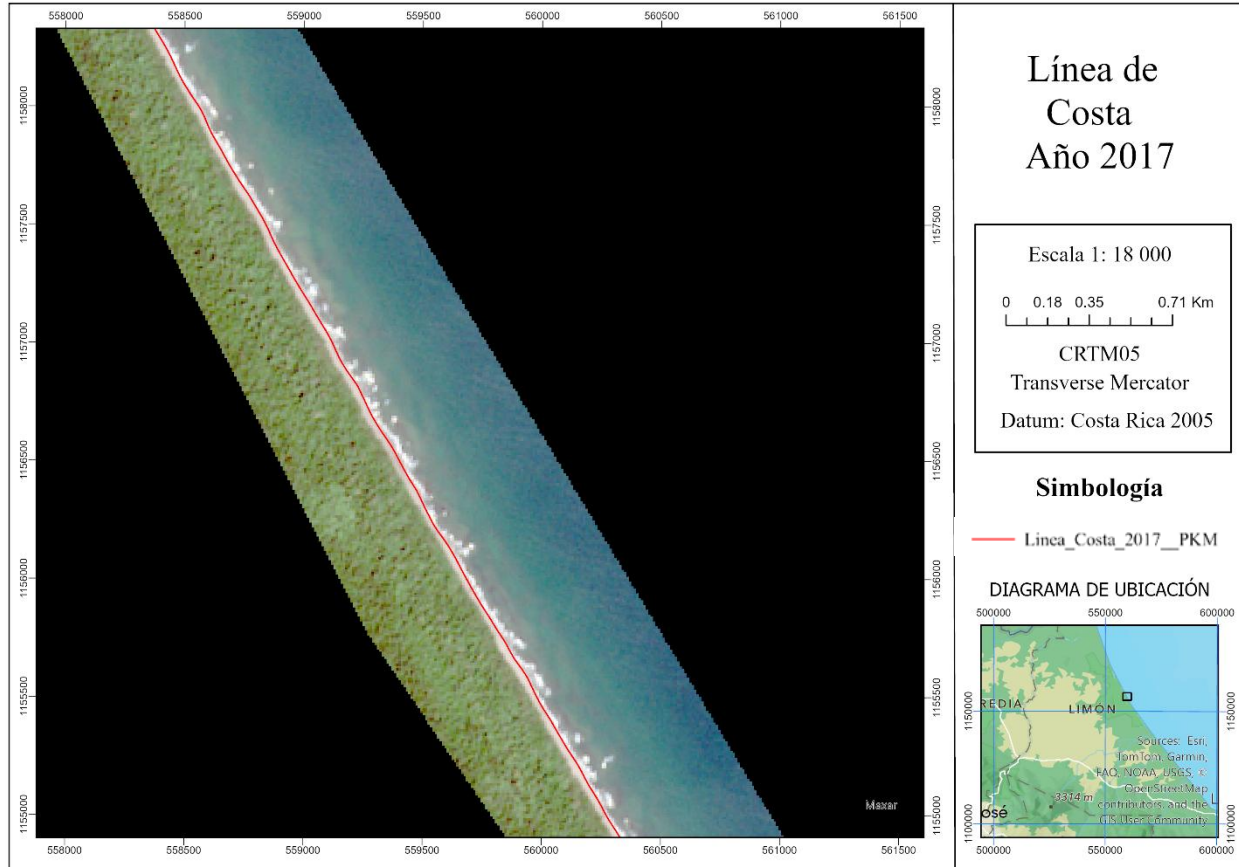
Con base en esta imagen, se calculó el índice NDWI para el mismo sector, con el fin de facilitar la distinción entre tierra firme y cuerpos de agua superficiales. El resultado de este proceso se muestra a continuación, evidenciando las zonas donde la reflectancia de las bandas verdes y del infrarrojo de onda corta permite una mayor separación espectral.

En el Mapa 5.2 se puede observar una transición diferenciada entre áreas con alta humedad, asociadas a cuerpos de agua o zonas saturadas, y superficies continentales más secas. Este contraste espectral constituye la base para aplicar técnicas de segmentación automática, ya que facilita la definición de un umbral que separa ambos dominios. La representación obtenida no es una delimitación, sino un insumo intermedio que sirve para derivar la línea de costa mediante un posterior procesamiento.



Mapa 5.2. Índice NDWI generado para el año 2017
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS Pro

Con el producto NDWI como base, se generó la línea de costa correspondiente al año 2017 mediante una segmentación binaria. En el siguiente Mapa se presenta el resultado de este proceso, mostrando la línea vectorial obtenida y su relación espacial con los elementos visuales presentes en la imagen.



Mapa 5.3. Línea de costa generada para el año 2017
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS Pro

La línea generada presenta una correspondencia visual con el borde litoral en sectores donde no se identificaron coberturas densas ni interferencias espectrales notables. Sin embargo, en áreas cubiertas por vegetación ribereña o manglares, se observaron ligeras desviaciones que requirieron revisión manual. Esta revisión consistió en una verificación visual dentro de un entorno SIG, permitiendo ajustar manualmente la línea en casos puntuales donde el resultado automático no coincidía con el límite observado.

Se logró obtener la línea de costa correspondiente al área de estudio previamente descrita en el capítulo 4.1, aplicando de manera uniforme la metodología establecida. Este producto constituyó la base cartográfica esencial para el desarrollo de los análisis temporales y comparativos, al proporcionar una referencia espacial coherente del límite tierra-mar. Gracias a esta representación estandarizada fue posible evaluar la dinámica costera en los diferentes periodos considerados.

ajusta de forma coherente al límite observado visualmente en la imagen satelital, mientras que el NDVI tiende a generar bordes difusos o desalineados en sectores con vegetación cercana al litoral.

El NDVI, si bien es útil para identificar áreas con cobertura vegetal, no discrimina eficazmente entre zonas húmedas, suelos saturados o cuerpos de agua, lo que dificulta su aplicación directa para este tipo de segmentación. En la Figura anterior se observa cómo en varias zonas la línea generada por NDVI se desvía hacia áreas interiores cubiertas por vegetación costera o manglares, lo que compromete la precisión de la línea de costa.

Por el contrario, el NDWI muestra un mayor contraste en la franja de transición entre tierra y mar, lo que facilita la segmentación automática y reduce la necesidad de corrección manual. Este comportamiento fue consistente en todas las zonas en las que se probó la comparación entre ambos índices.

En función de estos resultados, se optó por utilizar exclusivamente el índice NDWI en el resto del análisis. Su comportamiento fue estable y permitió una interpretación directa para los fines del proyecto, centrados en la detección de cambios en la posición de la línea de costa. Si bien el NDVI puede tener aplicaciones complementarias en estudios de cobertura o vegetación litoral, no resultó ser una herramienta adecuada para la delimitación costera precisa en este contexto.

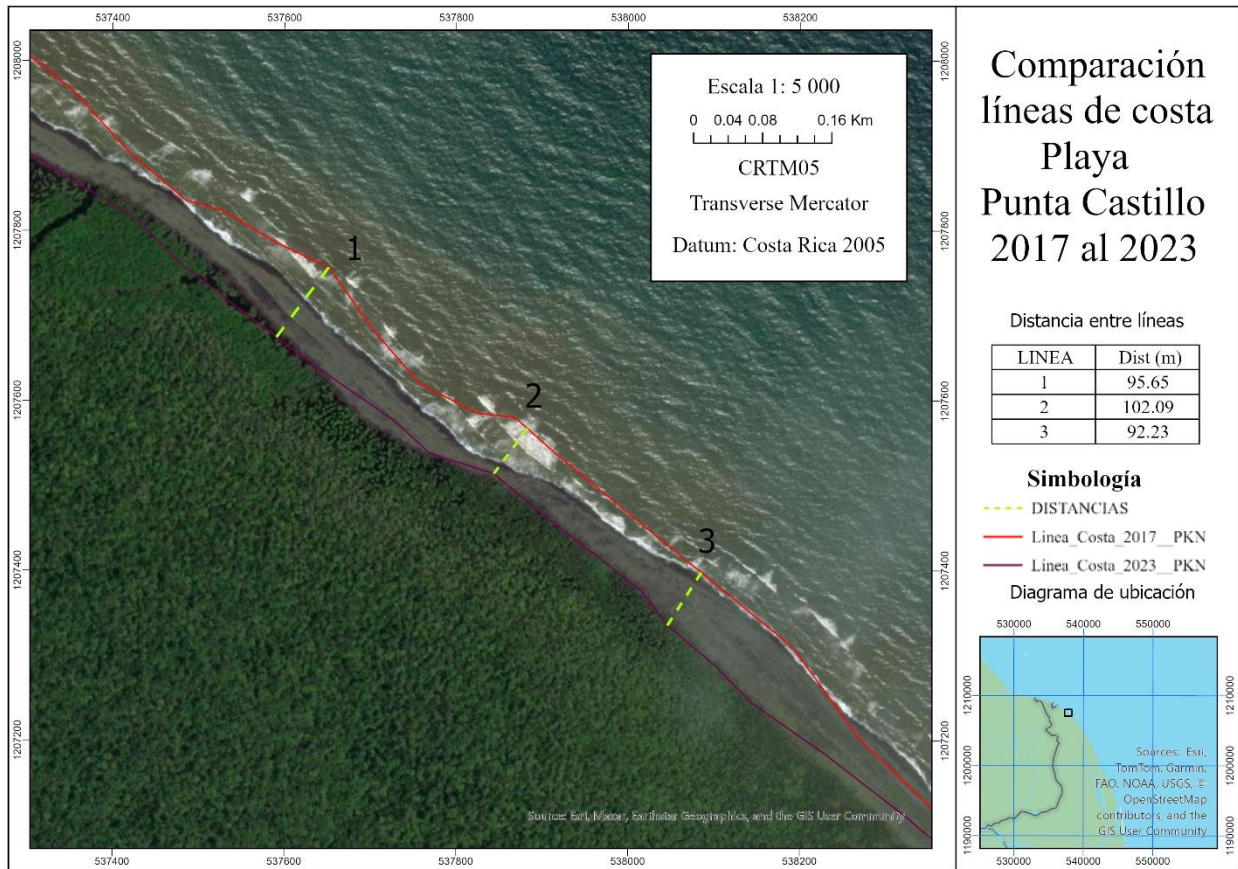
5.4 Análisis de la variación de la línea de costa por zonas

5.4.1 Playa Punta Castilla

El litoral del Caribe Sur de Costa Rica ha sido objeto de múltiples investigaciones que han documentado patrones consistentes de erosión costera en sectores como Moín, Gandoca y Manzanillo. En esos lugares, los hallazgos han mostrado retrocesos significativos en la línea de costa, asociados a dinámicas complejas entre factores naturales y antrópicos, tal como se expondrá en las siguientes secciones. En este contexto, se consideró importante ampliar el análisis hacia el Caribe Norte, una región que ha sido relativamente menos estudiada, pero que también presenta indicios de transformaciones notables. Uno de los sectores evaluados en esta zona fue Punta

Castilla, donde se aplicó el mismo procedimiento metodológico implementado en el resto del estudio, con el fin de identificar desplazamientos espaciales relevantes.

En el siguiente Mapa se presenta una comparación entre las líneas de costa correspondientes a los años 2017 y 2023 en el sector de Punta Castilla. Este análisis permite visualizar los cambios ocurridos en un periodo de seis años, y se apoya en mediciones de distancia tomadas en tres puntos representativos del tramo costero analizado.



Mapa 5.5. Comparación líneas de costa de los años 2017 y 2023 en playa Punta Castilla.
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.

Los resultados obtenidos evidencian desplazamientos significativos de la línea de costa en sentido tierra adentro, con distancias de 95.65 m, 102.09 m y 92.23 m en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente. Estos valores reflejan un patrón claro de retroceso costero, lo cual sugiere que este sector también está siendo afectado por procesos erosivos activos, pese a no haber sido previamente reportado en estudios científicos o comunitarios.

Lo observado en Punta Castilla resulta particularmente relevante, ya que valida la hipótesis de que los cambios en la línea de costa no se limitan únicamente a sectores del Caribe Sur, sino que también se manifiestan en regiones del Caribe Norte. Este hallazgo amplía la comprensión territorial del fenómeno, y permite establecer paralelismos con los comportamientos documentados en zonas como Moín o Gandoca.

Además, los resultados confirman que los procesos de erosión no responden a una dinámica homogénea a lo largo del litoral costarricense, sino que presentan variaciones importantes tanto espaciales como temporales. A pesar de que no se dispone de estudios previos específicos en Punta Castilla, la magnitud de los desplazamientos identificados en este análisis refuerza la necesidad de considerar este sector dentro de futuras iniciativas de monitoreo, planificación territorial o conservación ambiental.

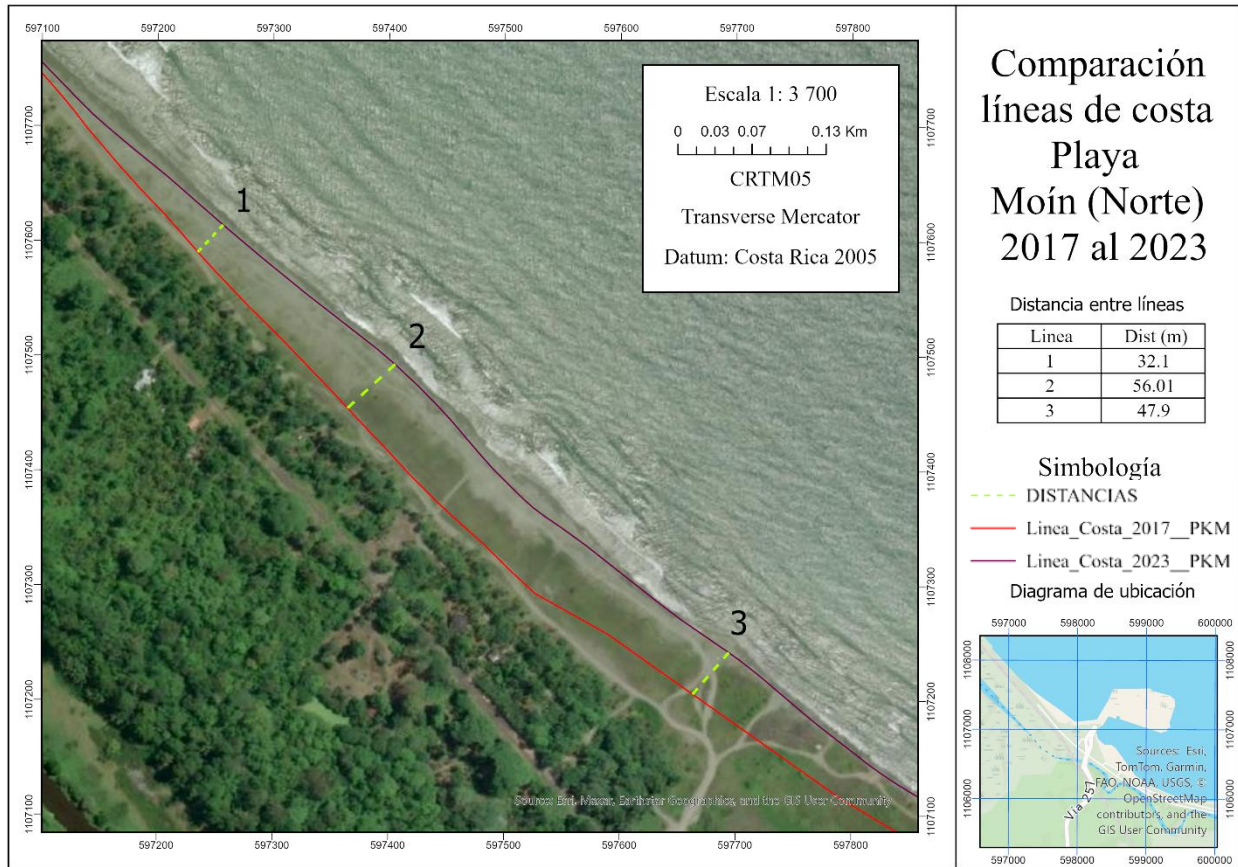
Así mismo, si bien en esta sección se destacó la comparación directa entre los años 2017 y 2023, es importante señalar que el presente trabajo cuenta con información multitemporal que permitió trazar líneas de costa para todos los años del periodo 2017–2023. Por ello, los valores aquí reportados no deben entenderse como eventos aislados, sino como parte de una secuencia más amplia de observaciones que respaldan la existencia de un retroceso sostenido en este sector. Estos resultados refuerzan la importancia de ampliar la vigilancia y el análisis en zonas del Caribe Norte que, hasta ahora, han sido menos consideradas en los estudios sobre dinámica costera del país.

5.4.2 Playa Moín (sector cercano a la terminal de contenedores)

En el sector norte de Playa Moín, próximo a la Terminal de Contenedores de Moín, se observaron desplazamientos notables de la línea de costa entre los años 2017 y 2023. Los resultados obtenidos mediante el índice NDWI permiten identificar un patrón marcado de retroceso costero, que se refleja en diferentes tramos del litoral. Este comportamiento se manifiesta mediante desplazamientos evidentes hacia el interior, lo que sugiere una pérdida significativa de superficie de playa en la zona analizada.

Para ilustrar estos resultados, se realizó una comparación visual entre las líneas de costa correspondientes a los años 2017 y 2023. Esta representación muestra de forma directa las

diferencias espaciales registradas entre ambos periodos y facilita la identificación de los puntos donde se produjeron los mayores retrocesos hacia tierra firme, constituyéndose en una herramienta clave para dimensionar la magnitud del cambio costero en este sector.



Mapa 5.6. Comparación entre las líneas de costa en playa Moín (Norte).

Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.

Las mediciones realizadas indican retrocesos de 32.1 m, 56.01 m y 47.9 m en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente. Estos valores reflejan una pérdida considerable de superficie litoral en el transcurso de seis años. La concentración de los mayores retrocesos en áreas específicas refuerza la idea de que la dinámica costera en este sector está influenciada por factores locales, incluyendo tanto procesos naturales como la presencia de infraestructura portuaria cercana.

Entre las causas que pueden explicar este comportamiento destacan la alta exposición al oleaje, la falta de barreras naturales y la construcción y operación de la Terminal de Contenedores de Moín,

que podría haber alterado el equilibrio sedimentario del sistema. Asimismo, la pendiente suave y la baja altitud de algunos tramos aumentan la susceptibilidad de la playa a los procesos erosivos, particularmente durante tormentas o marejadas.

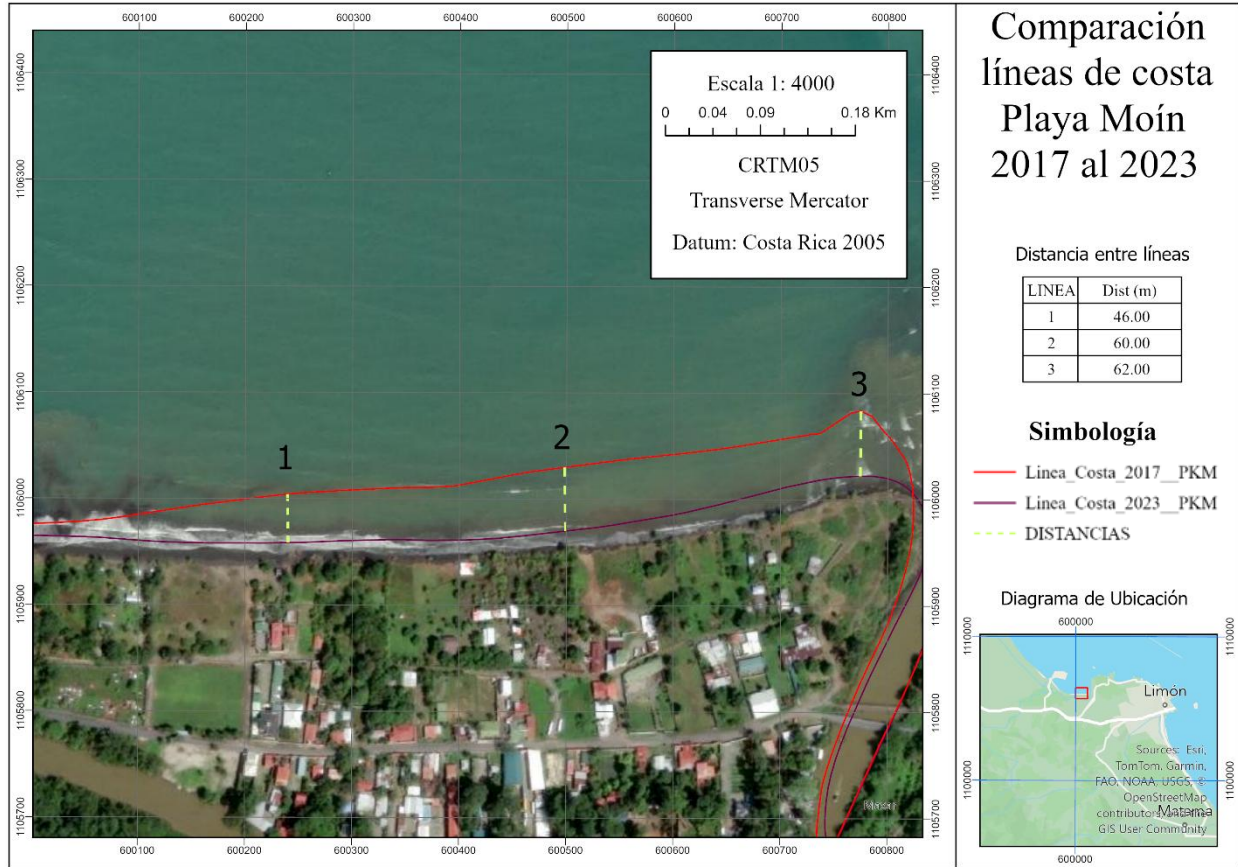
Otro aspecto relevante es la reducción progresiva de la cobertura vegetal costera, situación que debilita la capacidad de retención del sedimento y disminuye la protección natural frente al oleaje. Este elemento se vincula estrechamente con la tendencia erosiva detectada en el presente análisis, que evidencia retrocesos constantes a lo largo del periodo estudiado.

En este sentido, los resultados refuerzan la necesidad de establecer un programa de monitoreo continuo en este sector, considerando su proximidad a infraestructura portuaria de gran relevancia económica y estratégica. Aunque los valores aquí reportados no deben interpretarse como una tasa uniforme de erosión (ya que no se aplicaron correcciones por marea), sí constituyen un insumo valioso que confirma la pérdida sostenida de superficie litoral en Playa Moín Norte.

5.4.3 Playa Moín

En el sector de playa Moín se observó un desplazamiento considerable de la línea de costa entre los años 2017 y 2023. A partir de los resultados obtenidos mediante el índice NDWI, es posible identificar un patrón de retroceso costero en distintos tramos del litoral. Este comportamiento se manifiesta a través de desplazamientos evidentes hacia el interior, lo que sugiere una pérdida progresiva de superficie litoral en ciertos puntos del sector analizado.

Para ilustrar estos resultados, se generó una comparación visual entre las líneas de costa correspondientes a los años 2017 y 2023. Esta representación permite observar de forma directa las diferencias espaciales detectadas entre ambos periodos y facilita la identificación de los tramos donde se registraron los mayores desplazamientos hacia tierra firme, sirviendo como una herramienta clave para interpretar visualmente la magnitud del cambio en esta playa.



Mapa 5.7. Comparación entre las líneas de costa en playa Moín.

Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS Pro.

Los datos evidencian un retroceso costero máximo de 62 metros en el tramo más afectado, así como desplazamientos adicionales de 60 m y 46 m en zonas contiguas. Estos valores reflejan una pérdida significativa de superficie litoral a lo largo del periodo de análisis. La concentración de estos retrocesos en áreas específicas sugiere una dinámica costera activa, posiblemente vinculada a procesos naturales y condiciones locales particulares.

Este comportamiento coincide con lo documentado por [Barrantes et al. \(2021\)](#), quienes identifican a Moín como una de las playas catalogadas como críticas debido a los procesos erosivos observados en la zona. En su estudio, se reportan sectores del litoral con retrocesos marcados, visibles a través de líneas de costa históricas e imágenes satelitales, y se menciona explícitamente que estos cambios han afectado infraestructuras cercanas como caminos y edificaciones.

Los autores del estudio atribuyen esta situación a una combinación de factores tanto naturales como antrópicos. Entre las causas mencionadas destacan la alta exposición al oleaje, la escasa presencia de barreras naturales y la existencia de infraestructura portuaria cercana, que podría haber modificado el equilibrio sedimentario del sistema. Además, se señala que algunos tramos del litoral de Moín presentan una pendiente suave y baja altitud, lo que aumenta su susceptibilidad ante eventos extremos o fluctuaciones del nivel del mar.

Otro aspecto relevante identificado en el estudio de [Barrantes et al. \(2021\)](#), es la progresiva disminución de vegetación costera en sectores puntuales de Moín, situación que podría estar relacionada con el retroceso observado. La pérdida de cobertura vegetal no solo debilita la retención natural del sedimento, sino que también reduce la capacidad de la costa para absorber energía de las olas, incrementando su vulnerabilidad.

Al contrastar esos antecedentes con los resultados obtenidos en este análisis, se refuerza la necesidad de realizar un monitoreo continuo de este sector. Aunque los periodos de estudio no son idénticos y los métodos de medición son distintos, ambos trabajos permiten identificar una misma tendencia general de retroceso costero en Moín. En consecuencia, se hace evidente que este sector representa una zona de atención prioritaria para futuros estudios o posibles acciones de gestión.

Es importante destacar que los desplazamientos aquí reportados no deben interpretarse como una tasa constante de erosión, ya que no se realizó un análisis multianual con intervalos regulares ni se aplicaron correcciones por marea o energía del oleaje. Sin embargo, la diferencia espacial entre ambas líneas aporta una primera aproximación que puede servir de base para investigaciones más detalladas o de mayor escala temporal.

5.4.4 Playa Cieneguita

En esta sección se analizan los cambios espaciales de la línea de costa en Playa Cieneguita, ubicada en la zona urbana de Limón. Este sector presenta una alta relevancia debido a que se encuentra en contacto directo con áreas pobladas y edificaciones residenciales, lo cual hace que los procesos de erosión costera tengan un impacto potencialmente mayor sobre la comunidad local.

El Mapa 5.12 se muestra la comparación entre las líneas de costa correspondientes a los años 2017 y 2023. Se observa un retroceso constante del frente costero, evidenciado por la separación de las líneas a lo largo de la playa. A diferencia de otras zonas menos intervenidas, en este caso la dinámica erosiva se presenta de manera clara y relativamente homogénea en los tramos analizados.



**Mapa 5.8. Comparación líneas de costa en en Playa Cieneguita.
Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.**

Las mediciones realizadas en dos puntos de referencia indican un retroceso de 32.38 m (punto 1) y 33.42 m (punto 2) en un periodo de seis años. Estos valores reflejan un proceso erosivo sostenido, con implicaciones directas sobre la disponibilidad de espacio de playa y la protección natural que esta franja brinda a la infraestructura colindante.

Un aspecto de especial importancia es la proximidad de la línea de costa a zonas residenciales y calles principales. La erosión detectada representa un riesgo no solo para el ecosistema marino-terrestre, sino también para la seguridad y calidad de vida de los habitantes de Cieneguita. La pérdida progresiva de playa reduce la capacidad de amortiguamiento frente a oleajes y tormentas,

umentando la vulnerabilidad de la población y generando la necesidad de considerar medidas de gestión costera y adaptación.

Aunque el análisis se centró únicamente en dos fechas (2017 y 2023), los resultados muestran cambios importantes en un lapso de seis años. Esto subraya la necesidad de realizar monitoreos más frecuentes que permitan entender mejor la evolución de esta zona, especialmente considerando su relevancia tanto natural como social.

5.4.5 Aeropuerto de Limón

El litoral del Caribe costarricense ha sido objeto de múltiples investigaciones que han documentado patrones consistentes de erosión costera en sectores como Moín, Gandoca, Manzanillo y el Aeropuerto Internacional Pablo Presbere de Limón. En todos estos lugares, los hallazgos han mostrado retrocesos significativos en la línea de costa, asociados a dinámicas complejas entre factores naturales y antrópicos. No obstante, la proximidad del aeropuerto a la franja costera convierte a este sector en un punto de especial interés, ya que los procesos erosivos no solo representan una amenaza ambiental, sino que también pueden tener repercusiones directas sobre infraestructura crítica y la seguridad operacional de la terminal aérea.

En el siguiente Mapa se presenta una comparación entre las líneas de costa correspondientes a los años 2017 y 2023 en el área cercana al aeropuerto. Este análisis permite visualizar los cambios ocurridos en un periodo de seis años, y se apoya en mediciones de distancia tomadas en dos puntos representativos del tramo costero analizado.



Mapa 5.9. Comparación líneas de costa de los años 2017 y 2023 en el Aeropuerto de Limón.

Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.

Los resultados obtenidos evidencian desplazamientos de la línea de costa en sentido tierra adentro, con distancias de 6.12 m y 15.9 m en los puntos 1 y 2 respectivamente. Estos valores reflejan un retroceso costero moderado en comparación con otros sectores evaluados, pero adquieren especial relevancia por la cercanía inmediata de la franja de arena con la pista de aterrizaje. Este hallazgo sugiere que, aunque la magnitud de los cambios es menor, el riesgo potencial para la infraestructura aeroportuaria aumenta conforme se mantiene la tendencia erosiva en el tiempo.

Lo observado en el Aeropuerto de Limón resulta particularmente relevante, ya que valida la hipótesis de que los cambios en la línea de costa no solo afectan comunidades costeras o playas de uso turístico, sino también sectores con infraestructura crítica. Este hallazgo amplía la comprensión territorial del fenómeno y permite establecer paralelismos con los comportamientos documentados en zonas como Moín o Gandoca, aunque con una dimensión adicional vinculada a la seguridad operacional del aeropuerto.

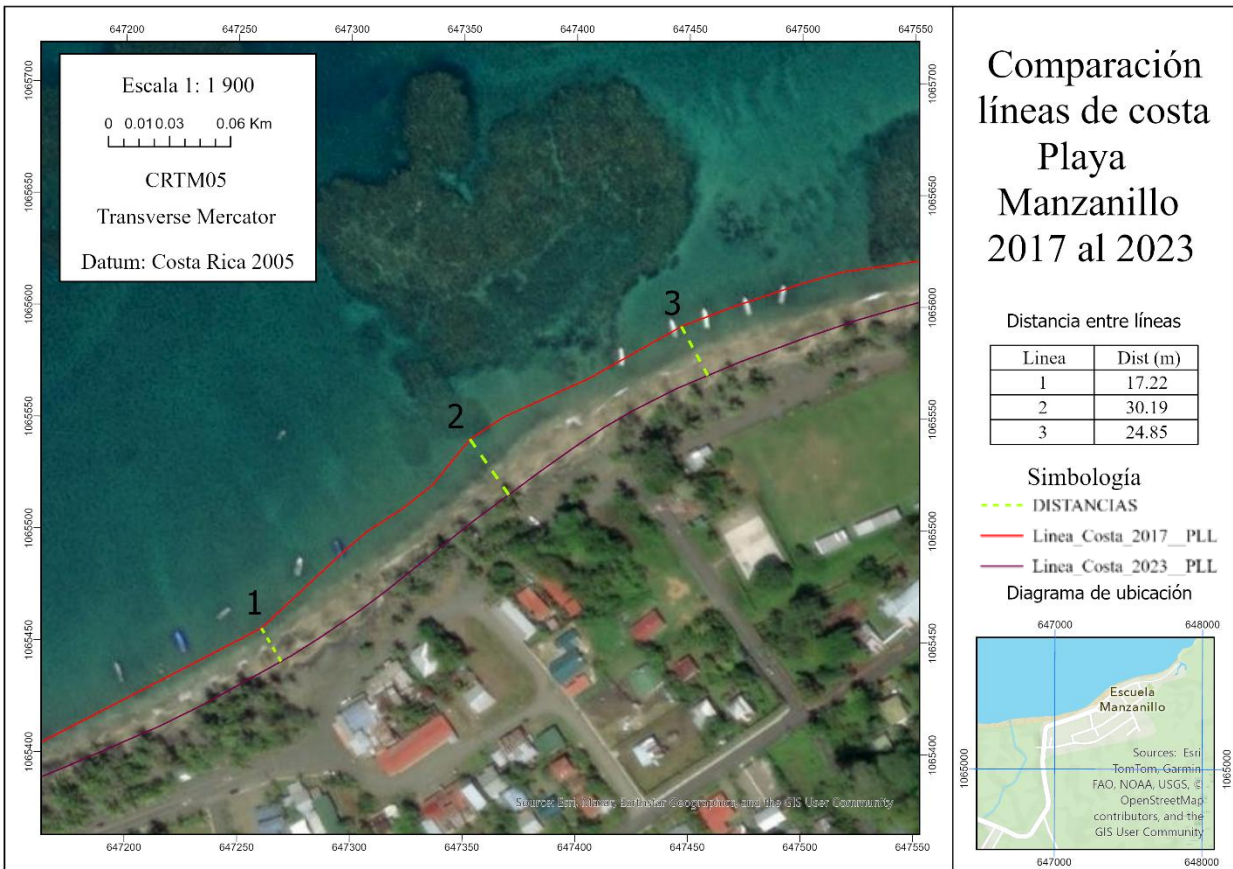
Además, los resultados confirman que los procesos de erosión no responden a una dinámica homogénea a lo largo del litoral costarricense, sino que presentan variaciones importantes tanto espaciales como temporales. A pesar de que no se dispone de estudios previos específicos sobre el impacto de la erosión en el Aeropuerto de Limón, los desplazamientos identificados en este análisis refuerzan la necesidad de considerar este sector dentro de futuras iniciativas de monitoreo, planificación territorial y conservación ambiental, con un enfoque preventivo.

Así mismo, si bien en esta sección se destacó la comparación directa entre los años 2017 y 2023, es importante señalar que el presente trabajo cuenta con información multitemporal que permitió trazar líneas de costa para todos los años del periodo 2017–2023. Por ello, los valores aquí reportados no deben entenderse como eventos aislados, sino como parte de una secuencia más amplia de observaciones que respaldan la existencia de un retroceso sostenido en este sector. Estos resultados refuerzan la importancia de ampliar la vigilancia y el análisis en zonas con infraestructura crítica, como el Aeropuerto de Limón, que hasta ahora han sido poco consideradas en los estudios sobre dinámica costera del país.

5.4.6 Playa Manzanillo

Se analizaron los cambios espaciales de la línea de costa en Playa Manzanillo, en la provincia de Limón, mediante la comparación de los años 2017 y 2023. Para ello, se utilizaron los polígonos generados en GEE, posteriormente suavizados en ArcGIS Pro, que permiten visualizar las variaciones tanto en sentido de avance (acreción) como de retroceso (erosión) de la línea de costa.

En el Mapa 5.5 se presentan las líneas de costa obtenidas para los años 2017 al 2023 en Playa Manzanillo. Esta vista general muestra la progresión temporal de la línea costera y permite identificar tanto sectores de relativa estabilidad como áreas donde se observan variaciones más notorias.



Mapa 5.11. Comparación entre líneas de costa Playa Mazanillo 2017 al 2023.

Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.

Los resultados muestran un retroceso progresivo en los tres puntos medidos, lo que confirma un proceso erosivo sostenido en este sector del Caribe costarricense. La magnitud de las distancias, aunque menores en comparación con otras zonas más expuestas, resulta significativa en el contexto local al evidenciar una pérdida de terreno en un periodo relativamente corto de seis años.

Es importante destacar que la erosión observada en Playa Manzanillo ocurre en un sector con presencia de viviendas, infraestructura turística y espacios de uso comunitario. Esta situación incrementa la vulnerabilidad social y económica de la zona, ya que la pérdida de playa no solo implica una reducción del espacio natural, sino que también amenaza las edificaciones y actividades que dependen directamente de este entorno costero.

Estas variaciones observadas en Playa Manzanillo evidencian que, incluso dentro de un mismo tramo costero, la dinámica litoral no se manifiesta de manera uniforme. Mientras que en algunos puntos la línea de costa muestra retrocesos significativos hacia tierra firme, en otros sectores el desplazamiento es menos notorio, lo que refleja la complejidad de los procesos que actúan sobre este entorno. Esta heterogeneidad resalta que los factores que influyen en la configuración de la línea costera, como el oleaje, la sedimentación o la intervención antrópica, no operan de forma homogénea a lo largo del espacio analizado.

Si bien este análisis se centra en la comparación de dos momentos puntuales (2017 y 2023), los resultados muestran que existen transformaciones espaciales significativas en un periodo de seis años. Estos cambios podrían estar influenciados por factores múltiples como la marea, la dinámica del oleaje, la intervención antrópica o eventos meteorológicos, los cuales no se abordaron de forma detallada en el presente trabajo, pero sí podrían ser explorados en futuras investigaciones.

5.4.7 Playa Gandoca

En el análisis realizado para el sector de playa Gandoca se identificó un desplazamiento notorio de la línea de costa entre los años 2018 y 2019. A partir de los resultados generados en este trabajo, se observaron diferencias espaciales que sugieren un proceso activo de retroceso del litoral en este tramo del Caribe Sur. Este comportamiento se presenta en una zona caracterizada por su bajo nivel de intervención humana, lo cual refuerza la hipótesis de que dicho cambio responde principalmente a condiciones naturales propias del entorno costero.

El siguiente Mapa muestra la comparación directa entre las líneas de costa correspondientes a ambos años. Esta representación permite visualizar el patrón de desplazamiento hacia tierra firme registrado durante el periodo de análisis.



Mapa 5.12. Comparación entre las líneas de costa de los años 2018 y 2019 en playa Gandoca.

Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGis Pro.

De acuerdo con las mediciones realizadas, el retroceso máximo entre ambas líneas alcanzó los 19 metros en el punto más afectado. Aunque el intervalo temporal cubre apenas un año, los resultados obtenidos permiten identificar un cambio espacial significativo en este sector. Estos desplazamientos no se encuentran distribuidos de manera uniforme, sino que tienden a concentrarse en puntos específicos, lo cual podría estar relacionado con la configuración topográfica del sitio, la orientación del litoral y la exposición al oleaje predominante.

Uno de los aspectos más relevantes identificados en este análisis es el retroceso evidente de la línea de costa en playa Gandoca entre los años 2018 y 2019, lo cual coincide con lo reportado en el estudio de [Barrantes & Sandoval \(2020\)](#), en el que se documentan procesos de erosión progresiva en playa Gandoca mediante un enfoque participativo con actores locales. En ese trabajo se recogen observaciones directas de residentes y personas capacitadas, quienes reportan una disminución evidente del ancho de playa y pérdida de vegetación costera en distintos tramos de esta zona protegida.

Uno de los puntos mencionados en ese estudio es que, debido a la ausencia de obras de infraestructura que puedan modificar la dinámica costera, los procesos de erosión observados se asocian principalmente a factores naturales. Entre estos pueden destacar la intensidad del oleaje, la frecuencia de tormentas, y las variaciones estacionales en la marea y el nivel del mar. Esta caracterización coincide con las condiciones actuales del sector analizado en el presente trabajo, donde no se identificaron elementos antrópicos que puedan haber inducido directamente el retroceso observado.

Así mismo, es importante mencionar que los valores reportados en este análisis corresponden a un periodo limitado, por lo que no deben interpretarse como una tendencia permanente. No obstante, sí permiten establecer una línea base sobre la cual podrían realizarse futuras investigaciones de carácter multitemporal, o bien acciones de monitoreo participativo similares a las implementadas por [Barrantes & Sandoval \(2020\)](#), como parte de estrategias integradas de conservación y gestión costera.

Capítulo 6: Conclusiones

1. A lo largo del proyecto, se evidenció que GEE permitió realizar un análisis multitemporal de la línea de costa de manera más ágil y menos demandante en recursos que otras metodologías tradicionales, como los levantamientos topográficos periódicos en campo. Esta plataforma facilitó la comparación entre años, automatizando procesos que de forma convencional habrían requerido mayor tiempo y esfuerzo.
2. Si bien el método NDWI + Otsu automatiza el proceso de delimitación de cuerpos de agua, los resultados no siempre fueron adecuados. En algunas zonas específicas, la clasificación resultó inexacta, generando líneas de costa distorsionadas o que no correspondían con la realidad. Por ello, fue necesario revisar manualmente los resultados y, en algunos casos, realizar correcciones visuales para ajustar las líneas extraídas.
3. Una limitación importante fue la imposibilidad de aplicar una corrección mareográfica en el proceso. Debido a la falta de información precisa sobre el nivel del mar al momento exacto de cada imagen, se optó por seleccionar imágenes capturadas durante la marea baja. No obstante, esta estrategia no garantiza una estandarización total, y se reconoce que los resultados podrían haberse mejorado si se hubiese contado con los datos requeridos para realizar una corrección de mareas más rigurosa.
4. La calidad del análisis dependió de la disponibilidad de imágenes satelitales sin nubosidad. En varias ocasiones fue difícil encontrar imágenes completamente despejadas para todos los años y zonas, lo que resalta la dependencia del estudio hacia las condiciones atmosféricas en el momento de la adquisición de las imágenes.
5. Se constató que el uso del índice NDWI resulta más adecuado que el NDVI para efectos de delimitación de línea de costa. Aunque ambos índices pueden diferenciar agua y vegetación, el NDWI mostró coherencia con los patrones observados en las imágenes satelitales, simplificando la interpretación y extracción de las líneas.

-
6. El análisis de zonas extensas, como toda la costa del Caribe costarricense, implica desafíos técnicos y logísticos significativos. A pesar de la capacidad de procesamiento en GEE, manejar y validar tantos sectores requiere más tiempo y esfuerzo. Se considera que este tipo de análisis es confiable cuando se realiza por zonas reducidas o sectores prioritarios.
 7. La metodología aplicada fue útil para detectar desplazamientos en la línea de costa que sugieren posibles procesos de erosión o acreción. Aunque no se puede afirmar con total certeza la causa exacta de dichos cambios, la comparación de los resultados obtenidos con estudios previos en zonas como Moín y Gandoca permitió validar los hallazgos de este proyecto.
 8. La precisión de los resultados también se vio limitada por la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 (10 m), lo cual dificulta captar pequeños detalles morfológicos de la línea costera. En sectores con estrechas franjas de playa o presencia de esteros, este nivel de detalle puede no ser suficiente para representar fielmente los cambios.
 9. La plataforma GEE, aunque es útil para automatizar análisis a gran escala, requiere una validación cuidadosa en zonas donde los resultados puedan estar distorsionados por ruido espectral, objetos flotantes, cambios de pendiente o condiciones climáticas particulares.
 10. Se reconoce que el uso de imágenes Sentinel-2 implica una limitación temporal importante, ya que su disponibilidad inicia en 2017, por lo que no fue posible extender el análisis hacia años anteriores. Este aspecto condicionó el periodo de estudio del presente trabajo, y limita su aplicación para estudios históricos más amplios.
 11. Sectores como Playa Moín, Playa Gandoca y Punta Castilla presentaron desplazamientos notorios en la línea de costa entre los años 2017 y 2023. Estas variaciones espaciales, aunque no pueden atribuirse con certeza a causas específicas, muestran una dinámica activa que podría estar asociada a procesos naturales y climáticos. Los resultados obtenidos coinciden con estudios anteriores, lo que refuerza su validez.
 12. En sitios como la desembocadura del río Parismina se identificaron cambios morfológicos relevantes en la línea costera, como reconfiguraciones del cauce o desplazamientos laterales.
-

Estas observaciones permiten señalar que este tipo de sectores presentan una dinámica más compleja, posiblemente influenciada por factores hidrosedimentológicos, lo cual sugiere la necesidad de abordajes específicos en futuros estudios.

13. El trabajo incluyó sectores del litoral Caribe costarricense que no habían sido abordados en investigaciones anteriores. Esto permitió generar información nueva para áreas con escasa documentación previa, lo que representa una contribución significativa al conocimiento sobre la evolución costera en el país, y brinda una base útil para futuras investigaciones o acciones de gestión.
14. La comparación entre las líneas de costa reveló comportamientos contrastantes entre sectores, incluso dentro de una misma zona. Esta heterogeneidad resalta la importancia de establecer mecanismos de seguimiento periódico que permitan actualizar la información y detectar a tiempo posibles riesgos asociados a la erosión costera.

Capítulo 7: Recomendaciones

1. Para futuros trabajos, se recomienda implementar algún modelo de corrección de mareas, ya que esto permitiría mejorar la coherencia temporal de los resultados y reducir el sesgo introducido por las variaciones naturales del nivel del mar.
2. Es aconsejable trabajar en zonas pequeñas o focalizadas, especialmente si se busca obtener resultados con mayor resolución espacial y control. El análisis a escala regional puede ser útil para una visión general, pero requiere esfuerzo adicional para asegurar su resolución espacial.
3. En la medida de lo posible, se recomienda utilizar imágenes satelitales capturadas durante marea baja y en condiciones atmosféricas óptimas (sin nubes, ni sombras). Para zonas con nubosidad frecuente, puede considerarse el uso de composiciones multitemporales o sensores alternativos.
4. Al utilizar el método de clasificación NDWI + Otsu, es importante no asumir que todos los resultados serán automáticamente precisos. Se sugiere incorporar una etapa de validación visual y, si es necesario, hacer correcciones manuales en las líneas extraídas para garantizar la fidelidad del análisis.
5. Para estudios más detallados o donde se requiera mayor resolución espacial, podría considerarse el uso de imágenes de mayor detalle, como las proporcionadas por sensores comerciales o drones, en combinación con Sentinel-2.
6. Es recomendable documentar y estructurar bien el flujo de trabajo en GEE, de modo que el análisis pueda replicarse fácilmente en otras regiones o años. Esto incluye el uso de scripts organizados, anotaciones en el código y almacenamiento ordenado de los resultados.

7. Dada la variabilidad natural de las zonas costeras, se aconseja complementar el análisis con información secundaria como mapas históricos, visitas de campo o entrevistas locales cuando sea posible, especialmente en zonas críticas o de alto interés.
8. En proyectos donde se pretenda comparar los resultados con otros estudios, es importante asegurar que las metodologías sean comparables. Si existen diferencias significativas en resolución, fechas, o criterios de clasificación, se deben señalar claramente en el análisis.
9. Se sugiere integrar los resultados en SIG para su visualización, análisis espacial y generación de productos cartográficos de forma más robusta. Esta integración facilita la comunicación de los resultados a públicos técnicos y no técnicos.
10. Se recomienda seguir explorando el potencial de otras herramientas de teledetección y análisis, como el uso de GEE con otros índices espectrales, o el aprovechamiento de *machine learning* para automatizar aún el proceso de clasificación y detección de patrones.

Referencias

- Axessnet. (2023). **Las imágenes satelitales y sus aplicaciones en la vida cotidiana.** <https://axessnet.com/las-imagenes-satelitales-y-sus-aplicaciones-en-la-vida-cotidiana/>
- Achmad, A., Zainuddin, Z., & Muftiadi, M. (2019). **The relationship between land surface temperature and water index in the urban area of a tropical city.** IOP conference series, 365(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/365/1/012013>
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1977). **Ley sobre la Zona Marítimo Terrestre (Ley No. 6043).** Recuperado de PGR – Sistema costarricense de información jurídica: https://pgrweb.go.cr/scij/busqueda/normativa/normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=32006
- Barrantes, G., Valverde, J., Paniagua, D., Ávila, A., Mena, P., & Arroyo, M. (2023). **Erosión costera, geodinámica regional y gobernanza para la gestión del riesgo socioambiental en el Caribe Sur de Costa Rica.** <http://www.escueladeplanificacion.una.ac.cr/index.php/proyectos-pps/39-proyecto-erosion-costera-geodinamica-regional-y-gobernanza>
- Barrantes, G., & Sandoval, L. (2021). **Cambios en la línea de costa en el Caribe Sur de Costa Rica durante el periodo 2005-2016.** Revista de Ciencias Ambientales, 55(2), 105-134. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.6>
- Barrantes, G., Arozarena, I., Sandoval, L., & Valverde, J. (2020). **Playas críticas por erosión costera en el caribe sur de Costa Rica, durante el periodo 2005-2016.** Revista Geográfica de América Central, (64), 75-102. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.64-1.4>
- Bella, C., Fischer, M., & Mari, N. (2008). **Teledetección satelital y fuego en áreas naturales.** Revista Ciencia hoy, (18), 1-8. ISSN 0327-1218
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). **Shoreline definition and detection: A review.** Journal of Coastal Research, 21(4), 688–703. https://doi.org/10.2112/03_0071.1
- CloudFerro. (2023). **Analyzing and monitoring floods using Python and Sentinel-2 satellite imagery on CREODIAS.** CREODIAS Documentation. <https://creodias.docs.cloudferro.com/en/latest/cuttingedge/Analyzing-and-monitoring-floods-using-Python-and-Sentinel-2-satellite-imagery-on-Creodias.html>

- Copernicus. (2023a). **Copernicus en pocas palabras**. <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/copernicus-en-pocas-palabras>
- Copernicus. (2023b). **Sobre Copernicus**. <https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus>
- Christofi, D., Mettas, C., Evagorou, E., Gitas, I., & Polychronaki, A. (2025). **A review of open remote sensing data with GIS, AI, and UAV support for shoreline detection and coastal erosion monitoring**. Applied Sciences, 15(9), 4771. <https://doi.org/10.3390/app15094771>
- Ding, Y., Yang, X., Jin, H., Wang, Z., Liu, Y., Liu, B., Zhang, J., Liu, X., Gao, K., & Meng, D. (2021). **Monitoring coastline changes of the Malay Islands based on Google Earth Engine and dense time-series remote sensing images**. Remote Sensing, 13(19), 3842. <https://doi.org/10.3390/rs13193842>
- Earthdata. (2023a). **Passive Sensors**. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/passive-sensors>
- Earthdata. (2023b). **Active Sensors**. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/active-sensors>
- EOS Data Analytics. (2021). **Sentinel-2: Satellite Imagery, Overview, And Characteristics**. <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>
- EOS Data Analytics. (2023). **NDWI: Fórmula del índice e interpretación de valores**. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
- Estado de Veracruz, G. (2021). **Erosión/ Sedimentación de las Zonas Costeras**. <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/programa-especial-ante-la-temporada-de-lluvias-y-ciclones-tropicales/>
- GEO University. (s. f.). **Spectral indices with multispectral satellite data**. Recuperado el 19 de julio de 2025, de <https://www.geo.university/pages/spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>
- Geosolutions Consulting. (2023). **Conceptos básicos sobre imágenes satelitales**. <https://www.geosolutionsconsulting.com/conceptos-basicos-de-las-imagenes-satelitales/>

-
- Gómez, M. (2004). **Índice de Vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales.** (Tesis), Universidad de Piura, Perú.
<https://hdl.handle.net/11042/1182>
 - González, C. (2013). **Situación de las áreas marino-costeras en Costa Rica.** Revista Mensual sobre la Actualidad Ambientales, (4), 27-31. ISSN 1409-214X
 - Google Earth Engine. (2023). **Otsu's Method for Image Segmentation.** Medium.
<https://medium.com/google-earth/otsus-method-for-image-segmentation-f5c48f405e>
 - Haddow, G.; Bullock, J. & Coppola, D. (2017). **Natural and technological hazards and risk assessment. In Introduction to emergency management (6 edition).** Oxford, 33-84
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817139-4.00002-6>
 - Islam, T. & Ryan, J. (2016). Hazard identification - Natural Hazards. In: Haddow, G., Bullock, J. & Coppola, D. (Ed.). Hazard mitigation in emergency management. (pp. 129-170). Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0-12-420134-7
 - Kaliraj, S., Chandrasekar, N. & Magesh, N. (2013). **Evaluation of coastal erosion and accretion processes along the southwest coast of Kanyakumari, Tamil Nadu using geospatial techniques.** Arabian Journal of Geosciences, 8, 239-253.
<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1216-7>
 - Kumar, L., & Mutanga, O. (2018). **Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and potential.** Remote Sensing, 10(10), 1509.
<https://doi.org/10.3390/rs10101509>
 - López, P. (2012). **Tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para una zona del centro de México.** (Tesis Licenciatura), Universidad Autónoma de Querétaro, México. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/5015>
 - Marius, L. (2024). **Satellite remote sensing for monitoring coastal erosion and sea level rise.** Journal of Marine Science Research & Development, 14(3), 451.
 - Moreno, R., Devis, A., Kintz, C., & Rojas, Z. (2013). **El océano maravilla terrestre.** Editorial Comisión Colombiana del Océano. ISBN: 978-958-99695-9-5.
 - Moore, R., & Hansen, M. (2011). **Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis.** AGU Fall Meeting Abstracts. IN43C-02).
-

-
- Ortiz, L., Arceo, P., Granados, A., Salas, D., & Jiménez, M. (2010). **Zona costera**. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/9651/05COSTASB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 - Otsu, N. (1979). **A threshold selection method from gray-level histograms**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
 - Pajak, M. J., & Leatherman, S. P. (2002). **The high water line as shoreline indicator**. Journal of Coastal Research, 18(2), 329–337. ISSN 0749-0208
 - Pérez, P. Rosario, L. (2019). “**ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) EN EL DISTRITO DE PUQUINA, MOQUEGUA**”. (Trabajo de suficiencia profesional), Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Perú. <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/144>
 - Romero, F. S. (2016). **La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental**. Revista AquaTIC.(24), 13-41. <http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/212>
 - Sánchez, A.; & Arguijo, S. (2018). **Análisis de imágenes multiespectrales para la detección de cultivos y detección de plagas y enfermedades en la producción de café**. Research in Computing Science, 147(7), 309-317. ISSN 1870-4069
 - Sentinel Online. (2023). **Spectral Resolution**. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spectral?p_1_back_url=%2Fweb%2Fsentinel%2Fsearch%3Fq%3Dpectral%2Bchannels
 - U.S. Army Engineer Institute for Water Resources. (2011). **Coastal Storm Risk Management: National Economic Development Manual**. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/44802>
 - Veneros, J.; García, L.; Morales, E.; Gómez, V.; Torres, M.; & López-Morales, F. (2020). **Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua**. Idesia (Arica), 38(4), 99-107. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
 - Vos, K.; Splinter, K.; Harley, M.; Simmons, J.; & Turner, I. (2019). **CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available**
-

satellite imagery. Environmental Modelling & Software, 122, 104528.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>

- Xu, H. (2006). **Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

Anexos

Anexo 1. Script utilizado para buscar imágenes satelitales

```
// Lista de fechas
var fechas = ee.List([
  '2024-03-30'
]);

var tile = '17PKN';

// Parámetros visuales para RGB
var visParams = {
  bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
  min: 0,
  max: 3000,
  gamma: 1.3
};

// Crear lista para tabla final
var tablaFinal = ee.FeatureCollection([]);

// Recorrer fechas con client-side loop para agregar visualización
fechas.getInfo().forEach(function(fechaStr) {
  var fecha = ee.Date(fechaStr);
  var fechaFin = fecha.advance(1, 'day');

  var coleccion = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
    .filterDate(fecha, fechaFin)
    .filter(ee.Filter.eq('MGRS_TILE', tile))
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 100));

  var lista = coleccion.toList(coleccion.size());

  // Mostrar cada imagen satelital de la fecha
  var size = lista.size().getInfo();
  for (var i = 0; i < size; i++) {
    var img = ee.Image(lista.get(i));
    var id = img.id().getInfo();
    Map.addLayer(img, visParams, id);
    Map.centerObject(img, 9);

    // Crear y acumular metadatos como tabla
    var feature = ee.Feature(null, {
      'ID': id,
      'Fecha': ee.Date(img.get('system:time_start')).format('YYYY-MM-dd'),
      'Hora Zulu': ee.Date(img.get('system:time_start')).format('HH:mm:ss'),
      'Hora local (CR)': ee.Date(img.get('system:time_start')).advance(-6,
        'hour').format('HH:mm:ss'),
      'Nubes (%)': ee.Number(img.get('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE')),
      'Tile': img.get('MGRS_TILE')
    });
    tablaFinal = tablaFinal.merge(ee.FeatureCollection([feature]));
  }
});

// Mostrar tabla final en consola
print('Tabla de imágenes mostradas:', tablaFinal);

// Exportar tabla a Drive
Export.table.toDrive({
  collection: tablaFinal,
  description: 'Sentinel2_Visualizadas_T17PKM',
  fileFormat: 'CSV'
});
```

Anexo 2. Script utilizado para la obtención de la línea de costa

```

// Diccionario con ID de imagen y su polígono correspondiente
var imagenes = [
  {
    id: 'COPERNICUS/S2/20170126T160501_20170126T160504_T17PKM',
    poligono: PKM
  },
  {
    id: 'COPERNICUS/S2/20170126T160501_20170126T160504_T17PKN',
    poligono: PKN
  },
  {
    id: 'COPERNICUS/S2/20170126T160501_20170126T160504_T17PKL',
    poligono: PKL
  },
  {
    id: 'COPERNICUS/S2/20170126T160501_20170126T160504_T17PLL',
    poligono: PLL
  }
];

// Función que ejecuta todo el análisis para cada imagen y su polígono
imagenes.forEach(function(info) {
  var imagen = ee.Image(info.id);
  var poligono = info.poligono;

  // Mostrar metadatos
  var sensingTime = ee.Date(imagen.get('system:time_start')).format('HH:mm:ss.SSS');
  var ndwiProm = ee.Algorithms.If(
    imagen.bandNames().contains('B8'),
    imagen.normalizedDifference(['B3', 'B8']).reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.mean(),
      geometry: poligono,
      scale: 30,
      bestEffort: true
    }).get('nd'),
    null
  );

  var datos = ee.Feature(null, {
    'Nombre': imagen.get('PRODUCT_ID'),
    'Fecha': imagen.date().format('YYYY-MM-dd'),
    'Hora ZULU': sensingTime,
    'Angulo Solar': imagen.get('MEAN_SOLAR_ZENITH_ANGLE'),
    'Porcentaje Nubes': imagen.get('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE'),
    'NDWI_promedio': ndwiProm
  });
  print('Metadatos - ' + info.id.split('/')[2], datos);

  // Clipping
  var clipped = imagen.clip(poligono);

  // Visualización RGB
  Map.addLayer(clipped.select(['B4','B3','B2']), {
    min: 0, max: 4000
  }, 'RGB - ' + info.id.split('/')[2], false);

  // NDWI
  var ndwi = clipped.normalizedDifference(['B3', 'B8']).rename('NDWI');
  Map.addLayer(ndwi, {min: -1, max: 1, palette: ['green','white','blue']}, 'NDWI - ' +
info.id.split('/')[2], false);

  // Umbral Otsu
  var histDict = ndwi.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.histogram(),
    geometry: poligono,
    scale: 10,
    bestEffort: true
  }).get('NDWI');

  var hist = ee.Dictionary(histDict);
  var histogram = ee.Array(hist.get('histogram'));
  var bins = ee.Array(hist.get('bucketMeans'));
  var total = histogram.reduce(ee.Reducer.sum(), [0]).get([0]);
  var sumB = histogram.multiply(bins).reduce(ee.Reducer.sum(), [0]).get([0]);

  var sumF = 0, weightB = 0, weightF = 0, meanB = 0, meanF = 0, maxVar = 0, threshold = 0;

  for (var i = 0; i < bins.length().get([0]); i++) {
    weightB = weightB.add(histogram.get([i]));
    weightF = ee.Number(total).subtract(weightB);
    if (weightB.multiply(weightF).lte(0)) continue;

```

```

    sumF = sumF.add(bins.get([i]).multiply(histogram.get([i])));
    meanB = sumB.divide(weightB);
    meanF = sumF.divide(weightF);
    var variance = weightB.multiply(weightF).multiply(meanB.subtract(meanF).pow(2));
    if (variance.gt(maxVar)) {
        maxVar = variance;
        threshold = bins.get([i]);
    }
}

print('Umbral Otsu - ' + info.id.split('/')[2], threshold);

// Clasificación Agua/Tierra
var clasif = ndwi.gt(threshold).rename('AguaTierra');
Map.addLayer(clasif, {min: 0, max: 1, palette: ['brown', 'blue']}, 'Clasificación - ' +
info.id.split('/')[2], false);

// Vectorizar agua
var waterOnly = clasif.updateMask(clasif);
var coastPolygons = waterOnly.reduceToVectors({
  geometryType: 'polygon',
  reducer: ee.Reducer.countEvery(),
  scale: 10,
  maxPixels: 1e9,
  geometry: poligono
});
Map.addLayer(coastPolygons, { color: 'yellow' }, 'Costa - ' + info.id.split('/')[2], false);

// Exportaciones
Export.image.toDrive({
  image: clipped.select(["B4", "B3", "B2"]),
  description: 'RGB_' + info.id.split('/')[2],
  scale: 10,
  region: poligono,
  maxPixels: 1e13
});

Export.image.toDrive({
  image: clasif,
  description: 'Clasificacion_' + info.id.split('/')[2],
  scale: 10,
  region: poligono,
  maxPixels: 1e13
});

Export.table.toDrive({
  collection: coastPolygons,
  description: 'Costa_Poligono_' + info.id.split('/')[2],
  fileFormat: 'SHP'
});

Export.image.toDrive({
  image: ndwi,
  description: 'NDWI_' + info.id.split('/')[2],
  scale: 10,
  region: poligono,
  maxPixels: 1e13
});

Map.centerObject(poligono, 12);
});

```

Anexo 3. Resultados obtenidos para cada año

