

INTER AMERICAN UNIVERSITY OF PUERTO RICO INC.
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN
CIENCIAS AMBIENTALES

**ESTUDIO GEOESPACIAL DE LA ACRECIÓN Y EROSIÓN COSTERA EN BAHÍA
SALINAS Y BAHÍA SUCIA UTILIZANDO DIGITAL SHORELINE ANALYSIS
SYSTEM (DSAS) Y QUANTUM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (QGIS)**

Por:

TAMARA L. RAMÍREZ PADILLA
Abril 2026

INTER AMERICAN UNIVERSITY OF PUERTO RICO INC
RECINTO DE SAN GERMAN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRIA EN CIENCIAS EN
CIENCIAS AMBIENTALES

Tesis presentada y aprobada para completar los requisitos para el grado de Maestría en Ciencias
en Ciencias Ambientales especialización en Biología Ambiental.

**ESTUDIO DE LA ACRECIÓN Y EROSIÓN COSTERA EN BAHÍA SALINAS Y BAHÍA
SUCIA UTILIZANDO DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS) Y
QUANTUM GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM (QGIS)**

Tamara L. Ramírez Padilla

Miembros del Comité Graduado:

Miguel Rodríguez Montalvo
Miguel Rodríguez Montalvo, M.S.
Director de Tesis

14/mayo/2026
Fecha

Carlos Linares Medina
Carlos Linares Medina, Ph.D.
Co-director de Tesis

14/mayo/2026
Fecha

Lucille Oliver Cebollero
Lucille Oliver Cebollero, Ph.D.
Co-directora de Tesis

14 de mayo de 20256
Fecha

Carlos Irrizarry Guzmán
Carlos Irrizarry Guzmán, DBA
Director Escuela de Estudios Graduados e Investigación

18 de mayo de 2026
Fecha

Vilma S. Martínez
Vilma S. Martínez, M.S.
Decana de Asuntos Académicos

18/mayo/2026
Fecha

DEDICATORIA

A las personas que más amo en este Universo, mi familia. En especial, a mi hijo Dylan Nicolás, para que cuando crezcas sepas que tu madre siempre luchó por proteger la naturaleza, asegurando su disfrute para las futuras generaciones. Este esfuerzo de conservación es para ustedes, quienes, de una u otra manera, me han inculcado la importancia de proteger, conservar y valorar nuestros recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Hoy y siempre, agradezco a Dios, a mi familia y a cada persona que me acompañó en este camino de arduo trabajo y aprendizaje. A mi familia, gracias por creer en mí y por motivarme día a día. Son un gran pilar en mi camino y les agradezco de todo corazón que me hayan enseñado que sin importar cuán difícil sea el camino, nunca debo dejar de luchar ni de creer en mí. A mi principal mentor y director de tesis, el Profesor Miguel Rodríguez Montalvo, quien creyó en este proyecto desde el día uno. Al Profesor Carlos Linares Medina y Profesora Lucille Oliver Cebollero, miembros de mi comité de tesis, por sus consejos, su paciencia, y por confiar y creer en mí. A cada persona que contribuyó en este esfuerzo de conservación: este logro también es de ustedes. Por último, un especial agradecimiento a mi hijo Dylan Nicolás. Gracias por ser mi mayor motivación. Espero que cuando crezcas y puedas leer esto, te sientas orgulloso de tu mamá. Recuerda, el planeta Tierra es nuestro hogar y proteger nuestros recursos naturales es nuestro deber. A todos los antes mencionados, les agradezco por su motivación, paciencia y por creer en mí desde el comienzo.

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT.....	vii
RESUMEN	viii
ACRÓNIMOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS	xiii
Capítulo I.	1
Introducción	1
1.1 Trasfondo del problema	1
1.2 Problema de estudio	2
1.3 Justificación del estudio	3
1.3.1 Importancia para la conservación y la sociedad.....	3
1.3.2 Relevancia del área de estudio.....	4
1.3.3 Impacto a la biodiversidad.....	5
Pregunta de Investigación	9
Objetivo.....	9
Objetivos generales y específicos	9
Hipótesis alterna.....	10
Hipótesis nula.....	10
Capítulo II.	11
Revisión de literatura	11
2.1 Trasfondo histórico	11
2.2 Marco teórico	12
2.2.1 Erosión y acreción costera	13
2.2.2 Cambio climático y aumento en el nivel del mar.....	14
2.2.3 Enfoque geoespacial en estudios costeros.....	19
2.2.4 Herramientas utilizadas	20
2.2.5 Posibles limitaciones del estudio.....	21
2.3 Estudios de casos.....	21
2.4 Marco legal.....	25
2.4.1 Leyes y regulaciones de Puerto Rico.....	25

2.4.2 Leyes y regulaciones federales	27
Capítulo III.....	29
Metodología.....	29
3.1 Adquisición de datos.....	29
3.2 Corrección de datos.....	35
3.3 Generación de transectos y análisis en DSAS.....	36
Capítulo IV.....	40
Análisis de Resultados.....	40
4.1 Shoreline Change Envelope (SCE).....	42
4.2 Net Shoreline Movement (NSM) y End Point Rate (EPR).....	45
4.3 Linear Regression Rate (LRR) y Weighted Linear Regression (WLR).....	52
Capítulo V.....	61
Conclusión y Recomendaciones.....	61
Referencias.....	64
Apéndice A.....	70
Apéndice B.....	73
Apéndice C.....	83

ABSTRACT

This study analyzes shoreline changes in *Bahía Salinas* and *Bahía Sucia* during the period 2010–2025, with the purpose of evaluating coastal erosion and accretion patterns in these areas of Cabo Rojo, Puerto Rico. Shoreline profiles and baselines in shapefile format were generated by the United States Geological Survey (USGS) and subsequently downloaded for processing and correction in the Quantum Geographic Information System (QGIS). Changes were then quantified using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS). This was done by applying several methods, including Shoreline Change Envelope (SCE), Net Shoreline Movement (NSM), End Point Rate (EPR), Linear Regression Rate (LRR), and Weighted Linear Regression (WLR). The results indicate that *Bahía Salinas* shows a general trend toward shoreline stability and mild accretion processes, while *Bahía Sucia* exhibits greater spatial variability with accretion and erosion processes occurring in different sections of the coast. Although the number of accretionary transects in *Bahía Sucia* was higher, the net rate of change was negative, indicating an erosive trend. This is attributed to the fact that the magnitude of erosion was greater than the recorded accretion. These findings contribute to a better understanding of coastal dynamics in southwestern Puerto Rico and provide valuable information for coastal management and monitoring on the island.

RESUMEN

Este estudio analiza los cambios en la línea de costa en Bahía Salinas y Bahía Sucia durante el período 2010-2025, con el propósito de evaluar los patrones de erosión y acreción costera en estas zonas de Cabo Rojo, Puerto Rico. Los perfiles de la línea de costa y las líneas base en formato *shapefile*, fueron generados por el *United States Geological Survey* (USGS), y posteriormente descargados para su procesamiento y corrección en *Quantum Geographic Information System* (QGIS). Posteriormente, los cambios fueron cuantificados mediante el uso del programa *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). Esto se hizo mediante la aplicación de varios métodos incluyendo *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR) y *Weighted Linear Regression* (WLR). Los resultados indican que Bahía Salinas presenta una tendencia general hacia la estabilidad del litoral costero y procesos leves de acreción, mientras que Bahía Sucia exhibe una mayor variabilidad espacial con la ocurrencia de procesos de acreción y erosión en diferentes secciones de la costa. A pesar de que el número de transectos acrecionales en Bahía Sucia fue mayor, la tasa de cambio neta resultó negativa, evidenciando una tendencia erosiva, lo cual se atribuye a que la magnitud de la erosión fue mayor que la acreción registrada. Estos hallazgos contribuyen a un mejor entendimiento de las dinámicas costeras en el suroeste de Puerto Rico y proveen información valiosa para el manejo y monitoreo de las costas en la isla.

ACRÓNIMOS

CoRePI-PR Grupo de trabajo del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto

Rico

CRNWR Cabo Rojo National Wildlife Refuge

DOI Department of the Interior

DRNA Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

DSAS Digital Shoreline Analysis System

EPR End Point Rate

GIS Geographic Information Systems

LIDAR Light Detection and Ranging

LRR Linear Regression Rate

NASA National Aeronautics and Space Administration

NDWI Normalized Difference Water Index

NIR Near Infrared

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

NSM Net Shoreline Movement

QGIS Quantum Geographic Information System

SCE Shoreline Change Envelope

USFWS U.S. Fish and Wildlife Service

USGS U.S. Geological Survey

WLR Weighed Linear Regression

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Recién nacido de carey (Eretmochelys imbricata) en la playa de Bahía Salinas, Cabo Rojo</i>	8
Figura 2. <i>Acumulación masiva de sargazo en la playa de Bahía Sucia, Cabo Rojo</i>	8
Figura 3. <i>Línea promedio actual en Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico)</i> ...	16
Figura 4. <i>Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 3 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico)</i>	17
Figura 5. <i>Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 5 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico)</i>	18
Figura 6. <i>Conversión de la capa raster del NDWI (Normalized Difference Vegetation Index) a una capa binaria para separar los cuerpos de agua y la superficie de la tierra</i>	32
Figura 7. <i>Conversión del raster del NDWI (Normalized Difference Vegetation Index) binario a polígonos de la imagen de satélite LanSat 9, del año 2022</i>	33
Figura 8. <i>Extracción del perfil de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia del año 2022</i>	34
Figura 9. <i>Perfil de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia del año 2022; extraídos utilizando el NDWI (Normalized Difference Water Index) y la conversión de capas raster a líneas</i>	35
Figura 10. <i>Ejemplo de shapefiles de perfiles de costa y línea base con transectos de medición generados por DSAS</i>	38
Figura 11. <i>Método de Shoreline Change Envelope (SCE) implementado en Bahía Salinas</i>	43
Figura 12. <i>Método de Shoreline Change Envelope (SCE) implementado en Bahía Sucia</i>	44

Figura 13. Método de Net Shoreline Movement (NSM) implementado en Bahía Salinas	46
Figura 14. Método de Net Shoreline Movement (NSM) implementado en Bahía Sucia	47
Figura 15. Método de End Point Rate (EPR) implementado en Bahía Salinas	49
Figura 16. Método de End Point Rate (EPR) implementado en Bahía Sucia	50
Figura 17. Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Salinas	53
Figura 18. Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Sucia	54
Figura 19. Método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Salinas	57
Figura 20. Método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Sucia	58
Figura A1. Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar actual.....	70
Figura A2. Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar a 3 pies.....	71
Figura A3. Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar a 5 pies.....	72
Figura B1. Captura de pantalla del resultado del cálculo del Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Salinas.....	73
Figura B2. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Sucia.....	74
Figura B3. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Salinas.....	75
Figura B4. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Sucia.....	76
Figura B5. Captura de pantalla del resultado del cálculo de End Point Rate (EPR) de Bahía Salinas.....	77

Figura B6. <i>Captura de pantalla del resultado del Método de End Point Rate (EPR)</i> <i>implementado en Bahía Sucia</i>	78
Figura B7. <i>Captura de pantalla del resultado del Método de Linear Regression Rate (LRR)</i> <i>implementado en Bahía Salinas</i>	79
Figura B8. <i>Captura de pantalla del resultado del Método de Linear Regression Rate (LRR)</i> <i>implementado en Bahía Sucia</i>	80
Figura B9. <i>Captura de pantalla del resultado del Método de Weighted Linear Regression (WLR)</i> <i>implementado en Bahía Salinas</i>	81
Figura B10. <i>Captura de pantalla del resultado del método de Weighted Linear Regression</i> <i>(WLR) implementado en Bahía Sucia</i>	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Bandas espectrales que utiliza el satélite LanSat 9 y sus aplicaciones en la observación de la superficie terrestre</i>	30
Tabla 2. <i>Medidas de distancia (m) calculadas por el programa DSAS versión 6.0 en el análisis de los perfiles de costa en Bahía Salinas y Bahía Sucia</i>	41
Tabla 3. <i>Tasas de cambio (m/año) calculadas por el programa DSAS versión 6.0 en el análisis de los perfiles de costa en Bahía Salinas y Bahía Sucia</i>	42

Capítulo I.

Introducción

1.1 Trasfondo del problema

Puerto Rico es un archipiélago situado en el Mar Caribe, compuesto por una isla principal, cuatro islas pequeñas y múltiples cayos e islotes. Sus costas se extienden de norte a sur y de oeste a este, desempeñando un papel fundamental en los ámbitos cultural, social, económico y, sobre todo, ecológico. En la isla, se pueden identificar cinco tipos de costas: playa, costas con vegetación, costas rocosas, costas armadas o antropogénicas y costas aluviales (Grupo de trabajo del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico ((CoRePI-PR), 2022).

Actualmente, el problema de la erosión costera sigue siendo una preocupación en la isla, y se continúan investigando los factores que contribuyen a este fenómeno, los cambios en la línea costera y los modelos predictivos que permiten visualizar posibles escenarios futuros. La erosión costera se define como la pérdida o desplazamiento de tierra o arena debido a la remoción prolongada de sedimentos y rocas a lo largo del litoral, causada por la acción de las olas, corrientes, mareas, vientos y marejadas ciclónicas. Las olas y las corrientes juegan un papel crucial en el transporte de sedimentos; sin embargo, debido a que la arena de la playa no siempre regresa a la costa, se produce una pérdida de hábitat y una alteración en el contenido de materia orgánica y en las fuentes de alimento para muchas especies (Colón, 2015).

La pérdida de costas puede ser ocasionada tanto por actividades antropogénicas como por fenómenos naturales, entre ellos el cambio climático y el aumento en el nivel del mar (Colón, 2015). Entre los factores antropogénicos que contribuyen a la erosión costera se encuentran la remoción de dunas, la deforestación de la vegetación costera y la construcción de infraestructuras en zonas marítimo-terrestres sin los permisos ni estudios adecuados (Minkin, 2019). Por otro

lado, los fenómenos naturales, como los huracanes y el aumento en el nivel del mar, también desempeñan un papel importante en la transformación del litoral costero. Se ha demostrado que el aumento en el nivel del mar puede provocar erosión, así como la modificación o pérdida de hábitats esenciales para especies que dependen de estos ecosistemas costeros (Murry, Colón-Merced, Colón-Rivera, Fury, García-Bermúdez, Herrera-Giraldo, Jackson Jr., Lilyestrom, Llerandi-Román, Meléndez-Ackerman, Meléndez-Oyola, Monzón-Carmona, Platenberg, Quiñones, Ruiz, Schärer-Umpierre, Stys, Swinnerton, Toledo-Soto y Vargas, 2019).

1.2 Problema de estudio

Las islas del Caribe son particularmente vulnerables a los impactos del cambio climático debido a su ubicación dentro del cinturón de huracanes en la cuenca del océano Atlántico y a la presencia de extensas zonas costeras (Soanes, Pike, Barker, Butt, John, Medcalf, Naumann, Rouse, Samuel, y Mukhida, 2023). Además, se proyecta un aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas ciclónicas como consecuencia del calentamiento global. Asimismo, se espera un incremento en el número de huracanes de gran intensidad (categorías 3, 4 y 5), lo que podría agravar los efectos de la erosión costera y la pérdida de hábitats (Runkle, Kunkel, Stevens, Champion, Easterling, Terando, Sun, Steward, Landers, y Rayne, 2022).

Desde la década de 1960, el nivel del mar ha aumentado aproximadamente 0.7 pulgadas por década en San Juan, Puerto Rico, una tasa que coincide con el promedio global de elevación del nivel del mar durante la segunda mitad del siglo XX. A nivel mundial, se proyecta un aumento del nivel del mar de entre 1 a 8 pies, y se estima que cambios similares podrían afectar a Puerto Rico y otras islas del Caribe (Runkle et al., 2022).

Estudios previos realizados por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA) y la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) indican

que Puerto Rico cuenta con aproximadamente 689 millas de costa, y el 62% de los puertorriqueños residen en municipios costeros. De esta población, un 11% vive dentro de zonas costeras altamente vulnerables a los efectos del cambio climático. Además, se estima que un aumento de sólo 3 pies en el nivel del mar podría impactar negativamente el 10% del área del pueblo de Cabo Rojo, la localidad de interés para este estudio (Estudios Técnicos Inc., 2023).

1.3 Justificación del estudio

1.3.1 Importancia para la conservación y la sociedad

El estudio de cómo se ha transformado el litoral costero en Puerto Rico es crucial para la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas costeros. Además, mediante estos estudios, se puede recopilar información valiosa para identificar posibles amenazas futuras para las costas (Minkin, 2019). Las costas puertorriqueñas son invaluable, tanto en el aspecto económico como social, ya que son hogar para miles de personas y constituyen un atractivo turístico de gran importancia.

Durante cientos de años, los cambios en el litoral costero a través del mundo han permitido a las comunidades costeras adaptarse y, en caso de ser necesario migrar (Azizan, Rahim, Adnan, Razali, Mohd, y Ariffin, 2024). En este sentido, contar con datos precisos que nos permitan entender y reconocer los cambios en el litoral costero de la isla facilitará la adaptación, preparación y mitigación frente a los impactos del cambio climático.

Además, los resultados de este estudio proporcionarán herramientas fundamentales para que las organizaciones gubernamentales y sin fines de lucro, encargadas de la conservación de los recursos naturales, puedan desarrollar planes de mitigación y protección frente al aumento del nivel del mar y el cambio climático, contribuyendo así a la resiliencia de las costas de Puerto Rico.

1.3.2 Relevancia del área de estudio

Para este estudio, las localidades de interés son Bahía Salinas y Bahía Sucia, ubicadas en el suroeste de Puerto Rico, particularmente en el municipio de Cabo Rojo. Este municipio cuenta con una extensión de aproximadamente 102.2 kilómetros de costa. Además, Cabo Rojo es uno de los municipios con mayor cantidad de playas en Puerto Rico, con un total de 186 playas (CoRePI-PR, 2022b).

Cabo Rojo alberga uno de los lugares de mayor importancia ecológica y de conservación en el Caribe: el Refugio Nacional de Vida Silvestre en Cabo Rojo (CRNWR, por sus siglas en inglés). El refugio en su totalidad es parte del Área de Importancia de Aves llamada ‘Suroeste de PR’, designación por *BirdLife International*, organización que considera estos lugares como claves para la conservación de las aves (Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS, por sus siglas en inglés), 2011).

Dentro de los límites del refugio, se encuentran las Salinas, las cuales se destacan por ser un ecosistema clave para la biodiversidad, la cultura y la economía local. En el año 1999, aproximadamente 1,249 acres de estas salinas fueron adquiridas por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos con el propósito de proteger uno de los hábitats más importantes del Caribe para las aves marinas y playeras. Las Salinas se destacan por tener un mosaico de ecosistemas tales como lagunas hipersalinas, manglares y un bosque seco subtropical (Olán Martínez, 2020b). La relevancia de este ecosistema es tan significativa que el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos designó oficialmente a las Salinas como Recurso de Categoría 1, la categoría más alta que se le puede otorgar a un humedal. Esta designación implica que las Salinas son consideradas únicas e irremplazables a nivel nacional y eco-regional. Además, el DRNA designó a las Salinas como área crítica para la vida silvestre (USFWS, 2011).

Incluso, es el primer lugar en el Caribe designado como reserva de aves playeras por la Red Hemisférica de Reservas para las Aves Playeras (Olán Martínez, 2020a). Por otro lado, tanto Bahía Salinas como Bahía Sucia poseen un alto valor cultural y económico. En las cercanías de las bahías, se encuentran veredas para el disfrute del público, un centro de visitantes y un ecosistema singular en Puerto Rico, lo que convierte toda esta área en un atractivo turístico clave para la región.

El aumento sostenido del nivel del mar y los cambios en los patrones de erosión y acreción costera están amenazando la integridad de ambas bahías, que a su vez podrían presentar una amenaza para sus proximidades. Estos fenómenos no solo ponen en riesgo la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas, sino que también impactan directamente a las comunidades aledañas.

A pesar de la importancia de ambas bahías, existen pocos estudios detallados que analicen la dinámica de sus costas en el contexto del cambio climático y las actividades antropogénicas. Por ello, esta investigación busca proporcionar datos científicos actualizados sobre los cambios en el litoral costero en Bahía Salinas y Bahía Sucia, contribuyendo así al diseño de estrategias de conservación y manejo costero para la protección de estos valiosos recursos naturales.

1.3.3 Impacto a la biodiversidad

Este estudio se enfoca en dos localidades de gran importancia para la biodiversidad: Bahía Salinas y Bahía Sucia. En sus proximidades se encuentran dos lagunas hipersalinas relevantes: Laguna Candelaria, ubicada más al oeste y cercana a Bahía Salinas, y Laguna Fraternidad, situada más al este, próxima a Bahía Sucia. Toda esta área de las Salinas es fundamental para albergar hábitats esenciales para el anidaje y descanso de aves residentes y migratorias. Durante

los meses de marzo y agosto, múltiples aves migratorias utilizan estos hábitats para completar su ciclo reproductivo.

Aves residentes tales como: Canario de mangle (*Setophaga petechia*), Juí blanco (*Elaenia martinica*), Falconcito común (*Falco sparverius*), Mariquita (*Agelaius xanthomus*), Reinita común (*Coereba flaveola*), Rolita (*Columbina passerina*), Turpial (*Icterus icterus*) y Viuda (*Himantopus mexicanus*), son algunas de las especies que se encuentran en este hábitat tan importante. Por otra parte, las Salinas de Cabo Rojo son consideradas un aeropuerto de aves, ya que múltiples especies de aves migratorias utilizan este hábitat para anidar, descansar y continuar su camino. Múltiples especies de aves playeras utilizan este hábitat, entre las que podemos mencionar: Playero guineilla mayor (*Tringa melanoleuca*), Playero guineilla menor (*Tringa flavipes*), Playero zancudo (*Calidris himantopus*), Playero gracioso (*Calidris pusilla*) y Playero menudillo (*Calidris minutilla*). Cabe destacar que las Salinas son numéricamente el área más importante para los playeros en Puerto Rico (Collazo, Harrington, Gear y Colón, 1995). Por otra parte, muchas de estas aves anidan en el suelo, por lo que la actividad antropogénica y las transformaciones en el litoral costero de Bahía Salinas y Bahía Sucia representan amenazas para estas especies. Aves como el Charrancito común (*Sternula antillarum*), el Chorlito blanco (*Charadrius nivosus*) y el Chorlito marítimo (*Charadrius wilsonia*) son ejemplos de aves que anidan en los suelos de las Salinas para completar su ciclo reproductivo. De hecho, las Salinas es el único lugar en Puerto Rico donde se ha documentado la anidación del Chorlito blanco (USFWS, 2011). Por otro lado, el aumento en el nivel del mar podría destruir el hábitat crítico para la Mariquita de Puerto Rico, una especie en peligro de extinción que está registrada en el listado federal de especies amenazadas y en peligro de extinción.

Por otra parte, desde el año 2015, Michael J. Morel, miembro del Grupo Tortugueros del Oeste, ha llevado a cabo monitoreos en diversas playas de Puerto Rico, incluyendo las ubicadas en Bahía Salinas y Bahía Sucia, con el propósito de identificar nidos de tinglar (*Dermochelys coriacea*) y carey (*Eretmochelys imbricata*), ambas especies catalogadas en peligro de extinción. Según información recopilada por Morel, en el año 2018 se documentó un nido de carey en Bahía Sucia. No obstante, en los años posteriores el monitoreo en esta área no se continuó debido a la acumulación excesiva de sargazo. Por otro lado, desde el 2015 hasta la actualidad, Morel ha logrado identificar un total de 177 nidos de carey y 3 nidos de tinglar en Bahía Salinas. Esta cifra representa aproximadamente un 23% del total de nidos de carey y tinglar registrados en el municipio de Cabo Rojo (Morel, comunicación personal). Los cambios en el litoral costero provocados por procesos de erosión podrían ocasionar la pérdida de estos hábitats de anidación, obligando a ambas especies a migrar hacia otras zonas menos afectadas, lo que pone en riesgo su éxito reproductivo y conservación a largo plazo.

Figura 1

Recién nacido de carey (Eretmochelys imbricata) en la playa de Bahía Salinas, Cabo Rojo.



Foto cortesía de Michael J. Morel.

Figura 2

Acumulación masiva de sargazo en la playa de Bahía Sucia, Cabo Rojo.



Foto cortesía de Michael J. Morel.

La flora también podría verse afectada por la transformación del litoral costero. Entre las especies de flora que podemos encontrar en este ecosistema se encuentran las plantas suculentas, árboles y gramíneas nativos. Además, podemos encontrar los bosques de mangles, los cuales son esenciales para la protección de la costa en contra de la acción de las olas, las mareas y las marejadas ciclónicas. Además, producen materia orgánica, ayudan a capturar carbono atmosférico, producen oxígeno y son hábitat para una gran variedad de especies marinas y aves costeras. Los cuatro tipos de mangles conocidos en Puerto Rico (rojo, negro, blanco y botón) pueden ser identificados en este ecosistema. La intrusión de agua del mar a causa de la erosión del litoral costero podría causar condiciones de hipersalinidad en los suelos, lo que a su vez se relaciona con la mortalidad en bosques de mangles (García, Rivera y Marrero, 2020).

Pregunta de Investigación

¿Se evidenciarán procesos de erosión y acreción costera que hayan generado cambios en la línea de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia en el periodo de 2010 a 2025?

Objetivo

El objetivo de esta investigación es recopilar y analizar información sobre los cambios en la línea de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia en los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025, utilizando los programas DSAS y QGIS. El propósito es compartir los resultados con la comunidad científica y los ciudadanos, con el fin de establecer estrategias y planes que ayuden a mitigar los impactos del cambio climático y el aumento del nivel del mar.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general: Evaluar los cambios en las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia en el municipio de Cabo Rojo en los últimos quince años.

Objetivos específicos:

1. Identificar y analizar acreción o erosión costera en Bahía Salinas y Bahía Sucia en los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025 utilizando Digital Shoreline Analysis System (DSAS) y Quantum Geographic Information System (QGIS).
2. Describir cómo la pérdida de costa podría afectar la biodiversidad nativa y endémica, así como la economía local y las comunidades aledañas a la costa.
3. Proponer recomendaciones para futuros estudios y estrategias de conservación adecuadas para las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia, con el fin de mitigar los impactos del aumento del nivel del mar, los huracanes y las marejadas ciclónicas en un escenario de cambio climático.

Hipótesis alterna

Se evidenciarán procesos significativos de erosión o acreción costera, generando cambios en la línea de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia durante el periodo de 2010 a 2025.

Hipótesis nula

No se evidenciarán procesos significativos de erosión o acreción costera que generen cambios en la línea de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia durante el periodo de 2010 a 2025.

Capítulo II.

Revisión de literatura

2.1 Trasfondo histórico

En la proximidad de Bahía Salinas y Bahía Sucia se encuentran las Salinas de Cabo Rojo, un ecosistema invaluable para la cultura, la economía local y la biodiversidad. Históricamente, las Salinas de Cabo Rojo constituyeron la primera industria de Puerto Rico. Los taínos recolectaban sal para diversos usos y, tras la colonización de la isla por los españoles, la Corona Española autorizó la explotación de este recurso con fines económicos. Por otro lado, en el año 1769, se produjo una confrontación en la playa conocida hoy día como ‘El Combate’ debido a disputas por el control de la sal entre ciudadanos de los municipios de Aguada y Cabo Rojo. Históricamente, los enfrentamientos trascendieron el ámbito local e involucraron a potencias extranjeras como Inglaterra, Francia y Holanda, que lucharon entre sí por el dominio de este recurso estratégico. A partir de la década de 1940, la industria de la sal comenzó a decaer en Puerto Rico, y en años recientes cesó temporalmente por múltiples factores tales como la entrada de agua salina a causa de la erosión costera, los huracanes, el aumento en el nivel del mar y la actividad sísmica (Olán Martínez, 2020b).

En los últimos años, el aumento en la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, como los huracanes Irma y María en 2017 y el huracán Fiona en 2022, ha comprometido la estabilidad de las Salinas. Estos fenómenos, exacerbados por el calentamiento global, han provocado procesos acelerados de erosión y la mortalidad masiva del bosque de manglar. En particular, el colapso de dos dunas costeras ubicadas en Bahía Sucia y Punta Águila (área cercana a Bahía Salinas) ha ocasionado inundaciones extremas que han afectado de forma significativa la flora y fauna del ecosistema. Investigaciones realizadas por científicos del

programa *Sea Grant* de la Universidad de Puerto Rico documentaron, mediante análisis de imágenes satelitales entre 1998 y 2019, un incremento progresivo en el área de manglar muerto, especialmente después de eventos climáticos extremos como el huracán María (García et al., 2020). De manera complementaria, un estudio reciente de Valeria A. Pérez, del Departamento de Geología de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez utilizó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) aplicado a imágenes satelitales LandSat-9 y a una fotografía aérea histórica para evaluar la cobertura de manglar y los procesos erosivos en Playa Salinas durante 94 años. Sus resultados evidenciaron una pérdida significativa de manglar a lo largo de 0.83 kilómetros de costa tras el paso del huracán Fiona, estableciendo una correlación directa entre esta pérdida de cobertura vegetal y los procesos de erosión costera en el área. Playa Salinas registró una tasa de erosión promedio de -0.68 metros/año y una tasa de acreción máxima de +0.10 metros/año. Por otra parte, para el periodo de 2017-2024, la tasa de erosión registrada fue de -16.01 metros/año (Pérez, 2024). En respuesta a estas situaciones y como un esfuerzo para mitigar los daños y conservar este ecosistema, el gobierno de Estados Unidos asignó 5 millones de dólares para la restauración de las Salinas de Cabo Rojo (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA), 2022) y en la actualidad se continúan llevando a cabo las labores de este proyecto.

2.2 Marco teórico

El análisis de los cambios en la línea de costa requiere una comprensión sólida de los conceptos y procesos que intervienen en la dinámica costera. Este marco teórico presenta una revisión de la literatura científica relacionada con la erosión y acreción costera, así como los factores naturales y antropogénicos que influyen en estos procesos. Además, se abordan las herramientas geoespaciales utilizadas para el análisis de los cambios en la costa a lo largo del

tiempo, tales como el *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) y el *Quantum Geographic Information System* (QGIS), programas utilizados para este estudio.

2.2.1 Erosión y acreción costera

La isla de Puerto Rico cuenta con aproximadamente 1,225 playas a través de los 44 municipios costeros. Los tipos de costas más comunes son: playa con un 30%, costa de vegetación con un 28%, costa antropogénica con un 18% y costa rocosa con un 15%. La playa se define como el área ocupada por depósito de sedimento no consolidado que se extiende desde la línea de vegetación, base de la duna o estructura hasta la línea de agua (CoRePI-PR, 2021). Las dunas son características importantes ya que son reservorios profundos de sedimento, lo cual ayuda a preservar la arena y actúan como un amortiguador en contra del aumento en el nivel del mar (Bierman y Montgomery, 2014). La playa es una de las infraestructuras naturales más importantes ya que protege la costa, es un atractivo para la recreación y funge como un ecosistema sumamente importante para la biodiversidad costera y marina. Las playas tienen la capacidad de proteger las costas mediante la amortiguación de la energía que proviene de las olas, las mareas y las marejadas ciclónicas, por lo que mientras más ancha sea una playa, mejor protección puede brindarle a la costa y a las comunidades e infraestructuras aledañas a la zona marítimo-terrestre (CoRePI-PR, 2021). Sin embargo, las playas son el tipo de costa que experimenta las tasas de erosión más altas. Por otra parte, las costas de vegetación incluyen los humedales, los mangles, bosques y pastizales, entre otros tipos de vegetación. Las costas antropogénicas son aquellas diseñadas con estructuras duras u otras modificaciones por parte de los humanos. Por último, las costas rocosas incluyen acantilados, rocas de playa y eolianitas (Henderson, Himmelstoss, y Barreto-Orta, 2024).

Ambas áreas de interés para este estudio (Bahía Salinas y Bahía Sucia) constan de las cuatro costas antes mencionadas. Sin embargo, las dos costas que predominan en ambas bahías son playa y costa de vegetación (CoRePI-PR, 2022b). La línea costera es una zona dinámica en constante transformación debido a factores como las mareas, el oleaje, las corrientes y la actividad humana (Azizan et al., 2024). Entre los procesos físicos más significativos que afectan las costas se encuentran la erosión y la acreción costera. Ambos juegan un papel determinante en la morfología litoral y representan indicadores claves en el estudio de los cambios espaciales y temporales en zonas costeras. La erosión costera se define como la pérdida de ancho y/o elevación de la playa a causa de la pérdida de sedimentos y la migración de agua tierra adentro. Por el contrario, la acreción costera es la deposición de sedimentos que produce un desplazamiento de la línea de agua hacia el mar. Tanto la erosión como la acreción pueden causar cambios en el ancho y/o elevación de las playas, así como en la línea de las costas (CoRePI-PR, 2022a).

2.2.2 Cambio climático y aumento en el nivel del mar

El clima varía de forma natural en un amplio rango de escalas a través del tiempo, pero esta variabilidad natural no explica el calentamiento global observado desde la década de 1950. Las actividades antropogénicas están alterando el clima, y la evidencia del calentamiento global en el planeta Tierra es irrefutable. La ciencia es inequívoca al afirmar que el aumento en los gases de invernadero en la atmósfera es el principal responsable del calentamiento global (Marvel, K., Su, W., Delgado, R., Aarons, S., Chatterjee, A., Garcia, M.E., Hausfather, Z., Hayhoe, K., Hence, D.A., Jewett, E.B., Robel, A., Singh, D., Tripathi, A., y Vose, R.S., 2020).

El aumento en temperaturas ha sido la causa principal del derretimiento de las capas de hielo en Groenlandia, la Antártida y de los glaciares alrededor del mundo. El ritmo de pérdida

de los glaciares refleja la velocidad actual del calentamiento global (Associate Press, 2023). Un estudio reveló que, entre los años 2000 y 2019, el 97% de los glaciares del planeta perdieron aproximadamente 267 billones de toneladas de hielo. Esto implica que, si toda esta masa de hielo derretida llegó al océano, su contribución al aumento del nivel del mar fue de aproximadamente 0.73 milímetros por año. Asimismo, el estudio estima que entre un 6% y un 19% de la aceleración en el aumento del nivel del mar en el siglo XXI se debe a la pérdida de masa glaciaria, y que aproximadamente un 21% del aumento total del nivel del mar proviene directamente de este proceso (Hugonnet, McNabb, Berthier, Menounos, Nuth, Girod, Farinotti, Huss, Dussaillant, Brun y Kääb, 2021).

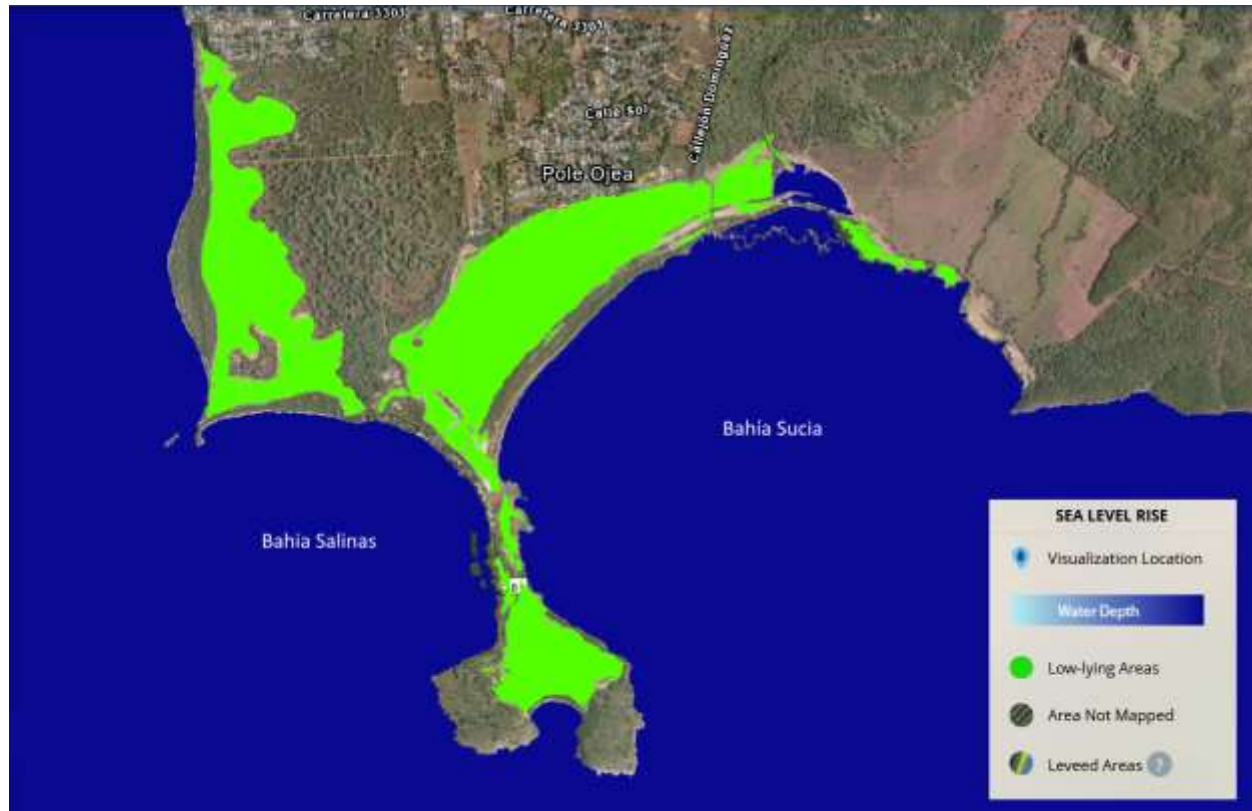
Tanto el cambio climático como el aumento del nivel del mar representan amenazas significativas para los ecosistemas costeros a nivel global, ya que afectan directamente la estabilidad y morfología de las líneas de costa. Este incremento del nivel del mar intensifica la pérdida de sedimentos, altera las dinámicas naturales de las olas y corrientes, y expone con mayor frecuencia a las zonas costeras a eventos climáticos extremos.

En el contexto de Puerto Rico, se proyecta un aumento en el nivel del mar de hasta 2.1 pies para el año 2060 y hasta 4.9 pies para el año 2100 (Runkle et al., 2022). Para visualizar mejor los posibles impactos, se utilizó la plataforma *Sea Level Rise Viewer* de la NOAA. La Figura 3 muestra el promedio actual de la línea de costa en las áreas de interés para este estudio (Bahía Salinas y Bahía Sucia), según datos del *Sea Level Rise Viewer* de la NOAA. En esta imagen, las áreas sombreadas en verde representan zonas bajas que incluyen humedales, áreas de transición y terrenos susceptibles a inundaciones costeras. Estas áreas son particularmente vulnerables al aumento del nivel del mar debido a su topografía y proximidad al mar. Las Figuras 4 y 5 ilustran cómo estas zonas podrían verse afectadas con un aumento en el nivel del

mar de 3 y 5 pies respectivamente, proyecciones que se estiman posibles para finales del siglo XXI. Como puede observarse, muchas de las áreas verdes que hoy sirven como barrera natural y hábitat para múltiples especies quedarían inundadas permanentemente bajo estos escenarios.

Figura 3

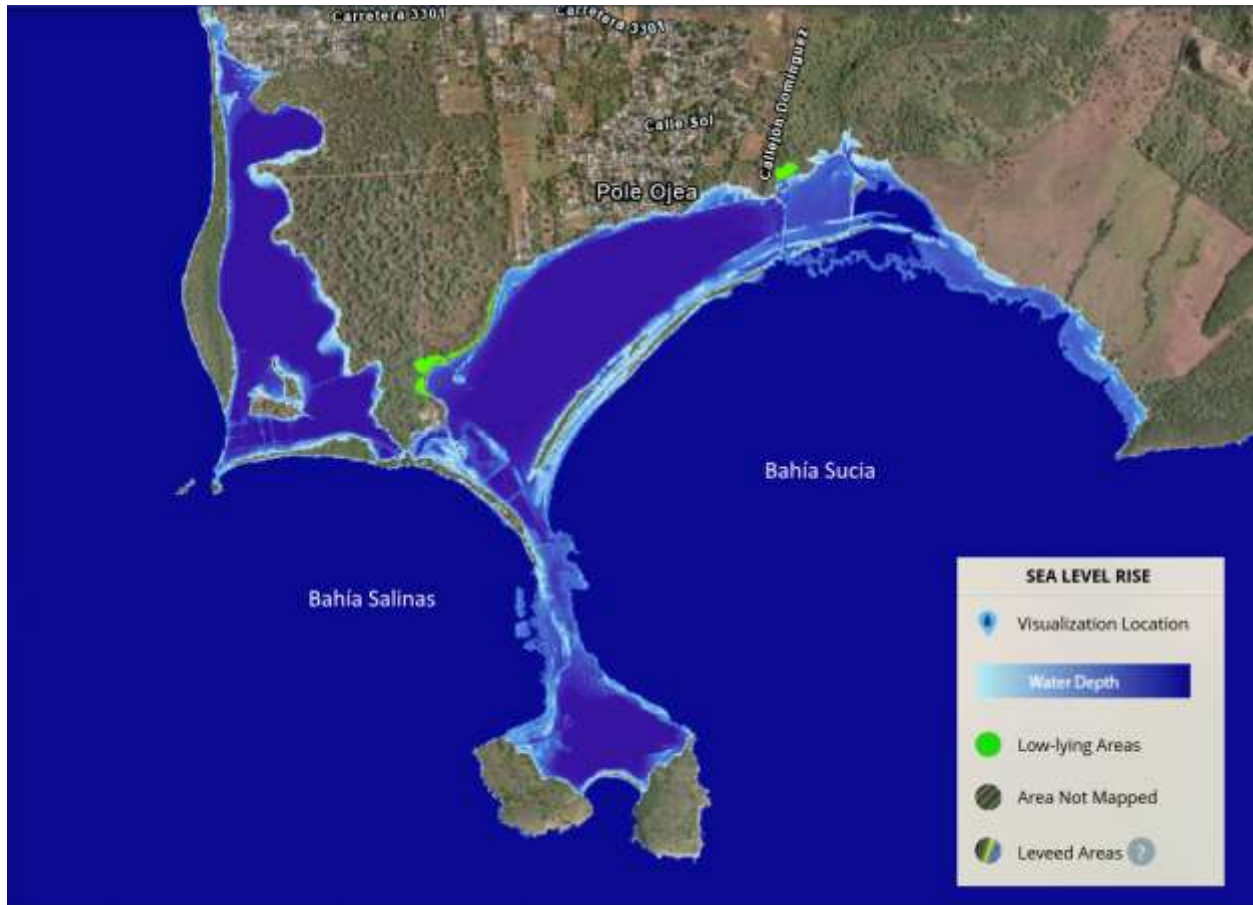
Línea promedio actual en Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico).



Nota. Las áreas sombreadas en verde representan zonas bajas que incluyen humedales, áreas de transición y terrenos susceptibles a inundaciones costeras. Captura de pantalla modificada utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12 del portal de la *NOAA Sea Level Rise Viewer*, 2025. https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor. Ver la captura original del portal en el apéndice A, figura A1.

Figura 4

Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 3 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico).



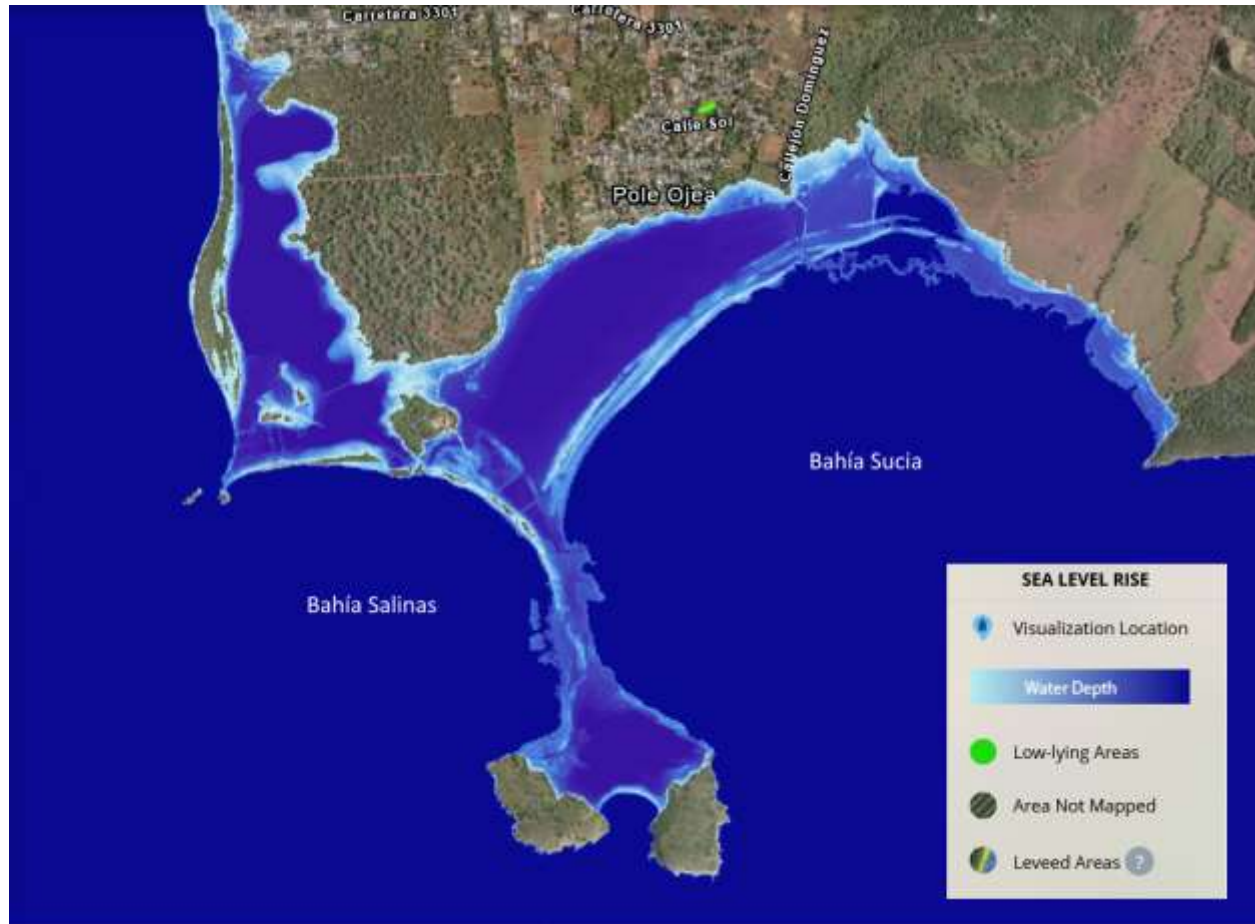
Nota. Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 3 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia. Captura de pantalla modificada utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12 del portal de la *NOAA Sea Level Rise Viewer*, 2025.

[https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-](https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor)

[7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor](https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor). Ver la captura original del portal en el apéndice A, figura A2.

Figura 5

Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 5 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia (Cabo Rojo, Puerto Rico).



Nota. Proyección del impacto de un aumento en el nivel del mar de 5 pies a lo largo de Bahía Salinas y Bahía Sucia. Captura de pantalla modificada utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12 del portal de la *NOAA Sea Level Rise Viewer*, 2025.

<https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/5/->

7477334.995885417/2032408.3517767822/14.028/satellite/none/1/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor. Ver la captura original del portal en el apéndice A, figura A3.

2.2.3 Enfoque geoespacial en estudios costeros

El análisis geoespacial ha revolucionado el estudio de los ecosistemas costeros al permitir una comprensión más precisa y detallada de los cambios que ocurren en estas áreas con el paso del tiempo. Herramientas como QGIS y DSAS permiten monitorear y modelar con mayor exactitud los patrones de erosión y acreción costera a través de los años. Ambas tecnologías permiten integrar y visualizar información espacial y temporal de múltiples fuentes, como imágenes satelitales, datos topográficos y series históricas de líneas de costa. En particular, DSAS ha sido una herramienta ampliamente utilizada en estudios de dinámica costera, ya que permite calcular estadísticas como la tasa de cambio de la línea de costa mediante técnicas como el *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR) y *Weighted Linear Regression* (WLR) (Himmelstoss, Henderson, Kratzmann y Farris, 2021).

El SCE captura las dinámicas temporales y representa el rango máximo de variabilidad en la posición de la línea de costa, ayudando a evaluar los cambios extremos en la dinámica de la costa a lo largo de un periodo de tiempo determinado. El NSM separa las líneas de costa más antiguas y recientes en una base de datos, analizando el efecto neto de los cambios en la línea de costa a través del tiempo. El EPR calcula la tasa anual de cambio en la línea de costa, proporcionando una medida precisa de su variación anual. El LRR es un método estadístico que calcula la tasa de cambio promedio de la línea de costa mediante la regresión lineal, permitiendo identificar tendencias a largo plazo y el WLR estima la tasa de cambio a lo largo del tiempo ajustado una línea de regresión, pero asignando mayor peso a los datos más confiables o con menor error (Azizan et al., 2024).

El enfoque geoespacial facilita la toma de decisiones informadas en cuanto al manejo costero, la planificación y la mitigación de riesgos. Al generar productos visuales como mapas temáticos, modelos de elevación o proyecciones de cambio futuro, se proveen herramientas valiosas para identificar zonas vulnerables, planificar intervenciones y evaluar el impacto de eventos climáticos extremos.

En el contexto del cambio climático y el aumento en el nivel del mar, este tipo de análisis es esencial para anticipar escenarios futuros y diseñar estrategias de adaptación y conservación basadas en evidencia científica.

2.2.4 Herramientas utilizadas

Para este estudio, se utilizaron varias herramientas con el propósito de analizar el cambio en los perfiles de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia en Cabo Rojo durante los años 2010 a 2025. En primer lugar, se utilizó el programa QGIS versión 3.44 como plataforma principal para la visualización, creación, edición y preparación de datos espaciales, así como para la preparación de mapas utilizados. Por otra parte, se utilizó el programa DSAS, programa desarrollado por el *U.S. Geological Survey* (USGS), y se utilizó con el fin de calcular las tasas de cambio de las líneas de costa a partir de líneas históricas creadas previamente por USGS. Para los años 2022 y 2025 aún no han sido creadas las respectivas líneas de costa, por lo que se optó por utilizar un método para la creación y extracción de estas. Para ello, se utilizó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés). Este índice facilita la detección y delimitación de cuerpos de agua en imágenes satelitales, permitiendo la identificación de la línea de costa. Estas herramientas en conjunto permitieron una evaluación espacial y temporal más robusta de los procesos de erosión y acreción costera en Bahía Salinas y Bahía Sucia.

2.2.5 Posibles limitaciones del estudio

Esta investigación presentó dos principales limitaciones que deben ser consideradas al momento de interpretar los resultados. En primer lugar, algunos métodos de cálculo de DSAS, como *Linear Regression Rate* (LRR) y *Weighted Linear Regression* (WLR), funcionan de manera óptima con series temporales de datos más extensas. En este estudio, únicamente se incluyeron los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025, lo que podría reducir la precisión de las estimaciones de cambio promedio anual de la línea de costa mediante la utilización de estos dos métodos. En segundo lugar, la extracción de perfiles de costa para los años 2022 y 2025 estuvo limitada por el uso del Índice de Agua de Diferencia Normalizada. Este índice, aunque útil para delimitar cuerpos de agua, presenta algunas desventajas que pueden afectar la precisión de los datos. Por ejemplo, en humedales y estuarios, el agua poco profunda puede confundirse con tierra, lo que provoca errores en la separación entre agua y superficie terrestre. Además, la presencia de nubes en imágenes satelitales puede afectar la resolución de estas, introduciendo posibles sesgos en los resultados finales. A pesar de estas limitaciones, los resultados obtenidos proporcionan una estimación confiable de la dinámica litoral en Bahía Salinas y Bahía Sucia, y permiten identificar tendencias generales de erosión y acreción durante el periodo analizado.

2.3 Estudios de casos

Los estudios de casos son fundamentales para comprender los procesos y efectos que se están experimentando en diversas áreas costeras, ya que proporcionan un marco de referencia para la interpretación de resultados y la comparación de dinámicas similares. Es por esto que, a través de la revisión de estudios previos realizados en áreas similares, es posible identificar patrones comunes, evaluar la efectividad de las herramientas geoespaciales utilizadas en esos estudios y extraer información importante con base científica. En este subtema, se presentan

algunos de los estudios más relevantes que han abordado problemáticas similares, con un enfoque particular en aquellos que han utilizado Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) y DSAS para analizar la dinámica costera. A continuación, se discuten los estudios con mayor relevancia para este estudio.

El estado de las playas de Puerto Rico Post-María (Grupo 4) (CoRePI-PR, 2022b).

Este estudio tuvo como enfoque estudiar y analizar el estado de las playas de los 44 municipios costeros de Puerto Rico luego del huracán María categoría 4 ocurrido en septiembre del 2017. Además, se identificaron las zonas de las playas que presentaban erosión, acreción o que no presentaban cambios. Asimismo, se identificaron las zonas costeras donde hubo migración de las playas y de la línea de agua tierra adentro. Para analizar el estado de las costas, los científicos de este estudio utilizaron imágenes satelitales de alta resolución y técnicas de análisis geoespaciales tales como GIS y DSAS. En adición, realizaron trabajo de campo en diversos puntos de la isla para validar los datos obtenidos de las imágenes satelitales o en respuesta a eventos de riesgo ocurridos en esas zonas. Este estudio reveló que en todas las costas evaluadas se identificaron sectores donde hubo erosión y acreción luego del huracán María y en julio 2018 (a 10 meses del paso del huracán).

Aunque el estudio de CoRePI-PR se centró en toda la isla, sus hallazgos en Cabo Rojo son especialmente relevantes para este estudio ya que las áreas de interés (Bahía Salinas y Bahía Sucia) se encuentran en este municipio. Los resultados de este estudio revelaron que luego del paso del huracán, el 51% de la costa en Cabo Rojo presentó erosión y las áreas más afectadas fueron las Salinas y el Combate. Por otra parte, a 10 meses del paso del huracán, muchas playas, entre ellas Playa Salinas, Playa Buyé y el Balneario de Boquerón perdieron el ancho de la playa. Además, se identificó erosión en las playas cercanas a las Salinas. Esta información es crucial

para este estudio, pues demuestra la vulnerabilidad de las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia ante la erosión costera en este caso causada por un evento climático extremo. Asimismo, este estudio logró documentar por primera vez de manera cuantitativa la migración de playas y de la línea de agua tierra adentro. Cabe destacar que Cabo Rojo es el municipio que presentó la mayor cantidad de kilómetros costeros con migración de playa con un total de 0.11 kilómetros y línea de agua tierra adentro con un total de 0.50 kilómetros. En términos generales, luego del huracán María se presentó un 49% de acreción y un 51% de erosión en las playas de este municipio, mientras que, a 10 meses del huracán, el porcentaje de acreción aumentó a un 67% y el porcentaje de erosión disminuyó a un 33%. Este estudio demuestra la importancia de estudiar los cambios en el litoral costero, en particular luego de eventos climáticos extremos tales como los huracanes, los cuales ante un escenario de cambio climático aumentarán en intensidad y frecuencia.

Cambio de la línea de costa nacional: estadísticas resumidas de líneas de costa vectoriales desde principios de 1900 hasta la década de 2010 para Puerto Rico (*National Shoreline Change: Summary Statistics for Vector Shorelines from the Early 1900s to the 2010s for Puerto Rico*, Henderson et al., 2024).

Este estudio fue una colaboración entre el Departamento del Interior de los Estados Unidos (DOI, por sus siglas en inglés), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y la Universidad de Puerto Rico, con el propósito de analizar los cambios en la línea de costa de todo Puerto Rico desde la década de 1900 hasta la década de 2010. Para ello, se utilizaron diversas técnicas de análisis geoespacial, combinando datos tridimensionales como los obtenidos mediante tecnología de detección y medición de distancias por luz (LIDAR, por sus siglas en inglés), modelos digitales de elevación, junto con fuentes bidimensionales como estudios topográficos y fotografías aéreas.

Estos datos de líneas de costas fueron organizados mediante GIS y analizados utilizando el programa DSAS. Para llevar a cabo el análisis, DSAS generó transectos perpendiculares a intervalos de 50 metros a lo largo de toda la línea de costa. Luego, se calcularon las tasas de cambio a corto plazo (aproximadamente 40 años) y a largo plazo (aproximadamente 120 años) utilizando regresión lineal.

En el caso de la región sur de la isla, la cual incluye las zonas de interés de este estudio, los resultados revelaron que, a corto plazo, un 48% de los transectos analizados mostraron tendencias acrecionales, mientras que el 51% presentaron tendencias erosionales. A largo plazo, el 36% de los transectos reflejaron acreción y el 63% erosión. Estos hallazgos son fundamentales para la gestión de las costas del sur de Puerto Rico, ya que evidencian una tendencia creciente hacia la erosión costera en comparación con la acreción. Este estudio destaca la importancia de mantener registros históricos detallados sobre la dinámica del litoral costero de Puerto Rico, lo cual permite identificar zonas vulnerables y desarrollar estrategias de adaptación y manejo basadas en evidencia científica.

Evaluación de los cambios en la línea costera del norte de Selangor, Malasia, mediante el Sistema Digital de Análisis de la Línea Costera (DSAS) (*Assessment of Shoreline Changes at Northern Selangor Coast, Malaysia using Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*, Azizan et al., 2024).

Este estudio en la costa de Selangor, Malasia, fue desarrollado con el objetivo principal de mitigar los impactos del cambio climático y el aumento del nivel del mar sobre las comunidades costeras de la región. La recopilación de datos para las líneas de costa de los años 2003, 2013 y 2023 se llevó a cabo mediante técnicas geoespaciales, como la utilización de

imágenes de los satélites LandSat 8 OLI/TIRS y LandSat 4-5 TM. Posteriormente, los datos fueron organizados utilizando GIS y analizados con el programa DSAS.

Para evaluar los cambios en la línea costera ocurridos durante los años de interés para este estudio, se utilizaron los modelos estadísticos como SCE, NSM, EPR y LRR. En adición, este estudio empleó el modelo de regresión lineal (LRR) para realizar predicciones sobre los cambios en la línea de costa para los años 2040 y 2060.

Los hallazgos de este estudio identificaron áreas a lo largo de la costa de Selangor afectadas por erosión o acreción costera. Asimismo, mediante el uso del modelo de regresión lineal, se lograron estimaciones sobre los cambios en la línea de costa para los años 2040 y 2060, proporcionando información valiosa para la gestión y planificación costera, lo que contribuye a mitigar los impactos del cambio climático y el aumento del nivel del mar.

2.4 Marco legal

El marco legal relacionado con la erosión costera, la protección de la biodiversidad y la planificación costera en Puerto Rico está compuesto por una serie de leyes, regulaciones y normativas tanto a nivel local como federal. Estas leyes tienen como objetivo regular el uso y conservación de las zonas costeras, así como proteger los ecosistemas marinos y las especies que habitan en ellos. A continuación, se describen las principales leyes y regulaciones que impactan la gestión de los recursos costeros en Puerto Rico.

2.4.1 Leyes y regulaciones de Puerto Rico

Ley de Política Pública Ambiental. Ley Número 416 del 22 de septiembre de 2004

Esta ley establece la política pública ambiental de Puerto Rico, enfocándose en la protección de los recursos naturales, la calidad ambiental y la conservación de los ecosistemas, incluido el manejo de costas y zonas marinas. También promueve criterios para el desarrollo

sostenible y la mitigación de impactos ambientales, como la erosión costera. Su relevancia para este estudio radica en que provee el marco legal para atender los efectos del cambio en la línea de costa, tema central de esta investigación.

Ley de la Junta Interagencial para el Manejo de las Playas de Puerto Rico. Ley Número 293 del 21 de agosto de 1999

Esta ley crea la Junta Interagencial para el Manejo de las Playas de Puerto Rico para coordinar esfuerzos entre los sectores público y privado, fomentando la seguridad, la conservación y el uso adecuado de las playas. Además, tiene como propósito que se lleven a cabo las gestiones necesarias para evitar la contaminación y la erosión costera. Esta ley es relevante para este estudio ya que se enfoca en gestionar acciones de manejo costero que eviten el deterioro de nuestras playas mediante la contaminación o eventos como la erosión costera.

Reglamento para el aprovechamiento, vigilancia, conservación y administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo estas y la zona marítimo terrestre, Reglamento Número 4860 del 29 de diciembre de 1992 del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales

El Reglamento 4860 establece el proceso para realizar el deslinde, lo que consiste en determinar cuál es la zona marítimo terrestre. La zona marítimo terrestre es de dominio público, por lo que el Gobierno de Puerto Rico es el encargado de su conservación. Este reglamento también establece que no debe haber ninguna construcción permanente en los primeros 50 metros de tierra adentro desde la zona marítimo terrestre. Para este estudio, este reglamento es sumamente importante ya que se ha documentado a través de los años cómo construcciones ilegales se han llevado a cabo en zonas marítimo-terrestres alrededor de la isla contribuyendo a la erosión costera y al deterioro de las zonas costeras de la isla.

2.4.2 Leyes y regulaciones federales

Ley de Manejo de Zonas Costeras de EE. UU. del 1972. (*Coastal Zone Management Act, CZMA*)

En el año 1972, el Congreso de los Estados Unidos estableció la Ley de Manejo de Zonas Costeras ante el inevitable desarrollo en estas áreas. Esta ley es manejada por la NOAA y establece un enfoque coordinado para la gestión de las zonas costeras del país, siendo su principal objetivo el preservar, proteger, desarrollar y restaurar las zonas costeras. Esta ley es de importancia para este estudio ya que, aunque no es una ley que regula directamente a Puerto Rico, la isla se ha adherido a ésta, lo que le permite acceder a fondos federales para la protección de sus costas y a la implementación de proyectos de restauración y conservación de ecosistemas costeros.

Ley de Especies en Peligro de Extinción del 1973. (*Endangered Species Act*)

La Ley de Especies en Peligro de Extinción del 1973 tiene como propósito establecer protecciones para las especies que están catalogadas como amenazadas o en peligro de extinción en el registro federal. Además, esta ley exige la preparación e implementación de planes de recuperación de las especies enlistadas, así como la documentación requerida para cada especie con la información científica actualizada, proporcionando una herramienta para los biólogos y científicos de campo que estén trabajando para su recuperación. Esta ley refuerza el propósito de este estudio ya que, bajo sus regulaciones, se prevé la cooperación y la asistencia financiera con propósitos de conservación para los Estados y territorios, entre los que se incluye Puerto Rico.

Además, permite designar hábitats críticos para especies en peligro, como áreas costeras donde anidan tortugas marinas o aves protegidas, lo que impone restricciones al desarrollo con el fin de preservar estos ecosistemas. En este contexto, el área de estudio es hábitat crítico para la

Mariquita (*Setophaga angelae*), ave endémica de Puerto Rico catalogada en peligro de extinción, lo que resalta aún más la importancia de evaluar los impactos de la erosión costera en esta zona.

Capítulo III.

Metodología

3.1 Adquisición de datos

Para este estudio, se descargaron los *shapefiles* de los perfiles de costa de la isla de Puerto Rico, así como la línea base correspondiente a cada bahía. Estos archivos fueron generados por el *U.S Geological Survey* (USGS) mediante el uso del software *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (Henderson, R.E., Heslin, J.L., and Himmelstoss, E.A., 2021a y 2021b). La línea base utilizada en este estudio está ubicada tierra adentro (onshore). Esta línea de referencia sirve como punto inicial a partir de la cual DSAS genera los transectos perpendiculares hacia las líneas de costa. Cada transecto mide los cambios en la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo, por lo que la línea base define desde dónde y en qué dirección se realizan dichas mediciones.

Para obtener los perfiles de las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia correspondientes a los años 2022 y 2025, se descargaron imágenes del satélite LanSat 9, en Level 1, Collection 1 y Level 2, Collection 2, a través del portal *Earth Explorer* (Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2020). El satélite LanSat 9 funciona como parte de una misión entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y el USGS. El satélite LanSat 9 cuenta con dos instrumentos principales, el *Operational Land Imager 2* (OLI-2) y el *Thermal Infrared Sensor 2* (TIRS-2). Estos instrumentos capturan datos en 11 bandas espectrales (luz visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y térmica) con una resolución espacial de 15 a 30 metros (U.S. Geological Survey, 2022). Cada banda resalta algo diferente (Véase Tabla 1). Este satélite monitorea la superficie terrestre con alta precisión y detalles, permitiendo identificar áreas de vegetación, agua, temperatura y cambios en la superficie terrestre.

Tabla 1

Bandas espectrales que utiliza el satélite LanSat 9 y sus aplicaciones en la observación de la superficie terrestre.

Banda	Nombre	Qué detecta
1	Aerosol costero	Partículas en la atmósfera, aguas costeras
2	Azul	Agua, sedimentos, zonas costeras
3	Verde	Vegetación, cuerpos de agua
4	Rojo	Vegetación, suelo
5	Infrarrojo cercano (NIR)	Vegetación (cuán saludable está)
6	Infrarrojo onda corta (SWIR 1)	Humedad del suelo, vegetación
7	Infrarrojo onda corta (SWIR 2)	Suelo seco, áreas quemadas
8	Pancromática	Imagen en alta resolución (blanco y negro)
9	Cirrus	Nubes altas
10	Térmica (TIRS 1)	Temperatura superficial
11	Térmica (TIRS 2)	Temperatura superficial

Las bandas espectrales de las imágenes fueron sometidas a correcciones atmosféricas mediante el plugin *Semi Automatic Classification Plugin* (Congedo, 2021) en el programa QGIS.

Posteriormente, para la delimitación de los cuerpos de agua y las áreas terrestres, se utilizó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) (Gao y Bo-Cai, 1996).

El NDWI se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$NDWI = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 5}{Banda\ 3 + Banda\ 5}$$

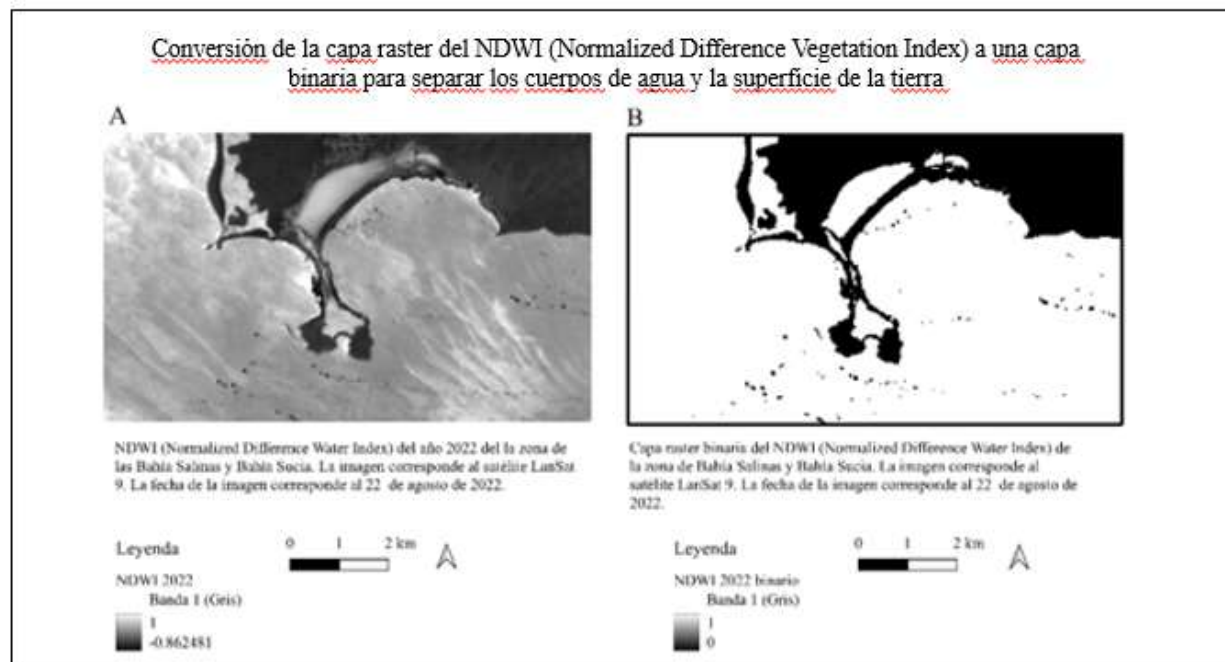
donde la Banda 3 corresponde al espectro visible verde y la Banda 5 es el infrarrojo cercano (Near Infrared, NIR). El cálculo del índice se realizó mediante la herramienta *Raster calculator* en QGIS.

A partir de los valores obtenidos, se generó una capa raster binaria del NDWI para la clasificación de agua y tierra. Los valores mayores a 0 representan los cuerpos de agua y los valores menores a 0 representan tierra (McFeeters, 1996) (Figura 6)

Luego, la capa raster binaria fue convertida a una capa vectorial de polígonos utilizando la herramienta de *Polygonize (Raster to Vector)*. Esta a su vez, fue convertida a una capa vectorial de líneas mediante la utilización de la herramienta *Polygons to lines*. Luego, la capa vectorial de líneas se editó con la herramienta de *Edit Geometry* para extraer los perfiles de las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia para los años 2022 y 2025 (Figura 7). Posteriormente, se utilizó la opción de *Simplify* de la herramienta *Geometry tools* en el menú de edición de capas vectoriales con el propósito de suavizar las líneas del contorno de la costa y así arreglar el contorno pixelado de la capa vectorial. Por último, se utilizó la opción *Smooth* de la caja de herramientas *Process Toolbox* para eliminar los vértices de las líneas (Figura 8). Estas conversiones y ediciones se efectuaron utilizando el programa QGIS versión 3.44.

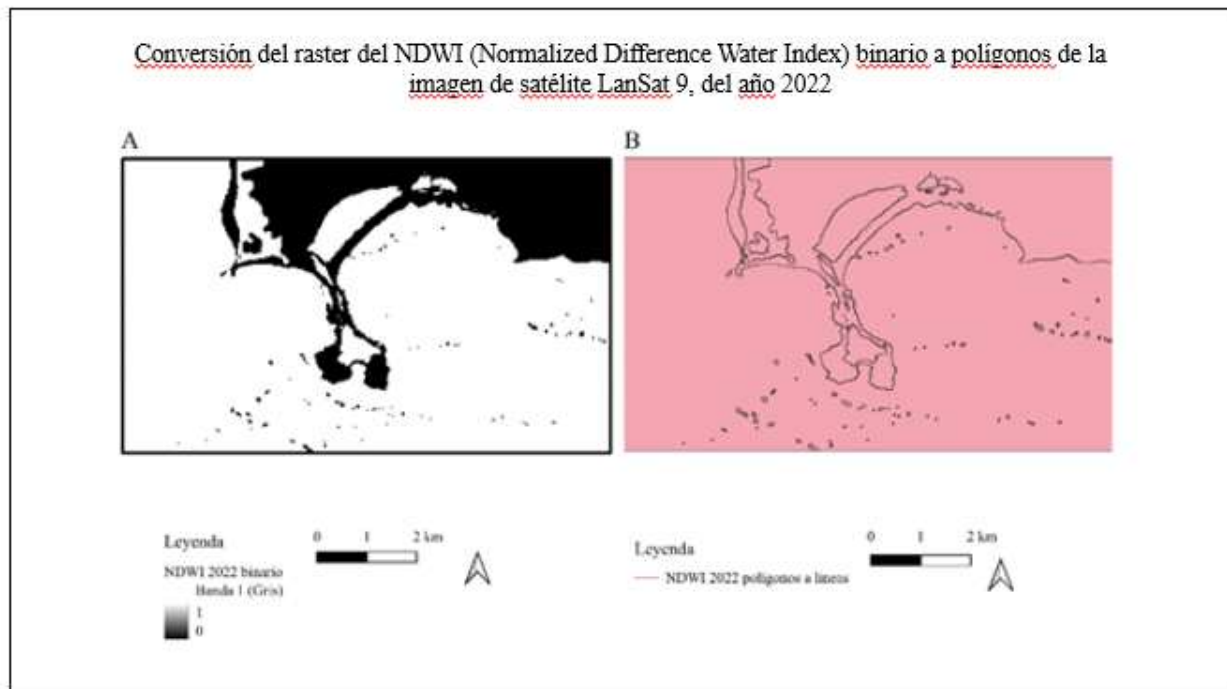
La imagen del satélite LanSat 9, Nivel 1, fue procesada para aumentar la resolución a 15 metros cuadrados mediante la utilización de la herramienta *Pansharpening del Toolbox* de QGIS. Además, se combinaron las bandas 2, 3, y 4 para producir una imagen con colores naturales (Figura 9).

Figura 6



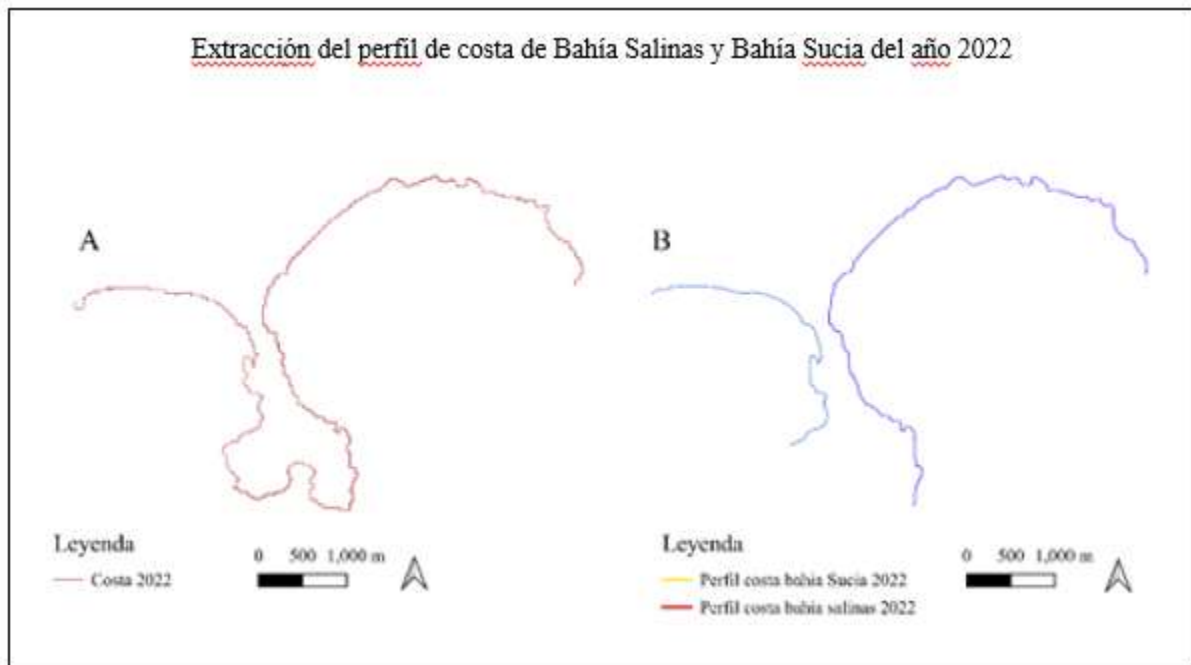
Nota. El índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) fue calculado utilizando la fórmula de Gao, Bo-Cai (1996). Para calcular el índice, se utilizó el *Raster calculator* del programa QGIS versión 3.44. Para separar el agua y la tierra, se procedió a convertir la capa raster del NDWI calculado a una capa binaria. Utilizando el *Raster calculator* se procedió a separar los cuerpos de agua seleccionando los valores de la capa de raster igual o mayores que 0, McFeeters, (1996).

Figura 7



Nota. La capa raster binaria se convirtió en una capa vectorial (polígonos) utilizando la herramienta de *Polygonize (Raster to Vector)* del programa QGIS 3.44. La capa vectorial de polígonos se convirtió en polilíneas utilizando la herramienta *Polygons to lines*. Para seleccionar el perfil de las costas de Bahía Salinas y Bahía Sucia se procedió a eliminar y cortar las líneas utilizando las funciones de edición de capas vectoriales *Edit Geometry*.

Figura 8



Nota. El resultado de la capa vectorial de líneas muestra un contorno pixelado, debido a la conversión. Para suavizar las líneas del contorno de la costa se utilizó la opción *Simplify* de la herramienta *Geometry tools* en el menú de edición de las capas vectoriales. También se utilizó la herramienta *Smooth* de la caja de herramientas (*Process Toolbox*) para eliminar los vértices de las líneas.

Figura 9



Nota. Perfiles de las costas de Bahía Sucia y Bahía Salinas en el año 2022. La imagen del satélite LanSat 9 nivel 1, fue procesada para aumentar la resolución de la imagen a 15 metros cuadrados ya que las bandas del satélite tienen una resolución de 30 metros cuadrados. Esto se llevó a cabo para aumentar el nivel de detalles de la imagen y evitar que apareciera muy pixelada. Para ello, se utilizó la herramienta *Pansharpening* del *Toolbox* de QGIS. En adición, se combinaron las bandas 2,3 y 4 para producir una imagen con colores naturales.

3.2 Corrección de datos

Se utilizó el programa QGIS versión 3.44.6 *Solothurn* para preparar los datos a ser analizados en DSAS versión 6.0, ya que este *software* requiere que la información cumpla con varios parámetros previo a su análisis (QGIS Development Team, 2026). En primer lugar, se descargaron en QGIS los *shapefiles* de los perfiles de costa y de la línea base de Puerto Rico.

Posteriormente, se seleccionaron los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025 para evaluar los cambios en el litoral costero de Bahía Salinas y Bahía Sucia durante dicho periodo. Luego, mediante la herramienta de recorte de QGIS (*Clip*), se delimitaron los perfiles de costa y la línea base para que solo cubrieran las áreas de interés para este estudio.

De este proceso surgieron dos conjuntos de datos, cada uno compuesto por los perfiles de costa de los años seleccionados y su respectiva línea base para cada bahía. Se verificó que los datos estuvieran en metros y en un sistema de coordenadas proyectadas; para este estudio se utilizó EPSG:6566 – NAD83. Finalmente, los conjuntos de datos se almacenaron en una misma base de datos geográfica y se convirtieron al formato *GeoJSON* para su posterior análisis en DSAS.

3.3 Generación de transectos y análisis en DSAS

Una vez preparados los conjuntos de datos, se realizó el análisis de cambio costero mediante la utilización de DSAS versión 6.0, una extensión desarrollada por el USGS para ArcGIS y QGIS, y que luego se convirtió en una aplicación independiente en el año 2024 (Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Farris, A.S., Kratzmann, M.G., Bartlett, M.K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J.L., y Thieler, E.R., 2024).

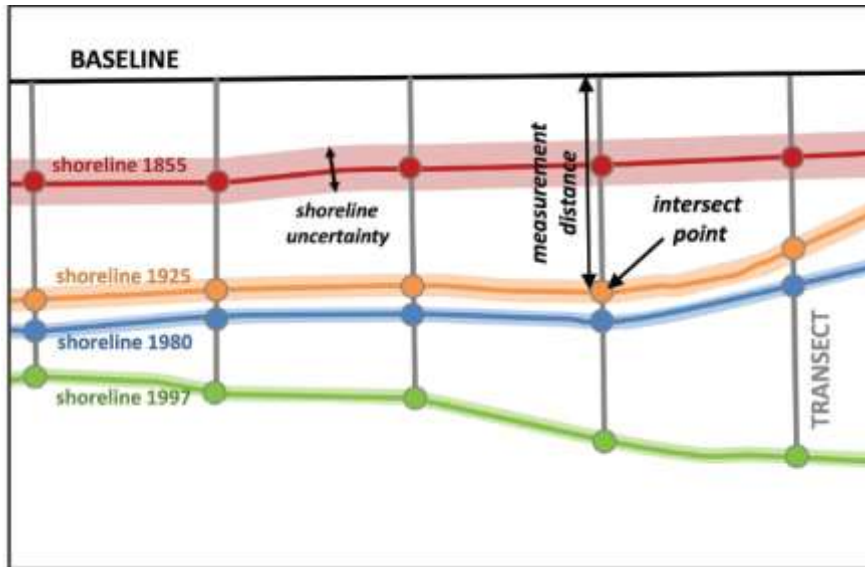
En el proceso de configuración del análisis en DSAS, se estableció un umbral de costa (*shoreline threshold*) de 2 metros, lo que permitió excluir del análisis aquellas líneas de costa separadas por menos de esta distancia, evitando variaciones mínimas. Además, se seleccionó un intervalo de confianza del 95.0% con el fin de garantizar que las tasas de cambio calculadas reflejaran un nivel alto de confiabilidad estadística. DSAS establece una incertidumbre predeterminada de ± 10 metros a la posición de las líneas de costa, considerando posibles errores

que pudieran estar asociados a la precisión de los datos, condiciones de marea y las diferencias en los métodos de digitalización.

Desde la línea base se generaron transectos perpendiculares hacia el mar utilizando los parámetros de configuración de DSAS (Véase Figura 10). Se estableció una distancia entre marcados (*marker distance*) de 50 metros, lo que determinó el punto inicial de cada transecto a lo largo de la línea base. Además, se definió una distancia entre transectos (*transect distance*) de 25 metros para asegurar una cobertura uniforme del litoral, una longitud de transecto (*transect length*) de 220 metros que permitió abarcar tanto la zona terrestre como la marina, y una distancia de suavizado (*smoothing distance*) de 75 metros para reducir posibles irregularidades en la orientación de los transectos y mantener su perpendicularidad respecto a la línea base. Cada transecto interceptó las líneas de costa correspondientes a los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025 registrando las posiciones de cada una. A partir de estas intersecciones, DSAS calculó la distancia neta entre las líneas de costa (*Net Shoreline Movement*, NSM), la distancia entre la línea de costa más cercana a la tierra y la más alejada hacia el mar (*Shoreline Change Envelope*, SCE), y las tasas de cambio anual de la línea de costa. El valor del NSM se obtiene restando la posición más reciente de línea de costa – la posición más antigua de línea de costa, mientras que el valor de SCE se obtiene calculando la distancia entre las posiciones de líneas de costa que más separadas estén entre sí a lo largo de cada transecto representando el cambio máximo registrado sin considerar la dirección (acreción o erosión).

Figura 10

Ejemplo de shapefiles de perfiles de costa y línea base con transectos de medición generados por DSAS.



Nota. La distancia de medición desde la línea base hasta cada punto de intersección se utiliza junto con la fecha del perfil de costa para calcular las estadísticas de tasas de cambio. Extraído del *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 5.1 User Guide*, 2021.

El cálculo de la tasa de cambio se realizó automáticamente mediante los algoritmos de DSAS, que se basan en fórmulas estadísticas específicas. Para el método *End Point Rate* (EPR), la tasa anual se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{EPR} = \text{NSM} / \text{cantidad de años transcurridos entre la primera y última fecha analizada}$$

En el caso de *Linear Regression Rate* (LRR), DSAS aplica un ajuste de regresión lineal a las posiciones temporales de la línea de costa, calculando la pendiente de la línea de mejor ajuste como la tasa promedio anual. Finalmente, en *Weighted Linear Regression* (WLR), el cálculo es similar al LRR, pero ponderando cada línea de costa según su nivel de incertidumbre posicional, de manera que las líneas con mayor precisión tienen más peso en el resultado final. Cabe

destacar que los métodos de LRR y WLR fueron añadidos a este estudio como análisis complementario y no como evidencia principal, ya que sus resultados suelen ser más confiables cuando se consta de una serie temporal de datos amplia. Finalmente, los resultados generados por DSAS fueron visualizados y analizados.

Capítulo IV.

Análisis de Resultados

Los análisis de cambio costero realizados con el programa DSAS evidenciaron diferencias entre Bahía Salinas y Bahía Sucia. En general, Bahía Salinas mostró una estabilidad relativa con ligera tendencia a la acreción, mientras que Bahía Sucia presentó un comportamiento más dinámico y una mayor vulnerabilidad a la erosión costera.

Se llevaron a cabo cinco tipos de análisis: *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR) y *Weighted Linear Regression* (WLR). Para los métodos de SCE, NSM y EPR se consideraron 150 transectos en Bahía Salinas y 313 en Bahía Sucia, mientras que para los análisis LRR y WLR se evaluaron 150 transectos en Bahía Salinas y 312 en Bahía Sucia. En adición, en los métodos de EPR, LRR y WLR, DSAS seleccionó un número de transectos considerados independientes (es decir, no correlacionados), para estimar la incertidumbre del promedio y mejorar la interpretación de las tasas de cambio.

A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos para cada bahía y tipo de análisis.

Tabla 2

Medidas de distancia (m) calculadas por el programa DSAS versión 6.0 en el análisis de los perfiles de costa en Bahía Salinas y Bahía Sucia.

Medidas de distancia (m)	Estadístico	Bahía Salinas	Bahía Sucia
Shoreline Change Envelop (SCE)	Promedio (m)	32.98	51.55
	Máximo cambio (m)	166.94	198.19
	Mínimo cambio (m)	1.18	4.97
Net Shoreline Movement (NSM)	Promedio (m)	19.26	-4.47
	Transectos positivos (%)	88.00	52.72
	Promedio positivo (m)	22.60	22.55
	Transectos negativos (%)	12.00	47.28
	Promedio negativo (m)	-5.20	-34.59

Nota. El SCE indica la magnitud máxima de cambio de la línea de costa, sin considerar la dirección. El

NSM representa el desplazamiento neto de la línea de costa entre la línea de costa más antigua y la más

reciente. Valores positivos indican acreción y valores negativos indican erosión.

Tabla 3

Tasas de cambio (m/año) calculadas por el programa DSAS versión 6.0 en el análisis de los perfiles de costa en Bahía Salinas y Bahía Sucia.

Tasas de cambio (m/año)	Bahía	Promedio (m/año)	Erosión (%)	Promedio erosión	Acreción (%)	Promedio acreción
End Point Rate (EPR)	Salinas	1.26	12.00	-0.44	88.00	1.49
	Sucia	-0.30	47.28	-2.21	52.72	1.42
Linear Regression Rate (LRR)	Salinas	1.63	8.00	-0.77	92.00	1.83
	Sucia	0.56	31.73	-2.39	68.27	1.93
Weighted Linear Regression (WLR)	Salinas	0.79	14.00	-0.36	86.00	0.97
	Sucia	-0.09	46.15	-1.83	53.85	1.40

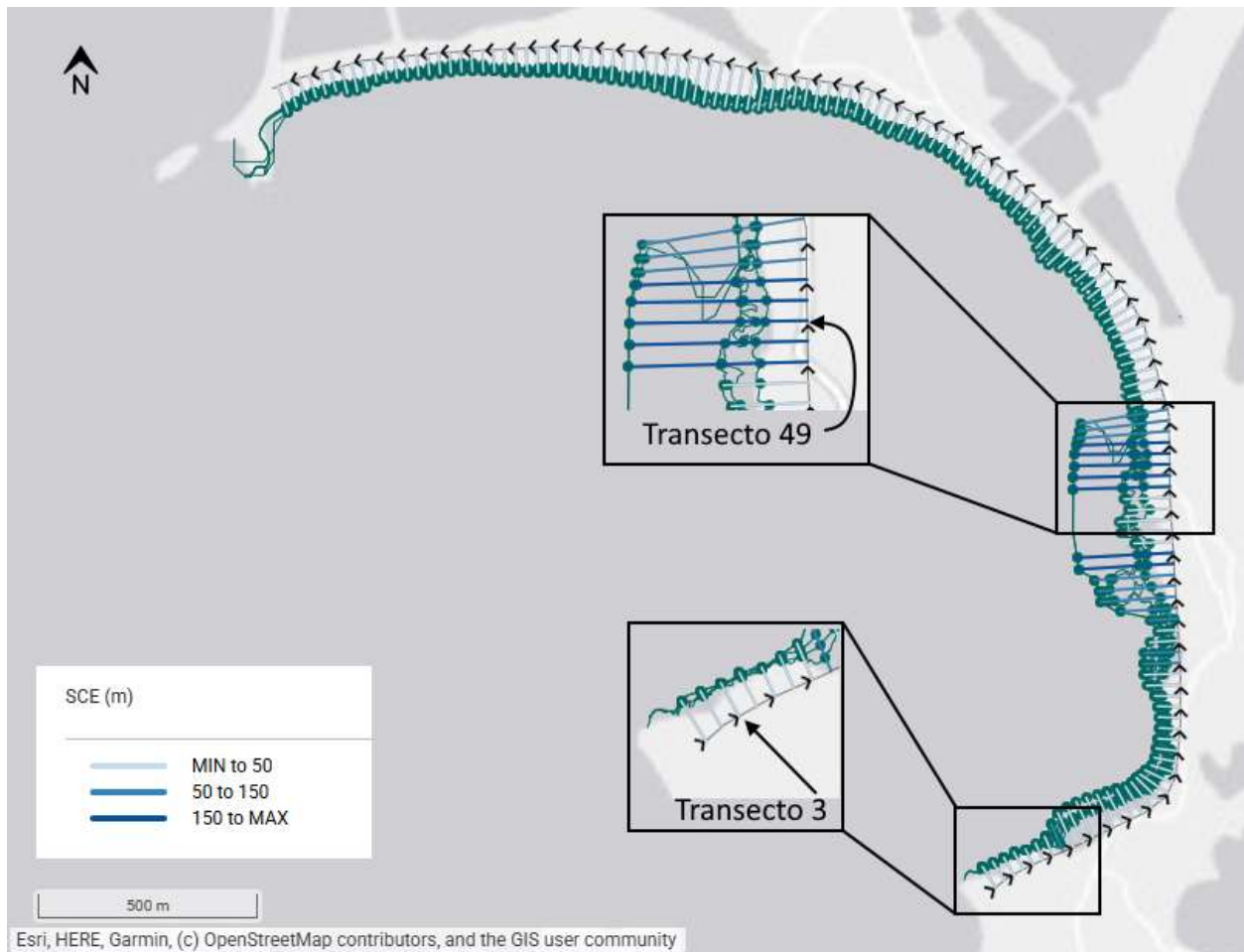
Nota. El EPR calcula la tasa de cambio anual usando solo el primer y último año de observación. El LRR estima la tasa de cambio anual considerando todos los años y ajustando una línea de tendencia lineal. El WLR pondera los transectos según la incertidumbre de cada punto, dando más peso a mediciones confiables.

4.1 Shoreline Change Envelope (SCE)

El análisis de *Shoreline Change Envelope* (SCE) permite cuantificar la magnitud máxima de cambio de la línea de costa entre todas las fechas analizadas, sin considerar la dirección del cambio (ya sea erosión o acreción). Para este estudio, este método permitió identificar la magnitud total del desplazamiento costero ocurrido entre los años 2010 y 2025.

Figura 11

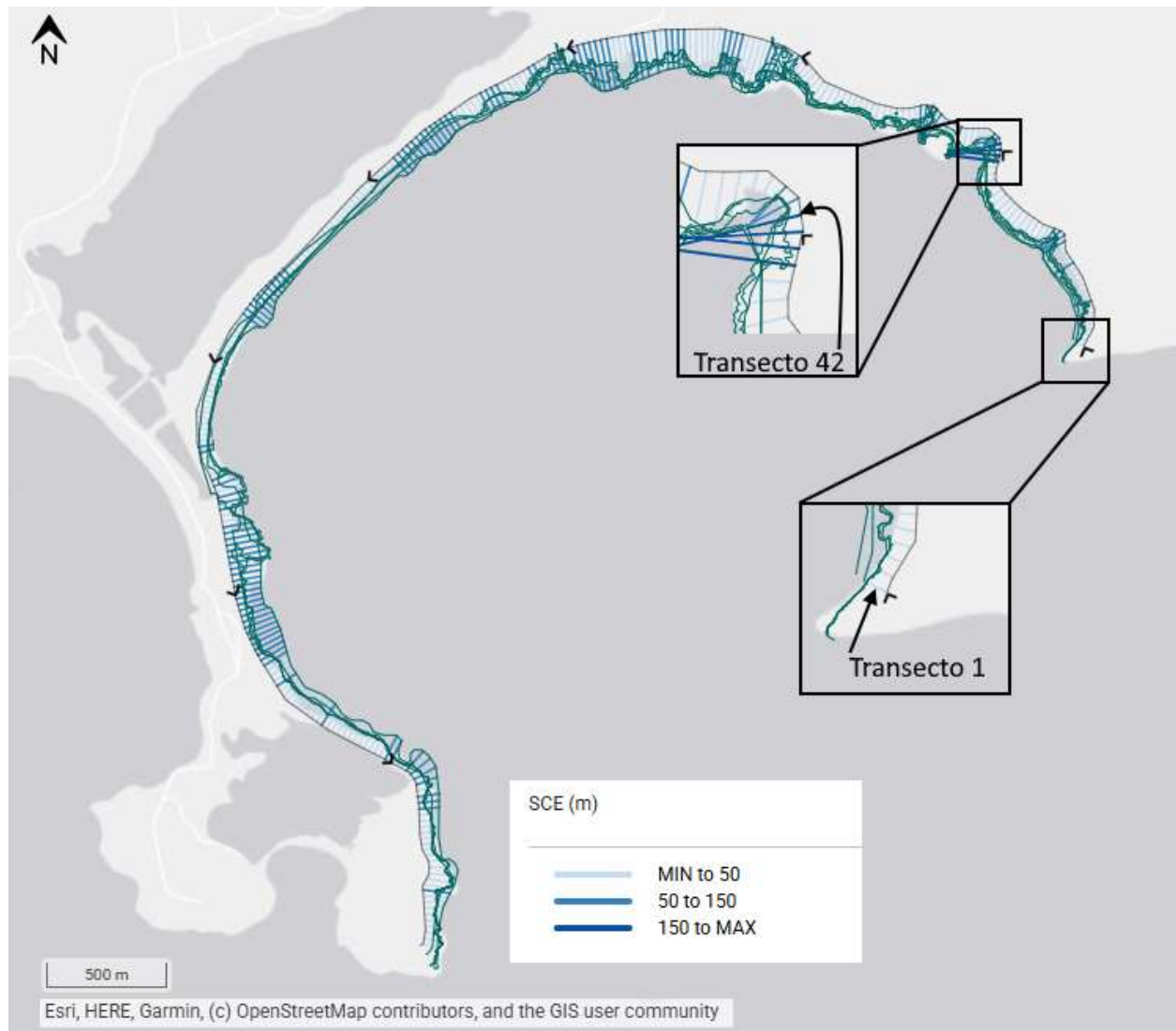
Método de Shoreline Change Envelope (SCE) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Los colores representan la magnitud del cambio de la línea de costa. El transecto 49 registró el mayor cambio y el transecto 3 el menor. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B1.

Figura 12

Método de Shoreline Change Envelope (SCE) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Los colores representan la magnitud del cambio de la línea de costa. El transecto 42 registró el mayor cambio y el transecto 1 el menor. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B2.

Bahía Salinas: La línea de costa se desplazó en promedio 32.98 metros a lo largo de todos los transectos analizados. El cambio máximo fue registrado en el transecto 49 con un desplazamiento de 166.94 metros. Por otra parte, el transecto 3 experimentó el menor cambio en toda la bahía registrando un desplazamiento de 1.18 metros.

Bahía Sucia: La línea de costa se desplazó en promedio 51.55 metros a lo largo de todos los transectos analizados. El cambio máximo fue registrado en el transecto 42, donde se registró un desplazamiento de 198.19 metros, mientras que el cambio más pequeño lo registró el transecto 1 con un desplazamiento de 4.97 metros.

La mayor magnitud promedio de cambio observada en Bahía Sucia sugiere una mayor variabilidad en la línea de costa en comparación con Bahía Salinas. Sin embargo, dado que el método de SCE no considera la dirección del cambio, estos valores únicamente reflejan la magnitud de la variación en la línea de costa y no permiten determinar si los cambios corresponden a procesos de erosión o acreción.

4.2 Net Shoreline Movement (NSM) y End Point Rate (EPR)

El análisis de *Net Shoreline Movement* (NSM) representa el desplazamiento neto de la línea de costa entre el perfil de costa más antiguo y el más reciente. Este método permite cuantificar la distancia total de cambio costero ocurrido entre los años 2010 y 2025, indicando si el movimiento fue tierra adentro (erosión) o hacia el mar (acreción).

Figura 13

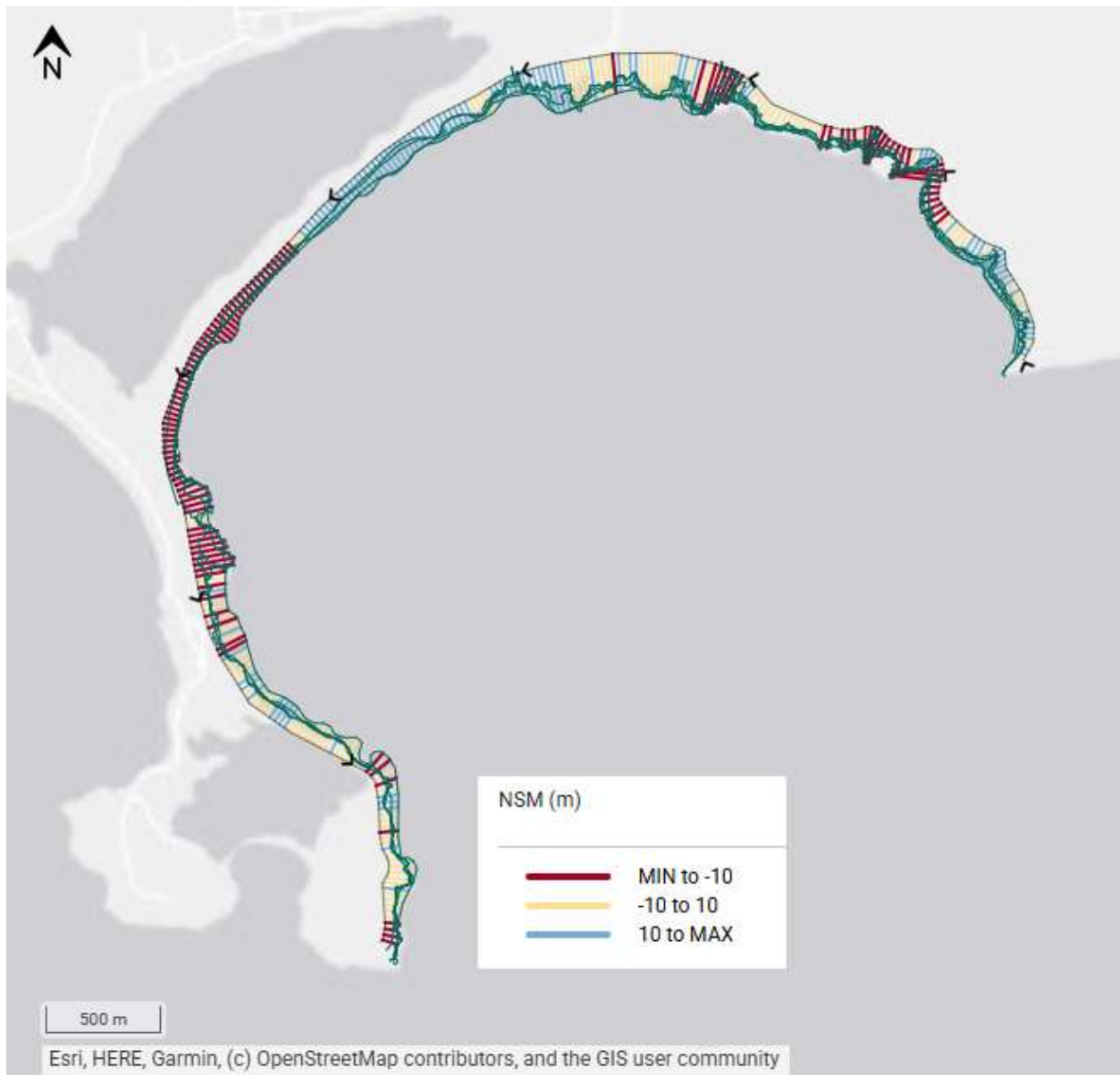
Método de Net Shoreline Movement (NSM) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos muestran cambios cercanos a cero, y los azules indican acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B3.

Figura 14

Método de Net Shoreline Movement (NSM) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos muestran cambios cercanos a cero y los azules indican acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6,

Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B4.

Bahía Salinas: De los 150 transectos analizados, 132 evidenciaron acreción (88.00%), mientras que 18 presentaron erosión (12.00%). El promedio de las distancias positivas (acreción) fue de 22.60 metros y el promedio de distancias negativas (erosión) fue de -5.20 metros. El transecto 54 registró la mayor acreción, con un desplazamiento de 141.07 metros hacia el mar, mientras que el transecto 83 presentó la mayor erosión, con un desplazamiento de -12.12 metros tierra adentro. En la Figura 8 se observa que las áreas sin cambios significativos y los transectos que registraron acreción predominan a lo largo de la costa, mientras que los eventos de erosión se presentan de forma más limitada.

Bahía Sucia: De los 313 transectos analizados, 165 mostraron acreción (52.72%) y 148 registraron erosión (47.28%). El promedio de las distancias positivas (acreción) fue de 22.55 metros, mientras que el promedio de distancias negativas (erosión) fue de -34.59 metros. El transecto 115 registró la mayor acreción, con un desplazamiento de 114.39 metros hacia el mar, mientras que el transecto 39 presentó la máxima erosión, con un desplazamiento de -167.79 metros tierra adentro. En la Figura 9 se puede observar que los transectos con acreción y erosión se distribuyen en diversos sectores de la bahía, siendo el sector oeste de la bahía el que presenta la mayor concentración de transectos erosivos.

El análisis de *End Point Rate* (EPR) mide la tasa promedio de cambio de la línea de costa por año, calculada dividiendo la distancia neta de cambio (NSM) entre el intervalo de tiempo entre el primer y último año de observación (2010 y 2025 en este estudio). Este método permite cuantificar la velocidad y dirección del cambio costero ya sea erosión o acreción, durante el periodo analizado.

Figura 15

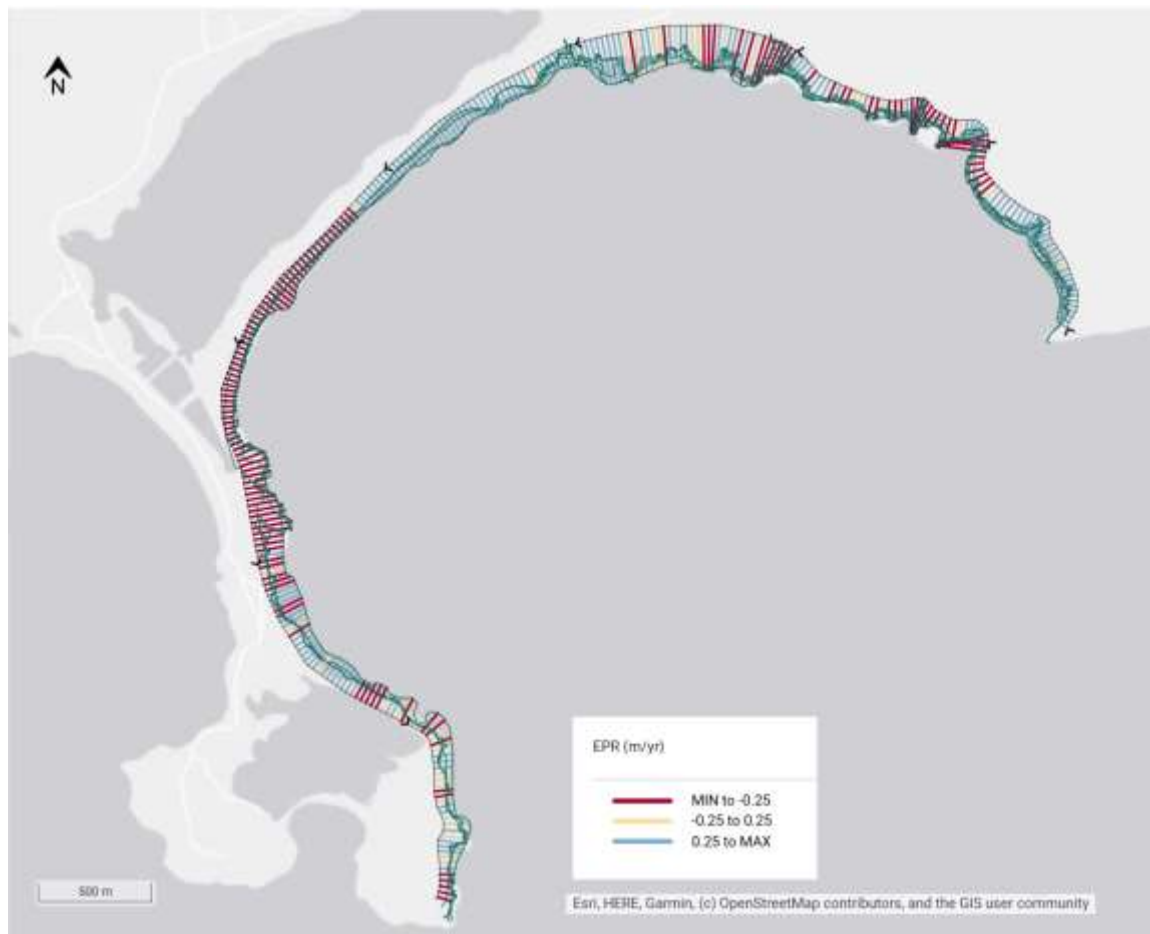
Método de End Point Rate (EPR) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B5.

Figura 16

Método de End Point Rate (EPR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B6.

Bahía Salinas: De los 150 transectos, 18 mostraron erosión (12.00%), de los cuales un 4.00% se consideraron estadísticamente significativos. El promedio de las tasas de erosión fue de -0.44 metros/año, siendo el transecto 45 el que presentó la mayor erosión con una pérdida de costa de -

1.22 metros/año. Por otro lado, 132 transectos (88.00%) evidenciaron acreción, de los cuales un 50.67% fueron estadísticamente significativos. El promedio de las tasas de acreción fue 1.49 metros/año, siendo el transecto 54 el que presentó la mayor acreción con un desplazamiento de 9.32 metros/año.

En general, la tasa de cambio promedio para Bahía Salinas fue de 1.26 ± 0.10 metros/año, lo que indica que la línea de costa ha avanzado hacia el mar a una tasa promedio de 1.26 metros por año durante el periodo estudiado.

Bahía Sucia: De los 313 transectos analizados, 148 (47.28%) presentaron erosión, de los cuales 34.82% se consideraron estadísticamente significativos. El transecto 39 registró la mayor pérdida de costa, con un desplazamiento tierra adentro de -10.55 metros/año, mientras que el promedio de las tasas erosivas fue -2.21 metros/año. Los transectos que registran eventos de erosión se distribuyen a lo largo de la bahía. Por otro lado, 165 transectos presentaron acreción, representando un 52.72% del total, de los cuales 30.67% fueron estadísticamente significativos. El transecto 115 fue el que presentó la mayor acreción con un desplazamiento hacia el mar de 7.19 metros/año, mientras que el promedio de las tasas acrecionales fue de 1.42 metros/año.

En promedio, la línea de costa de Bahía Sucia retrocedió 0.30 metros por año durante el periodo 2010-2025, con una tasa de cambio de -0.30 ± 0.06 metros/año. Aunque un mayor número de transectos mostró tendencias acrecionales, las tasas de erosión registradas presentaron mayores magnitudes, lo que resultó en una tendencia erosiva neta en la línea de costa durante el periodo analizado.

Estos resultados indican que Bahía Salinas presenta una tendencia acrecional, mientras que Bahía Sucia muestra una tendencia erosiva neta, atribuida a la mayor magnitud de pérdida de costa registrada en los transectos erosivos.

4.3 Linear Regression Rate (LRR) y Weighted Linear Regression (WLR)

El análisis de *Linear Regression Rate* (LRR) estima la tasa promedio anual de cambio de la línea de costa considerando todas las posiciones históricas, mediante el ajuste de una regresión lineal. Este método nos permite identificar la tendencia general de cambio de la costa a lo largo del periodo estudiado, considerando todas las posiciones históricas disponibles, y no solo el desplazamiento entre el inicio y el final del período.

Figura 17

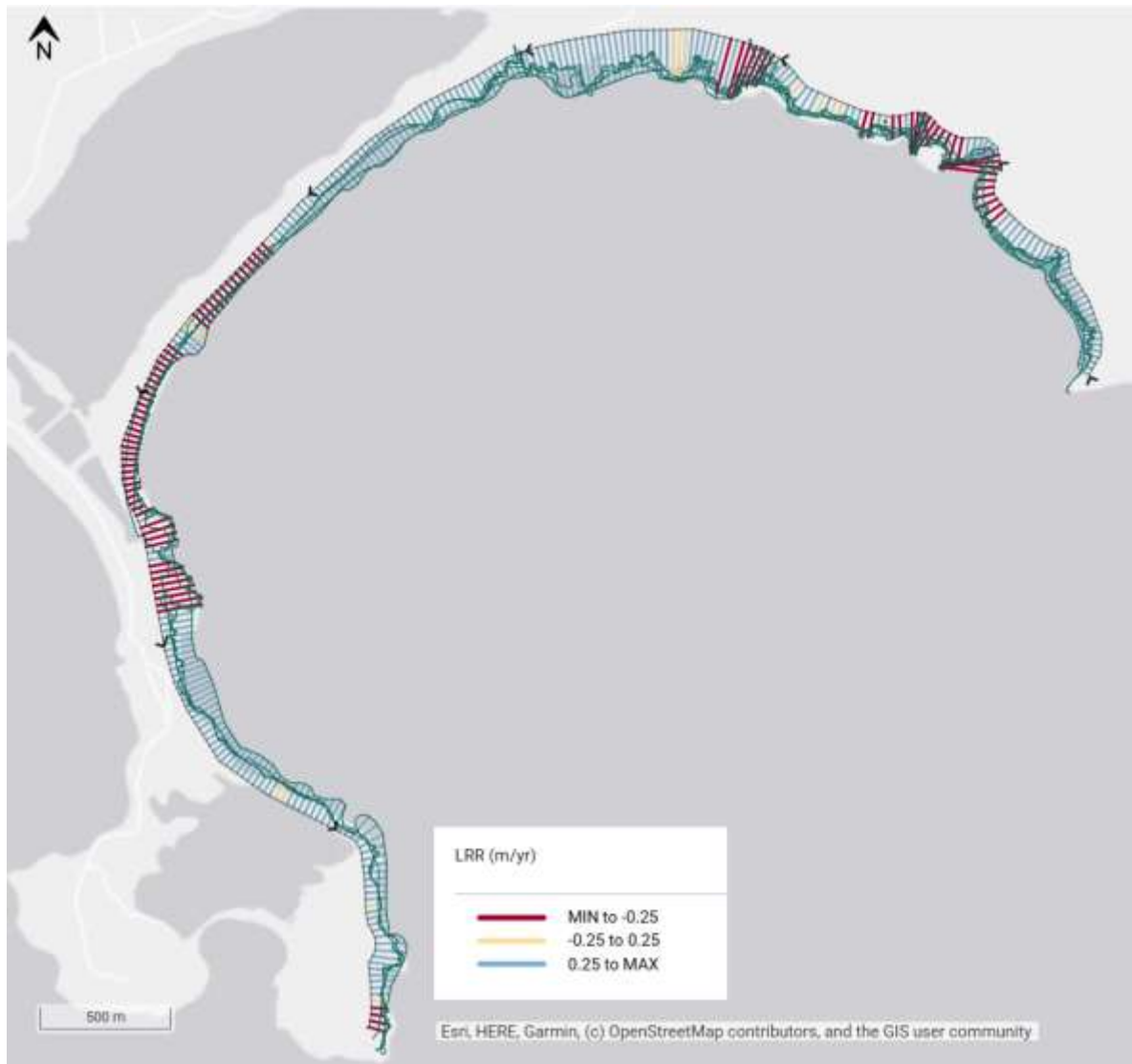
Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. El mapa Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B7.

Figura 18

Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. El mapa Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B8.

Bahía Salinas: De los 150 transectos, 12 mostraron erosión, lo que representa un 8.00% del total. Sin embargo, ninguno de los 12 transectos fue considerado estadísticamente significativo por DSAS. El transecto 45 presentó la mayor tasa erosiva con un desplazamiento de -2.00 metros/año, mientras que el promedio de las tasas de erosión fue de -0.77 metros/año. Por otro lado, 138 transectos (92.00%) evidenciaron acreción, de los cuales un 21.33% se consideró estadísticamente significativo. El transecto 49 presentó la mayor tasa de acreción con un desplazamiento de 11.24 metros/año, y el promedio de las tasas acrecionales fue de 1.83 metros/año.

El promedio general de la tasa de cambio para Bahía Salinas fue de 1.63 metros/año, indicando una tendencia acrecional. No obstante, el promedio de los intervalos de confianza asociados fue de 4.81 metros/año, lo que refleja una alta variabilidad entre los transectos analizados. Al considerar únicamente los 18.16 transectos independientes determinados por DSAS, la incertidumbre del promedio se estimó en ± 1.13 metros/año, resultando en una tasa promedio de cambio de 1.63 ± 1.13 metros/año.

Bahía Sucia: De los 312 transectos analizados, 99 mostraron erosión, lo que representa un 31.73%, aunque solo un 3.21% de estos resultados fue estadísticamente significativo. El transecto 40 registró la mayor erosión con un desplazamiento de -10.65 metros/año, mientras que el promedio de las tasas erosivas fue de -2.39 metros/año. Por otra parte, 213 transectos (68.27%) mostraron acreción, de los cuales un 8.33% resultó estadísticamente significativo. El transecto 115 presentó la mayor tasa de acreción con un desplazamiento de 8.39 metros/año, mientras que el promedio de las tasas acrecionales fue de 1.93 metros/año.

El promedio de la tasa de cambio fue de 0.56 metros/año, lo que sugiere una tendencia acrecional menor que la observada en Bahía Salinas. Sin embargo, el promedio de los intervalos

de confianza asociados fue de 5.95 metros/año, lo que indica una alta variabilidad espacial entre los transectos analizados. Al considerar únicamente los 30.52 transectos independientes determinados por DSAS, la incertidumbre del promedio se estimó en ± 1.08 metros/año, resultando en un cambio promedio de 0.56 ± 1.08 metros/año.

El análisis de *Weighted Linear Regression* (WLR) estima la tasa de cambio promedio anual de la línea de costa, al igual que el método LRR, pero asignando mayor peso a las líneas de costa con menor incertidumbre posicional. Este método permite obtener una estimación más precisa del cambio cuando existen diferencias en la calidad o exactitud de las líneas de costa utilizadas.

Figura 19

Método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. El mapa Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B9.

Figura 20

Método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Los transectos en rojo representan erosión, los amarillos indican cambios cercanos a cero y los azules muestran acreción. Captura de pantalla modificada de la captura de pantalla de los resultados de DSAS. del programa *Digital Shoreline Analysis System*, 2026 versión 6, Himmelstoss et. al (2024); utilizando el programa Paint.Net versión 5.1.12. El mapa Ver la captura de pantalla original en el apéndice B, Figura B10.

Bahía Salinas: De los 150 transectos analizados, 21 presentaron erosión para un total de 14.00%. Sin embargo, ninguno de estos se consideró estadísticamente significativo. El transecto 57 fue el que experimentó la mayor pérdida de costa registrando un desplazamiento de -1.12 metros/año, mientras que el promedio de las tasas erosivas fue de -0.36 metros/año. Por otra parte, 129 transectos (86.00%) mostraron acreción, de los cuales un 15.33% fue considerado estadísticamente significativo. El transecto 47 presentó la mayor acreción con un desplazamiento de 4.43 metros/año, mientras que el promedio de las tasas acrecionales fue de 0.97 metros/año.

El promedio de los intervalos de confianza asociados fue de 6.35 metros/año, lo que indica variabilidad espacial. Considerando solo los 18.86 transectos independientes seleccionados por DSAS, la incertidumbre del promedio se estimó en ± 1.46 metros/año, resultando en una tasa de cambio promedio de 0.79 ± 1.46 metros/año. Esto sugiere que, aunque la tendencia general es acrecional, la magnitud del cambio es pequeña en comparación con la incertidumbre y de igual forma que en el análisis LRR, no se puede afirmar con certeza si hubo acreción significativa. No obstante, en términos generales, Bahía Salinas exhibe una costa con mayor estabilidad y con una tendencia leve a la acreción durante el periodo de estudio.

Bahía Sucia: De los 312 transectos analizados, 144 (46.15%) presentaron erosión, pero solo un 2.88% fue estadísticamente significativo. El transecto 41 registró la mayor pérdida de costa con un desplazamiento de -20.76 metros/año, mientras que el promedio de las tasas erosivas fue de -1.83 metros/año. En cambio, 168 transectos (53.85%) mostraron acreción, siendo el 0.96% estadísticamente significativos. El transecto 115 mostró la mayor acreción con un valor de 10.34 metros/año, mientras que el promedio de las tasas acrecionales fue de 1.40 metros/año.

El promedio de los intervalos de confianza asociados fue de 6.05 metros/año, lo que refleja variabilidad en las tasas individuales. DSAS seleccionó 64.38 transectos individuales y la incertidumbre del promedio se estimó en ± 0.75 metros/año, resultando en una tasa de cambio promedio de -0.09 ± 0.75 metros/año.

Al comparar ambas bahías, los resultados nos indican que Bahía Salinas presenta una costa relativamente estable con una leve tendencia acrecional, mientras que Bahía Sucia muestra una mayor variabilidad en las tasas de cambio, con una tendencia cercana a la estabilidad o ligeramente erosiva.

Es importante señalar que los métodos WLR y LRR producen estimaciones más confiables cuando se dispone de una amplia serie temporal de líneas de costa, ya que la regresión lineal se ajusta sobre múltiples posiciones históricas. En este estudio se utilizaron cinco fechas de línea de costa (2010, 2015 y 2018, 2022 y 2025), lo cual incrementa la incertidumbre y limita la precisión estadística de las tasas obtenidas mediante estos dos métodos.

Capítulo V.

Conclusión y Recomendaciones

El presente estudio analizó los cambios en la línea de costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia durante el periodo entre 2010 y 2025. Para ello, se utilizaron los programas *Quantum Geographic Information System* (QGIS) para la visualización, corrección y extracción de datos, y *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para el análisis de estos mediante la cuantificación de las tasas de erosión y acreción costera.

Los resultados indican que Bahía Salinas presenta una tendencia general hacia la estabilidad costera, con procesos leves de acreción. La mayoría de los transectos analizados mostraron desplazamientos positivos de la línea de costa, mientras que los procesos erosivos identificados fueron limitados y no resultaron estadísticamente significativos. Por otro lado, Bahía Sucia evidenció una mayor variabilidad espacial en los cambios de la línea de costa, mostrando zonas tanto de acreción como de erosión, lo que refleja una dinámica costera más activa. Un hallazgo notable en Bahía Sucia es que, aunque la mayoría de los transectos mostraron procesos de acreción, la erosión registrada fue de mayor magnitud, lo que resultó en una tasa de cambio neta con tendencia erosional. Para ambas bahías, la tasa de cambio obtenida mediante el método EPR se considera confiable, ya que en ambos casos la incertidumbre registrada fue baja. Por otra parte, el método LRR mostró una leve tendencia acrecional en Bahía Sucia, lo que evidencia la sensibilidad de este análisis a la distribución temporal de los datos, especialmente en series cortas. Sin embargo, este resultado no se considera evidencia principal, debido a su alta incertidumbre y a los bajos porcentajes de significancia estadística.

Los resultados de esta investigación permitieron identificar zonas de erosión y acreción costera en Bahía Salinas y Bahía Sucia, así como determinar los cambios en el litoral costero,

contribuyendo al entendimiento de la dinámica costera en el suroeste de Puerto Rico. Asimismo, proveen información útil para la planificación, el manejo y la conservación de estas zonas costeras. Estos hallazgos también establecen una línea base de referencia que puede ser utilizada en la toma de decisiones para la gestión costera, así como en la implementación de medidas de adaptación ante el cambio climático y otros procesos naturales y antropogénicos, especialmente en áreas vulnerables. Además, esta investigación puede servir como base para futuros estudios y para la validación del uso de herramientas como DSAS y QGIS.

La serie temporal de datos incluyó cinco líneas de costa correspondientes a los años 2010, 2015, 2018, 2022 y 2025. Aunque esta información permitió estimar tendencias generales de cambio, la cantidad limitada de fechas incrementa la incertidumbre asociada a los análisis de regresión lineal aplicados en los métodos de LRR y WLR. Por esta razón, se recomienda que estudios futuros incorporen series temporales más extensas para mejorar la precisión de las estimaciones.

Además, se sugiere continuar con el monitoreo de la línea de costa de ambas bahías, considerando posibles escenarios de cambio climático, aumento en el nivel de mar y eventos climáticos extremos como huracanes y marejadas ciclónicas. Futuros estudios podrían integrar información adicional, como la dinámica de oleaje, cambios en el terreno costero y eventos climáticos extremos. Esto permitirá comprender mejor los factores que influyen en los cambios observados en el litoral costero. En adición, se recomienda llevar a cabo investigaciones que estudien posibles cambios en la costa de Bahía Salinas y Bahía Sucia en 25, 50 y 100 años. Esta información será clave para la creación de estrategias de mitigación ante posibles escenarios de erosión costera, así como para generar ideas de conservación y protección de estas zonas costeras

con el fin de proteger los ecosistemas, la biodiversidad, las comunidades aledañas, y para el disfrute de futuras generaciones.

Referencias

- Associate Press. (2023, octubre 1). *Los glaciares: una de las víctimas obvias y tempranas del cambio climático*. <https://www.metro.pr/noticias/2023/10/02/los-glaciares-una-de-las-victimas-obvias-y-tempranas-del-cambio-climatico/>
- Azizan, N.N., Rahim, H.A., Adnan, N.A., Razali, R., Mohd, F.A., y Ariffin, E.H. (2024). Assessment of Shoreline Changes at Northern Selangor Coast, Malaysia using Digital Shoreline Analysis System (DSAS). *Journal of Advance Geospatial Science & Technology*, 4(2), 79-103. <https://jagst.utm.my/index.php/jagst/article/view/97>
- Bierman, P. R., y Montgomery, D. R. (2014). *Key concepts in geomorphology*. 2da edición. W.H. Freeman and Company (Macmillan Learning).
<https://www.scribd.com/document/835037602/Paul-R-Bierman-David-R-Montgomery-Key-Concepts-in-Geomorphology-W-H-Freeman-2019>
- Coastal Zone Management Act, 16 U.S.C. § 1451 (1972). <https://coast.noaa.gov/czm/act/>
- Collazo, J.A., Harrington, B.A., Gear, J.S., y Colón, J.A. (1995). Abundance and Distribution of Shorebirds at the Cabo Rojo Salt Flats, Puerto Rico. *Journal of Field Ornithology*, 66(3), pp. 424-438. <https://www.jstor.org/stable/4514040>
- Colon, D. (2015). Shoreline Changes in the West Coast of Puerto Rico as Determined by Remote Sensing Techniques and their Correlation to Changes in the Diversity of Shell-Mollusks. *Research Gate*. https://www.researchgate.net/profile/Dimaris-Colon/publication/303855863_Shoreline_Changes_in_the_West_Coast_of_Puerto_Rico_as_Determined_by_Remote_Sensing_Techniques_and_their_Correlation_to_Changes_in_the_Diversity_of_Shell-Mollusks/links/5758409708ae414b8e3f55c2/Shoreline-

Changes-in-the-West-Coast-of-Puerto-Rico-as-Determined-by-Remote-Sensing-
Techniques-and-their-Correlation-to-Changes-in-the-Diversity-of-Shell-Mollusks.pdf

Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *The Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA). (2015). Reglamento para el aprovechamiento, vigilancia, conservación y administración de las aguas territoriales, los terrenos sumergidos bajo estas y la zona marítimo-terrestre (Reglamento Núm. 4860). <https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2015/10/REGLAMENTO-4860-Version-Completa-y-enmiendas-Agosto-2015.pdf>

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA). (10 de noviembre, 2022). *Titular de las agencias ambientales anuncia otorgación de \$ 5 millones para la restauración de las salinas de Cabo Rojo*. <https://www.drna.pr.gov/avisos/titular-de-las-agencias-ambientales-anuncia-otorgacion-de-fondos-para-restaurar-las-salinas-de-cabo-rojo/>

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020). Landsat 8-9 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6>.

Endangered Species Act, 16 U.S.C. 1531-1544 (1973). <https://www.fws.gov/law/endangered-species-act>

Estudios Técnicos Inc. (2023). Análisis espacial y económico: comunidades, infraestructura y biodiversidad en riesgo. https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2023/03/AnalisisEspacialEconomico_ComunidadesEnRiesgo.pdf

Gao, Bo-Cai. (1996). NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. Elsevier, 58(3). pp. 257-266.

[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

García Escalera, I.A., Rivera López, C.F., y Marrero López, T. (2020). Mortalidad de mangles en Cabo Rojo. *Marejada*, 18(2), pp. 25-30.

https://issuu.com/seagrantpr/docs/marejada_vol_18_num_2

Grupo de trabajo del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI-PR). (2022, 7 de diciembre). *PR: El estado de las playas de Puerto Rico Post-María* [Story Map]. ArcGIS Story Maps.

<https://storymaps.arcgis.com/stories/61653d2d9a1748168488235d866f3e89>

Grupo de trabajo del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI-PR). (2022b, 27 de abril). *PR: El estado de las playas de Puerto Rico Post-María Grupo-4* [Story Map]. ArcGIS Story Maps.

<https://storymaps.arcgis.com/stories/cfb881871c384069ab59621e58492f1c>

Grupo de trabajo del Instituto de Investigación y Planificación Costera de Puerto Rico (CoRePI-PR). (2021, 10 de febrero). *PR: El estado de las playas de Puerto Rico Post-María Grupo-1* [Story Map]. ArcGIS Story Maps.

Henderson, R.E., Heslin, J.L., Himmelstoss, E.A., y Barreto-Orta, M. (2024). National Shoreline Change: Summary Statistics for Vector Shorelines from the Early 1900s to the 2010s for Puerto Rico. (Data Report 1191). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/dr1191>

Henderson, R.E., Heslin, J.L., and Himmelstoss, E.A. (2021a). Puerto Rico shoreline change — A GIS compilation of shorelines, baselines, intersects, and change rates calculated using the

Digital Shoreline Analysis System version 5.1 (ver. 2.0, March 2023): U.S. Geological Survey data release. <https://doi.org/10.5066/P9FNRRN0>

Henderson, R.E., Heslin, J.L., and Himmelstoss, E.A. (2021b). Puerto Rico shoreline change — A GIS compilation of shorelines, baselines, intersects, and change rates calculated using the Digital Shoreline Analysis System version 5.1 (ver. 2.0, March 2023): U.S. Geological Survey data release. <https://doi.org/10.5066/P9FNRRN0>.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., y Farris, A.S. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide*. (Open-File Report 2021–1091). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Farris, A.S., Kratzmann, M.G., Bartlett, M.K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J.L., y Thieler, E.R. (2024). Digital Shoreline Analysis System version 6.0. U.S. Geological Survey software release. <https://doi.org/10.5066/P13WIZ8M>

Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., y Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), pp.726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>

Ley de la Junta Interagencial para el Manejo de las Playas de Puerto Rico, Ley Núm. 293-1999, 12 L.P.R.A. § 255c (1999). <https://bvirtualogp.pr.gov/ogp/Bvirtual/LeyesOrganicas/pdf/293-1999.pdf>

Ley de Política Pública Ambiental, Ley Núm. 416-2004, 12 L.P.R.A. § 8801 (2004). <https://bvirtualogp.pr.gov/ogp/Bvirtual/leyesreferencia/PDF/416-2004.pdf>

- Marvel, K., Su, W., Delgado, R., Aarons, S., Chatterjee, A., Garcia, M.E., Hausfather, Z., Hayhoe, K., Hence, D.A., Jewett, E.B., Robel, A., Singh, D., Tripathi, A., y Vose, R.S. (2023). Climate trends. En U.S. Global Change Research Program (Ed.), *Fifth National Climate Assessment* (pp.4-41) <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH2>
- McFeeters, S.K. (1996). The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425-1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Minkin, B. (2019). ENVI and Arc GIS to Detect Beach Morphology from Three Beaches in Isabela, Puerto Rico. https://www.uprm.edu/gerslab/wp-content/uploads/sites/214/2023/07/minkin_2019.pdf
- Murry, B.A., Colón-Merced, R.J., Colón-Rivera, R., Fury, C., García Bermúdez, M.A., Herrera-Guinaldo, J.L., Jackson Jr, C.W., Lilyestrom, C., Llerandi-Román, I., Meléndez-Ackerman, E., Melendez-Oyola, M., Monzón-Carmona, O., Platenberg, R., Quiñones, M., Ruiz, H.J., Schärer-Umpierre, M., Stys, B., Swinnerton, K., Toledo-Soto, G., y Vargas, J. (2019). An Overview of the Socio-Ecological System of Cays and Islets in the US Caribbean and Their Vulnerability to Climate Change. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12010-X>
- Olán Martínez, C.D. (2020). Aves en las Salinas de Cabo Rojo. *Marejada*, 18(2), p. 13. https://issuu.com/seagrantpr/docs/marejada_vol_18_num_2
- Olán Martínez, C.D. (2020). Ecosistemas de Las Salinas de Cabo Rojo: Amplia variedad en un mismo espacio. *Marejada*, 18(2), p. 10. https://issuu.com/seagrantpr/docs/marejada_vol_18_num_2

Pérez Rivera, V.A. (2024). Shoreline Analysis of southern Playa Salinas, Cabo Rojo during the last 94 years. https://www.uprm.edu/gerslab/wp-content/uploads/sites/214/2025/02/topico_valeria2b.pdf

QGIS Development Team, (2026). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Runkle, J., Kunkel, K.E., Stevens, L.E., Champion, S.M., Earterling, D.R., Terando, A., Sun, L., Stewart, B.C., Landers, G., y Rayne, S. (2022). Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands State Climate Summary 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <https://statesummaries.ncics.org/chapter/pr/>

Soanes, L.M, Pike, S., Barker D., Butt, C., John, L., Medcalf, K., Naumann, E., Rouse, C., Samuel, C.A., y Mukhida, F. (2023). Opportunity mapping for nature-based solutions: Mitigating storm surge and land erosion in the Caribbean. *Nature-Based Solutions*, 4, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100095>

U.S. Fish and Wildlife Service (2011). Cabo Rojo National Wildlife Refuge Comprehensive Conservation Plan. https://www.fws.gov/sites/default/files/documents/2024-03/cab_2011_ccp_english.pdf

U.S. Geological Survey. (2022). *Landsat 9* [Fact Sheet]. U.S. Department of Interior. <https://doi.org/10.3133/fs20193008>

Apéndice A

Capturas de pantallas del portal Sea Level Viewer

Figura A1

Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar actual



Nota. Captura de pantalla del portal de la NOAA Sea Level Rise Viewer, 2025.

<https://coast.noaa.gov/slr/> Nivel del mar actual. https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor

Figura A2

Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar a 3 pies.



Nota. Captura de pantalla del portal de la NOAA Sea Level Rise Viewer, 2025.

<https://coast.noaa.gov/slr/> Nivel del mar a 3 pies. https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/0/-7478452.380199175/2032490.5205713876/13.933/satellite/none/0.8/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor

Figura A3

Captura de pantalla del portal de Sea Level Rise Viewer. Nivel del mar a 5 pies.



Nota. Captura de pantalla del portal de la *NOAA Sea Level Rise Viewer*, 2025.

<https://coast.noaa.gov/slr/> Nivel del mar a 5 pies [https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/5/-](https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/5/-7477334.995885417/2032408.3517767822/14.028/satellite/none/1/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor)

[7477334.995885417/2032408.3517767822/14.028/satellite/none/1/2050/interHigh/noAccretion/](https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/5/-7477334.995885417/2032408.3517767822/14.028/satellite/none/1/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor)

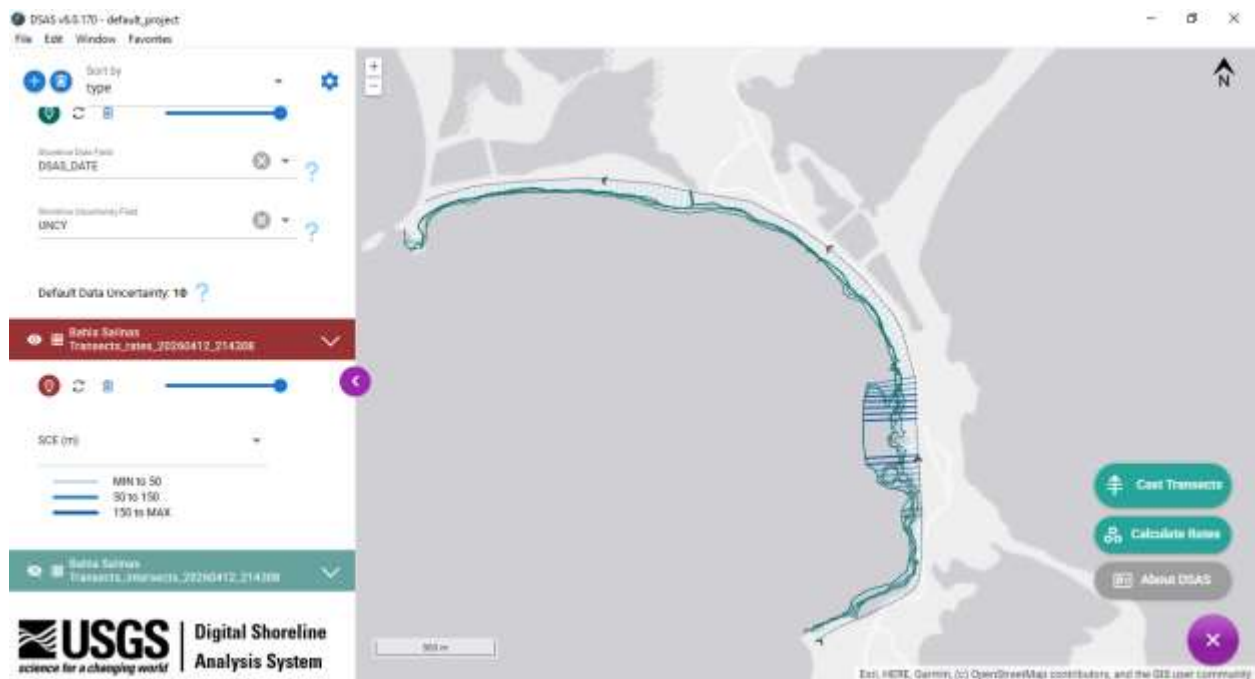
[NOS_Minor](https://coast.noaa.gov/slr/#/layer/slr/5/-7477334.995885417/2032408.3517767822/14.028/satellite/none/1/2050/interHigh/noAccretion/NOS_Minor). Ver la captura original del portal en el apéndice A, figura A3.

Apéndice B

Capturas de pantalla de los resultados del programa DSAS versión 6.0 de Bahía Salinas y Bahía Sucia.

Figura B1

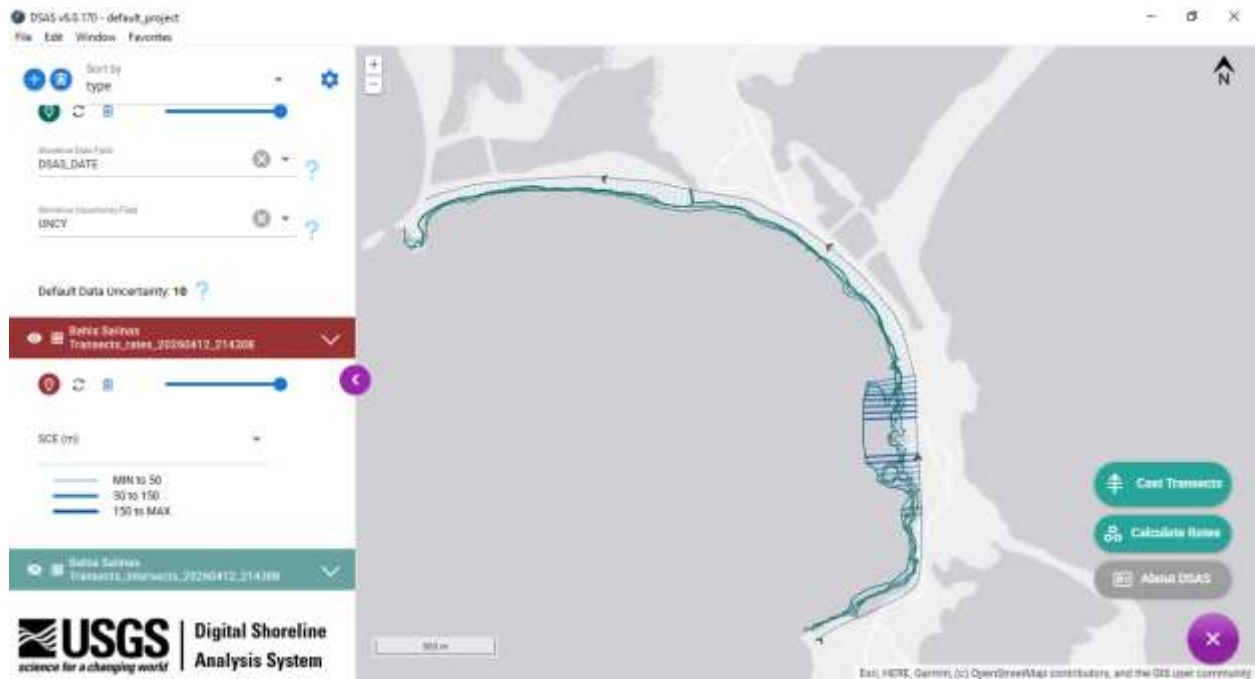
Captura de pantalla del resultado del cálculo del Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Salinas.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Salinas, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B2

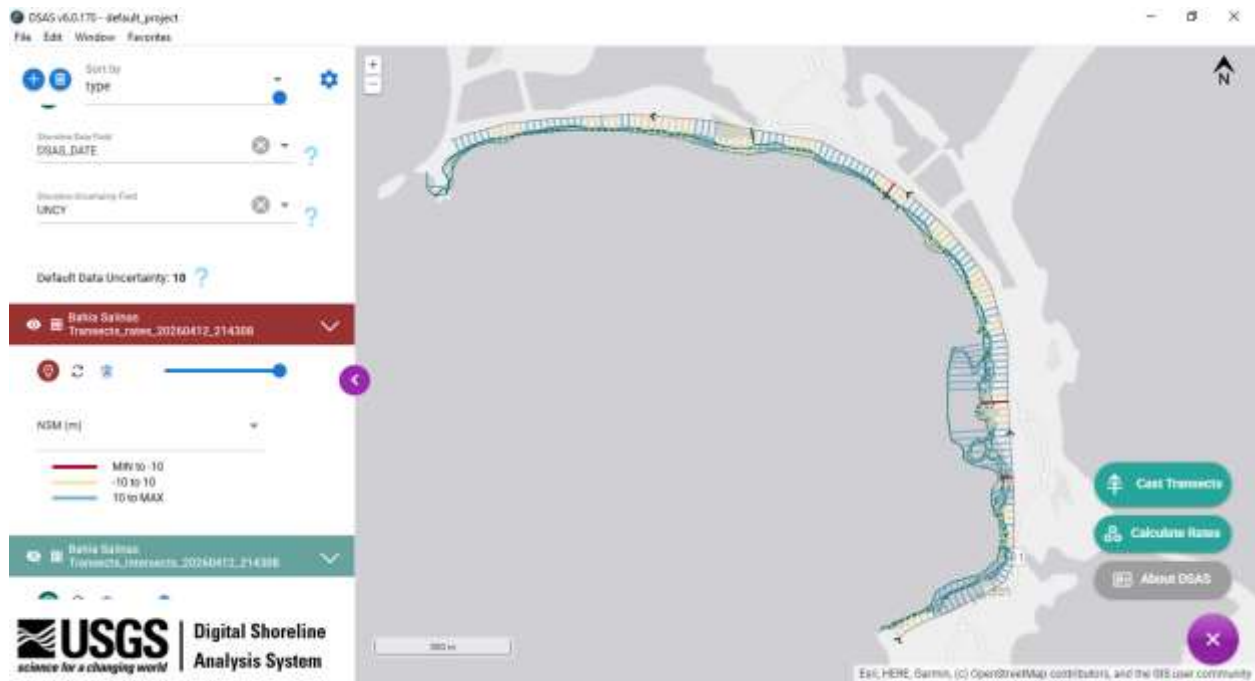
Captura de pantalla del resultado del cálculo de Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Sucia.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Shoreline Change Envelope (SCE) de Bahía Sucia, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B3

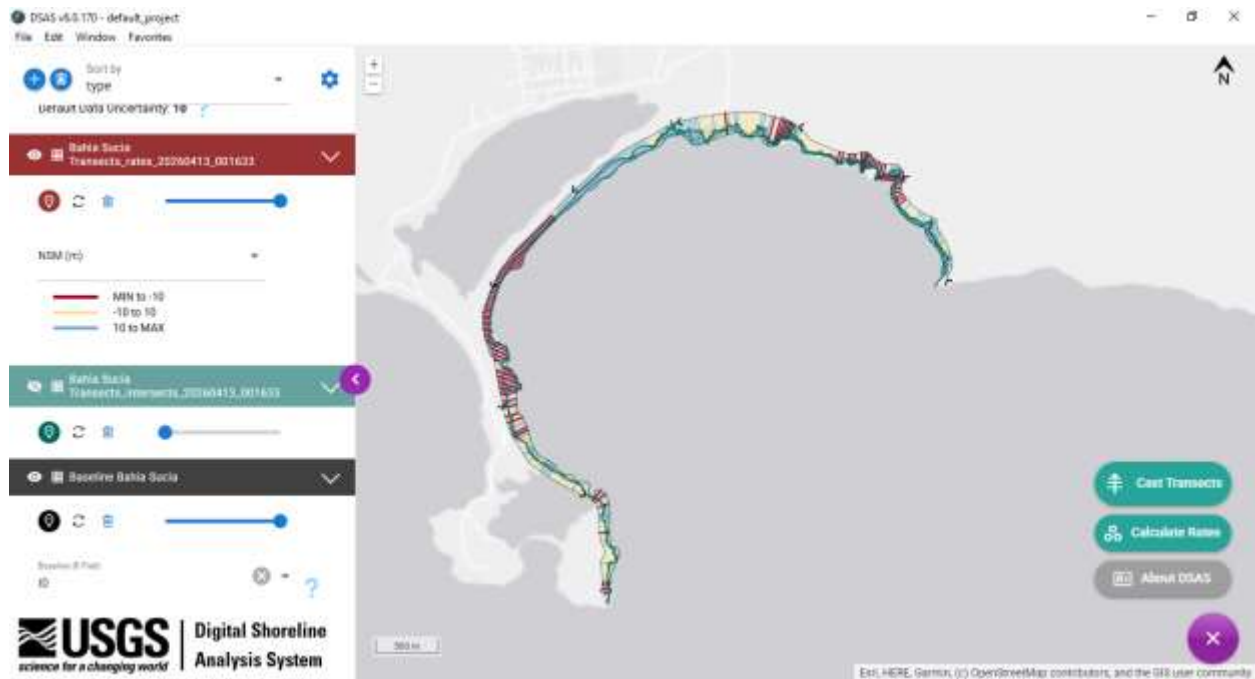
Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Salinas.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Salinas, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B4

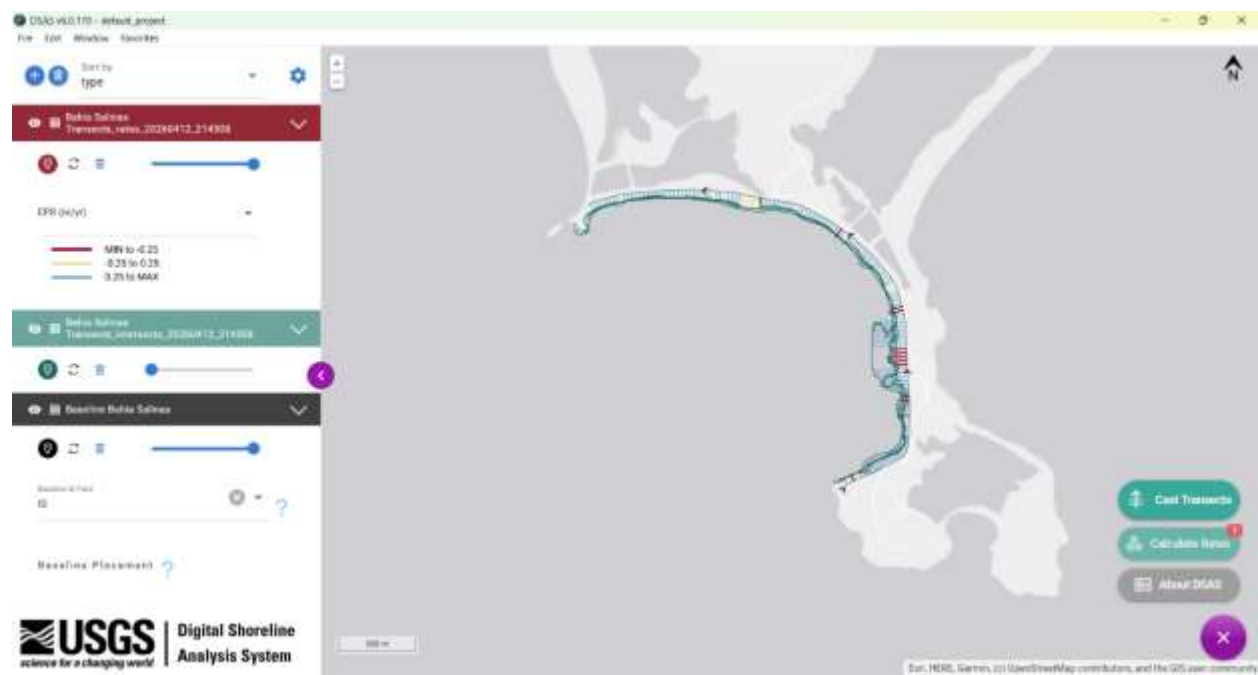
Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Sucia.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de Net Shoreline Movement (NSM) de Bahía Sucia, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B5

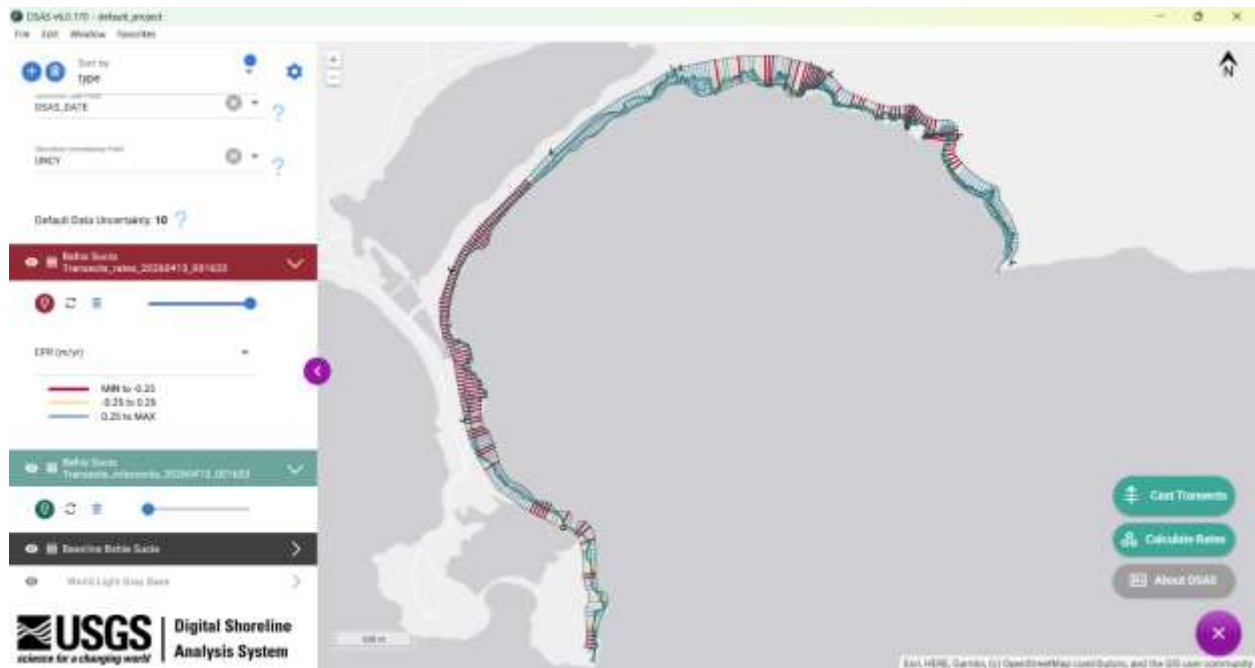
Captura de pantalla del resultado del cálculo de End Point Rate (EPR) de Bahía Salinas.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de End Point Rate (EPR) de Bahía Salinas, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B6

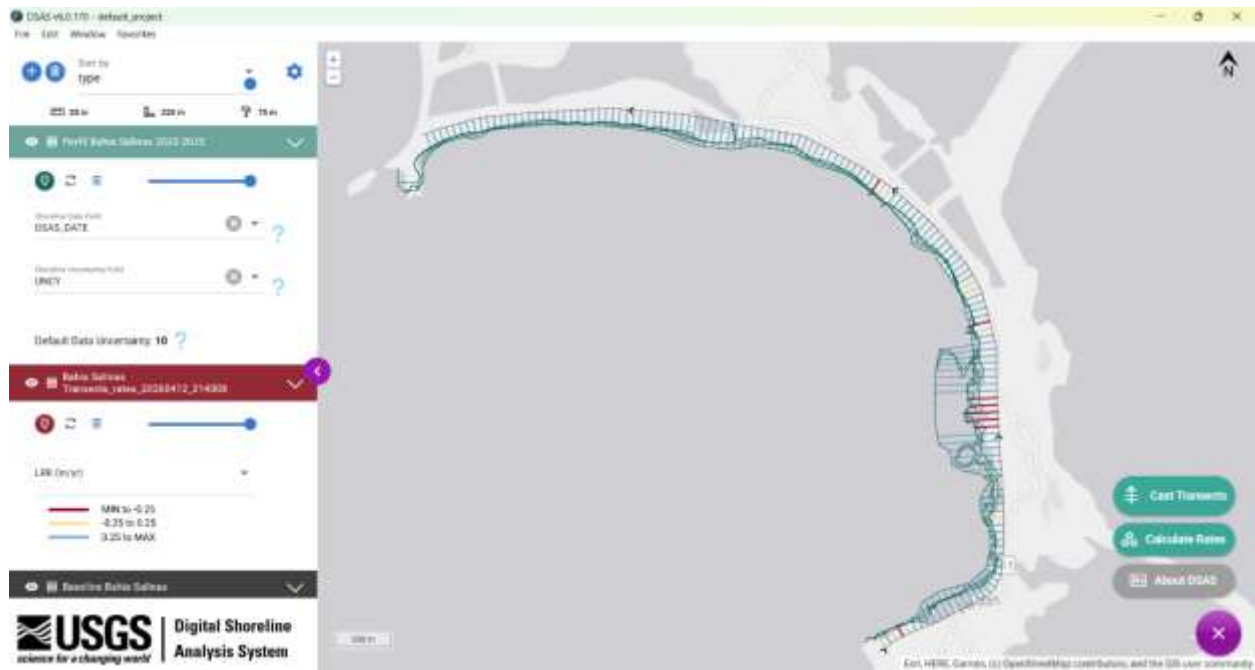
Captura de pantalla del resultado del Método de End Point Rate (EPR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Captura de pantalla del resultado del cálculo de End Point Rate (EPR) de Bahía Sucia, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B7

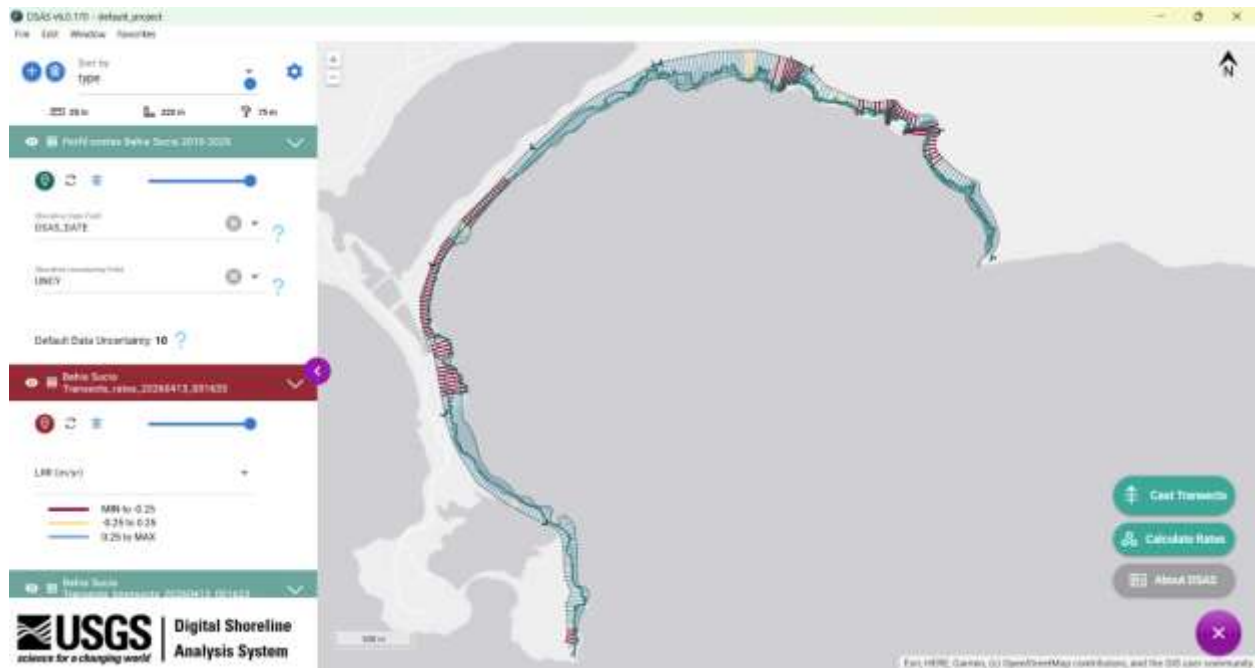
Captura de pantalla del resultado del Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Captura de pantalla del resultado de Método de Linear Regression Rate (LRR) en Bahía Salinas, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B8

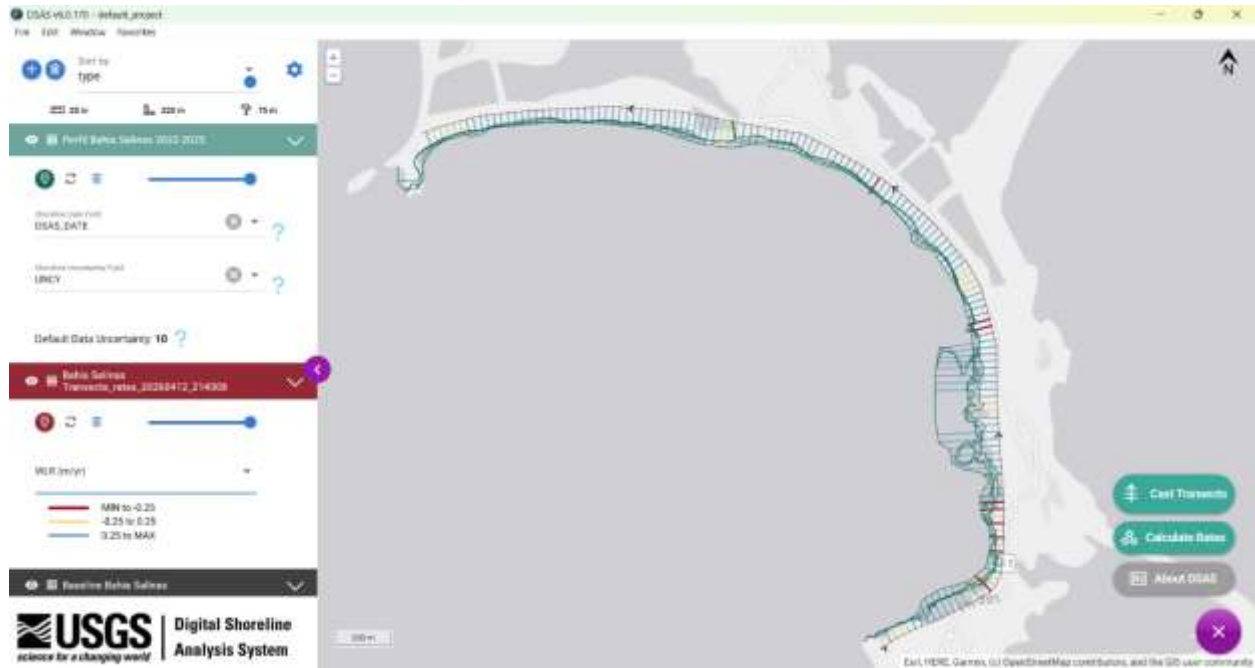
Captura de pantalla del resultado del Método de Linear Regression Rate (LRR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Captura de pantalla del resultado del Método de Linear Regression Rate (LRR) en Bahía Sucia, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B9

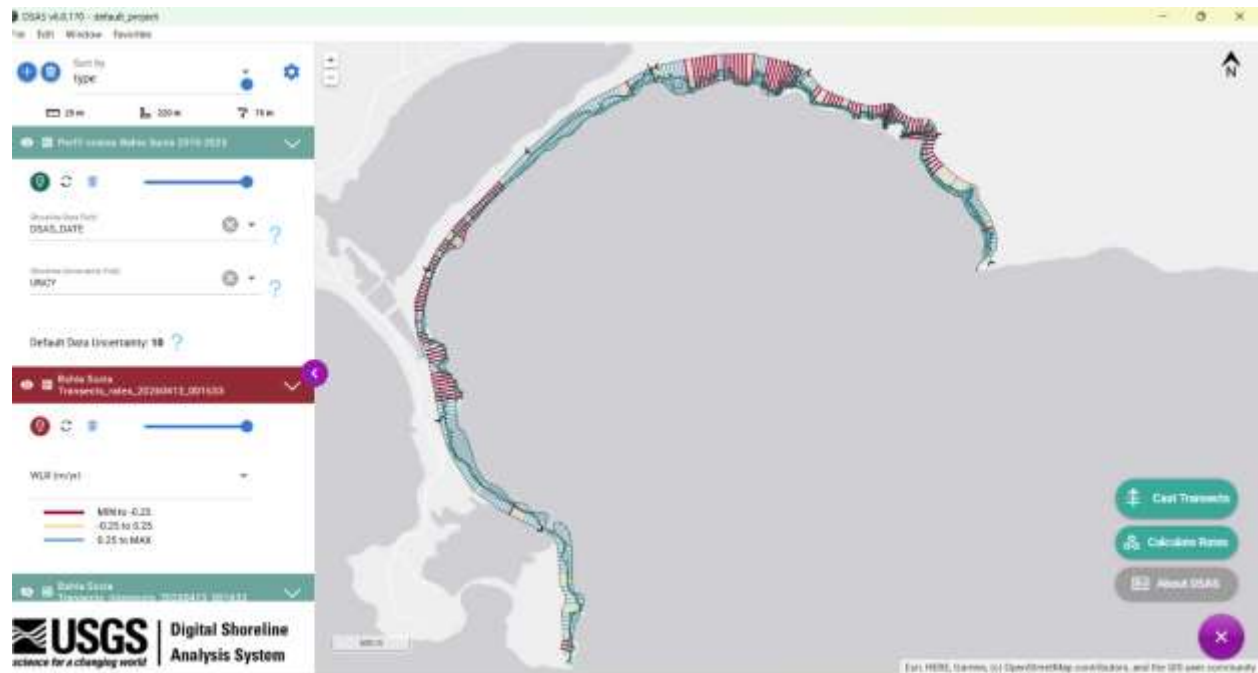
Captura de pantalla del resultado del Método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Salinas.



Nota. Captura de pantalla del resultado del método de Weighted Linear Regression (WLR) en Bahía Salinas, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Figura B10

Captura de pantalla del resultado del método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Sucia.



Nota. Captura de pantalla del resultado del método de Weighted Linear Regression (WLR) implementado en Bahía Sucia, programa DSAS versión 6, Himmelstoss et. al (2024).

Apéndice C

Reporte resumido de los análisis de los perfiles de la costa de Bahía Salinas generado por el programa DSAS versión 6.0.

File name: DSAS_summary_report_20260412_214308.txt

Timestamp of rate calculation: 04/12/2026 21:43:08

DSAS version: 6.0.170

Transects file used to calculate rates: Bahia Salinas

Transects_transects_20260412_213851.geojson

Rate types run: SCE, NSM, EPR, LRR, WLR

Shoreline dates used: 01/01/2010, 05/11/2015, 05/13/2015, 07/21/2018, 08/22/2022, 02/19/2025

Shoreline threshold: 2

Confidence Interval (CI) selected: 95.0%

Default Uncertainty: 10

Transect spacing length: 25

Smoothing distance: 75

Coordinate system: EPSG:6566 / NAD83(2011) / Puerto Rico and Virgin Is.

All rates reported are in meters/year (m/y), distance values are in meters (m).

DISTANCE: SCE (Shoreline Change Envelope, m)

SCE OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 150

average distance: 32.98

maximum distance: 166.94

maximum distance transect ID: 49

minimum distance: 1.18

minimum distance transect ID: 3

DISTANCE: NSM (Net Shoreline Movement, m)

NSM OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 150

average distance: 19.26

number of transects with negative distance: 18

percent of all transects that have a negative distance: 12.00%

maximum negative distance: -12.12

maximum negative distance transect ID: 83

average of all negative distances: -5.20

number of transects with positive distance: 132

percent of all transects that have a positive distance: 88.00%

maximum positive distance: 141.07

maximum positive distance transect ID: 54

average of all positive distances: 22.60

RATE: EPR (End Point Rate, m/yr)

EPR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 150

average rate: 1.26

average of the confidence intervals associated with rates: 0.69

reduced n (number of independent transects): 47.81

uncertainty of the average rate using reduced n: 0.10

average rate with reduced n uncertainty: 1.26 +/- 0.10

number of erosional transects: 18

percent of all transects that are erosional: 12.00%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 4.00%

maximum value erosion: -1.22

maximum value erosion transect ID: 45

average of all erosional rates: -0.44

number of accretional transects: 132

percent of all transects that are accretional: 88.00%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 50.67%

maximum value accretion: 9.32

maximum value accretion transect ID: 54

average of all accretional rates: 1.49

RATE: LRR (Linear Regression Rate, m/yr)

LRR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 150

average rate: 1.63

average of the confidence intervals associated with rates: 4.81

reduced n (number of independent transects): 18.16

uncertainty of the average rate using reduced n: 1.13

average rate with reduced n uncertainty: 1.63 +/- 1.13

number of erosional transects: 12

percent of all transects that are erosional: 8.00%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 0.00%

maximum value erosion: -2.00

maximum value erosion transect ID: 45

average of all erosional rates: -0.77

number of accretional transects: 138

percent of all transects that are accretional: 92.00%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 21.33%

maximum value accretion: 11.24

maximum value accretion transect ID: 49

average of all accretional rates: 1.83

RATE: WLR (Weighted Linear Regression, m/yr)

WLR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 150

average rate: 0.79

average of the confidence intervals associated with rates: 6.35

reduced n (number of independent transects): 18.86

uncertainty of the average rate using reduced n: 1.46

average rate with reduced n uncertainty: 0.79 +/- 1.46

number of erosional transects: 21

percent of all transects that are erosional: 14.00%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 0.00%

maximum value erosion: -1.12

maximum value erosion transect ID: 57

average of all erosional rates: -0.36

number of accretional transects: 129

percent of all transects that are accretional: 86.00%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 15.33%

maximum value accretion: 4.43

maximum value accretion transect ID: 47

average of all accretional rates: 0.97

Apéndice D

Reporte resumido de los análisis de los perfiles de la costa de Bahía Sucia generado por el programa DSAS versión 6.0.

File name: DSAS_summary_report_20260413_001633.txt

Timestamp of rate calculation: 04/13/2026 00:16:33

DSAS version: 6.0.170

Transects file used to calculate rates: Bahia Sucia

Transects_transects_20260413_001545.geojson

Rate types run: SCE, NSM, EPR, LRR, WLR

Shoreline dates used: 01/01/2010, 05/13/2015, 05/15/2015, 05/17/2015, 07/20/2018, 07/21/2018, 12/12/2022, 11/26/2025

Shoreline threshold: 2

Confidence Interval (CI) selected: 95.0%

Default Uncertainty: 10

Transect spacing length: 25

Smoothing distance: 75

Coordinate system: EPSG:6566 / NAD83(2011) / Puerto Rico and Virgin Is.

All rates reported are in meters/year (m/y), distance values are in meters (m).

DISTANCE: SCE (Shoreline Change Envelope, m)

SCE OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 313

average distance: 51.55

maximum distance: 198.19

maximum distance transect ID: 42

minimum distance: 4.97

minimum distance transect ID: 1

DISTANCE: NSM (Net Shoreline Movement, m)

NSM OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 313

average distance: -4.47

number of transects with negative distance: 148

percent of all transects that have a negative distance: 47.28%

maximum negative distance: -167.79

maximum negative distance transect ID: 39

average of all negative distances: -34.59

number of transects with positive distance: 165

percent of all transects that have a positive distance: 52.72%

maximum positive distance: 114.39

maximum positive distance transect ID: 115

average of all positive distances: 22.55

RATE: EPR (End Point Rate, m/yr)

EPR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 313

average rate: -0.30

average of the confidence intervals associated with rates: 0.67

reduced n (number of independent transects): 115.82

uncertainty of the average rate using reduced n: 0.06

average rate with reduced n uncertainty: -0.30 +/- 0.06

number of erosional transects: 148

percent of all transects that are erosional: 47.28%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 34.82%

maximum value erosion: -10.55

maximum value erosion transect ID: 39

average of all erosional rates: -2.21

number of accretional transects: 165

percent of all transects that are accretional: 52.72%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 30.67%

maximum value accretion: 7.19

maximum value accretion transect ID: 115

average of all accretional rates: 1.42

RATE: LRR (Linear Regression Rate, m/yr)

LRR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 312

average rate: 0.56

average of the confidence intervals associated with rates: 5.95

reduced n (number of independent transects): 30.52

uncertainty of the average rate using reduced n: 1.08

average rate with reduced n uncertainty: 0.56 +/- 1.08

number of erosional transects: 99

percent of all transects that are erosional: 31.73%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 3.21%

maximum value erosion: -10.65

maximum value erosion transect ID: 40

average of all erosional rates: -2.39

number of accretional transects: 213

percent of all transects that are accretional: 68.27%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 8.33%

maximum value accretion: 8.39

maximum value accretion transect ID: 115

average of all accretional rates: 1.93

RATE: WLR (Weighted Linear Regression, m/yr)

WLR OVERALL AVERAGES:

total number of transects: 312

average rate: -0.09

average of the confidence intervals associated with rates: 6.05

reduced n (number of independent transects): 64.38

uncertainty of the average rate using reduced n: 0.75

average rate with reduced n uncertainty: -0.09 +/- 0.75

number of erosional transects: 144

percent of all transects that are erosional: 46.15%

percent of all transects that have statistically significant erosion: 2.88%

maximum value erosion: -20.76

maximum value erosion transect ID: 41

average of all erosional rates: -1.83

number of accretional transects: 168

percent of all transects that are accretional: 53.85%

percent of all transects that have statistically significant accretion: 0.96%

maximum value accretion: 10.34

maximum value accretion transect ID: 115

average of all accretional rates: 1.40