

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**CAMBIOS EN LA COBERTURA Y DISTRIBUCIÓN DE MANGLARES  
O HUMEDALES EN EL SITIO RAMSAR BARRA DE SANTIAGO,  
AHUACHAPÁN USANDO SERIES TEMPORALES EN EL PERIODO  
2015-2023**

PRESENTADO POR:

**ROCIO BEATRIZ BONILLA MELGAR**

**RONALDO ANTONIO SALGADO FLAMENCO**

**JONATHAN ALBERTO ZÚNIGA RAMÍREZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2024

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA**

SECRETARIO GENERAL:

**LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

SECRETARIO:

**ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

DIRECTOR INTERINO:

**ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Titulo:

**CAMBIOS EN LA COBERTURA Y DISTRIBUCIÓN DE MANGLARES  
O HUMEDALES EN EL SITIO RAMSAR BARRA DE SANTIAGO,  
AHUACHAPÁN USANDO SERIES TEMPORALES EN EL PERIODO  
2015-2023**

Presentado por:

**ROCIO BEATRIZ BONILLA MELGAR**

**RONALDO ANTONIO SALGADO FLAMENCO**

**JONATHAN ALBERTO ZÚNIGA RAMÍREZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**PhD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ**

SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2024

Trabajo de Graduación Aprobado por:

**Docente Asesor:**

**PhD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ**


## NOTA Y DEFENSA FINAL


En esta fecha, viernes 6 de septiembre de 2024, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle  
Director Interino

  
Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

  
Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

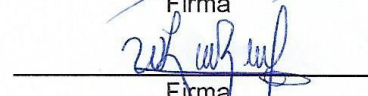
- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ  
(Docente Asesor)

  
Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE

  
Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS

  
Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

CAMBIOS EN LA COBERTURA Y DISTRIBUCIÓN DE MANGLARES O HUMEDALES EN EL SITIO RAMSAR BARRA DE SANTIAGO, AHUACHAPÁN USANDO SERIES TEMPORALES EN EL PERIODO 2015 -2023

A cargo de los Bachilleres:

- BONILLA MELGAR ROCÍO BEATRIZ
- SALGADO FLAMENCO RONALDO ANTONIO
- ZÚNIGA RAMÍREZ JONATHAN ALBERTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

*(Ocho punto dos)*

8.2

## **Agradecimientos**

Quisiera dedicar un agradecimiento muy especial a mi madre, Beatriz Melgar. Su amor incondicional, apoyo constante y comprensión han sido el pilar fundamental en cada etapa de este proceso. Por su paciencia, aliento y sacrificio han sido una fuente de fortaleza y motivación para mí. Este trabajo no solo es un reflejo de mi esfuerzo, sino también del apoyo y amor que ella me ha brindado a lo largo de este camino, a la cual le debo una gran parte de este logro.

Agradezco profundamente a mi padrastro, Roberto Serrano, por su invaluable apoyo incondicional, paciencia y ánimo durante el trayecto de mi formación universitaria. Su constante aliento y comprensión han sido fundamentales para superar los desafíos y alcanzar mis metas.

Agradecimientos a mi amigo y colega, Alfredo Mejía, quien han sido una fuente constante de motivación y apoyo emocional. Sus ideas, comentarios y compañía han hecho que este camino sea mucho más llevadero, así como el aliento que me ha brindado para superar diversos desafíos.

A mis compañeros del trabajo de graduación por su compromiso en la conclusión y presentación de nuestro trabajo final, que, a pesar de nuestras distintas actividades y horarios laborales, logramos culminar una etapa que nada más es el inicio de nuestras carreras profesionales.

**ROCIO BEATRIZ BONILLA MELGAR**

## Agradecimientos

Le agradezco infinitamente a Dios por cada día de vida, por brindarme la oportunidad de emprender este viaje de aprendizaje y haberme acompañado en cada paso a lo largo de la carrera, por darme fortaleza en los momentos de debilidad y el valor para enfrentarlos, por ofrecerme la oportunidad de aprender, y disfrutar de la felicidad.

Un agradecimiento especial para mi padres, a mi madre Gloria Marina Viuda de Salgado que no bastan las palabras para agradecer su apoyo y sacrificio incondicional, amor y comprensión en cada minuto de mi vida, por todas las acciones que han conllevado a este punto de mi vida personal y profesional, a mi fallecido Padre Mario Antonio Salgado por el gran amor y apoyo que mostro a lo largo de su tiempo junto a mí, mostrando su apoyo y amor hasta el último minuto de su vida, siempre motivando a seguir, ha lograr los sueños que uno se proponga sin desanimarse en los momentos difíciles y no rendirse jamás, nunca podre agradecerle lo mucho que has hecho por mí y aunque no estes físicamente junto a mi este logro es para ti papá.

Un agradecimiento a mis hermanos, Brenda Yanira Salgado Flamenco por ser un apoyo incondicional en mi vida profesional y ser una gran amiga, compañera y confidente a lo largo de mi vida estando en las buenas y en las malas, a mi hermano Mario Antonio Salgado Flamenco por sus cuidados y protección, por estar siempre para dar una mano cuando más se le necesita.

A mi esposa Mariel Andrea Fuentes de Salgado por su amor, apoyo y comprensión que me ha mostrado desde el momento que la conocí, por sus palabras de aliento, por brindarme más motivos para continuar y no dejarme decaer, y tener el coraje para seguir dando un paso más, por sus atenciones que demuestran su interés en mi bienestar físico y emocional, por tomar mi mano y estar dispuesta a seguir avanzando por el camino de la vida.

Mi más sincera gratitud hacia Reina Vides, el Señor dispone de personas en el mundo que brindan su apoyo cuando más se le necesita como son en este caso, muchas gracias a ella por sus consejos, y palabras de aliento, por su guía para la finalización de este y otros procesos académicos y siempre estar dispuesta a escuchar la voz de quien necesita ser escuchado y aconsejado.

Mi agradecimiento a todo el personal docente y no docentes, especialmente a nuestro asesor el Doc. Carlos Osmín Pocasangre por su guía y consejos a lo largo de esta etapa, a cada uno de los catedráticos que dedicaron su tiempo a enseñarnos y educarnos a lo largo de la carrera y todos los miembros no docentes muchas gracias por su valiosa atenciones pues es gracias a esos detalles que se a logrado llegar a esta etapa de la carrera y al Lic.Mauricio Vazques Jandres por brindándonos su conocimiento y apoyo en esta última etapa de la carrera.

Un agradecimiento a mi grandes amigos y compañeros, Leonardo Romero, Luis Morataya, Álvaro López y Carlos Mejía, que empezamos como desconocidos, pero la universidad se encargó de volvernos amigos y compañeros que libraron muchas dificultades juntos, mis agradecimientos a tan grande personas que estuvieron dispuestos siempre a ayudar especialmente en los momentos duros de la vida.

Un agradecimiento especial a mi jefe el Ing. Samuel Gutiérrez por su apoyo en esta etapa de la carrera mostrando una gran amabilidad al permitirme continuar con la formación académica profesional, y la oportunidad de seguir avanzando y aprendiendo del área, por compartir sus conocimientos y consejos.

Un agradecimiento a mi equipo de trabajo que, con altas y bajas, con diferencias y dificultades se ha logrado llegar al culmine de esta etapa de la vida profesional y juntos pasar a la siguiente etapa

A mi familia, amigos y compañeros, muchas gracias por brindarme siempre el apoyo de manera directa o indirecta recordando a aquellos que estuvieron presentes desde el primer momento como a los que se conocieron en el camino y los que se perdieron en él, muchas gracias por estar en los momentos cruciales para llegar hasta aquí.

**RONALDO ANTONIO SALGADO FLAMENCO**

## **Agradecimientos**

Primeramente, agradezco infinitamente a Dios por permitirme culminar mi carrera universitaria, por darme la fuerza y valentía para no desistir en el proceso, a Él sea la gloria y honor.

A mi padre, Héctor Zúniga por creer en mí y siempre motivarme a luchar por mis sueños, por apoyarme económicamente y nunca dudar de mi potencial, sin duda alguna, es una de las bases fundamentales en mi vida y en el cumplimiento de este importante logro.

A mi madre, Edelma de Zúniga por siempre brindarme su amor y apoyo incondicional, por esas madrugadas y desveladas a mi lado, por nunca dejarme caer y tener una palabra de aliento en momentos de adversidad, es imposible pagar lo tanto que ha hecho por mí y únicamente puedo agradecerle por estar ahí para mí siempre y en el alcance de esta importante meta.

A mis hermanos, Carlos Zúniga y Héctor Zúniga por ser parte fundamental para que no desistiera, por siempre estar a mi lado apoyándome, brindando palabras de motivación en todo momento, sé que este logro también es de gran felicidad para ellos.

A mi novia, Abigail Rivera por apoyarme incondicionalmente y estar orgullosa de mí, por siempre tener una palabra de oración por mí, por aconsejarme a poner a Dios siempre en primer lugar para que todo se pueda alcanzar, gracias por entenderme y acompañarme en el proceso sin importar los altibajos.

A nuestro docente asesor Doc. Carlos Pocasangre, por brindar de su apoyo incondicional desde el punto de partida de esta investigación, por gestionar cada proceso administrativo. cada consejo, recomendación y palabra de aliento nos ayudó a darle forma a esta investigación.

Al Lic. Mauricio Jándres de Censalud UES, quien con su gran experiencia nos brindó todo su apoyo sin dudarlo, gracias por dedicarnos tiempo para expandir nuestros conocimientos, por ayudarnos a gestionar la visita técnica en el sitio Ramsar, por cada consejo de mejora. Sin duda fue parte clave en el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros de tesis, Ronaldo Salgado y Rocío Bonilla, Por su gran aporte a este proyecto, compartimos buenos momentos en este proceso, y sin duda fueron parte importante para alcanzar este logro, por lo cual les extiendo mi mayor agradecimiento y no dudo que serán profesionales de alto valor para la sociedad.

**JONATHAN ALBERTO ZÚNIGA RAMÍREZ**

## Tabla de Contenido

Índice de Figuras.....	1
Resumen.....	3
Introducción.....	4
Objetivos .....	5
Planteamiento del problema.....	6
Alcances.....	6
Justificación.....	7
Antecedentes .....	8
Capítulo I: Marco Teórico .....	10
1.1 Manglares y Humedales.....	11
1.1.1 Humedales .....	11
1.1.1.1 Tipos de Humedales.....	12
1.1.2 Manglares .....	14
1.1.3 Funciones y servicios ecosistémicos proporcionados por los manglares y humedales.....	15
1.1.4 Manglares en El Salvador .....	16
1.1.5 Valor Ecológico y Socioeconómico de los Manglares y Humedales en El Salvador .....	17
1.1.6 Zona Protegida Barra de Santiago.....	18
1.1.6.2 Descripción de la biodiversidad y los ecosistemas presentes en el área ..	20
1.1.7 Importancia de la protección de los manglares .....	21
1.1.8 Manglares y humedales como defensa ante el cambio climático.....	22
1.1.9 Manglares en riesgo.....	24
1.1.10 Cambio en la cobertura y distribución de los manglares y humedales.....	24
1.1.11 Factores naturales que influyen en el cambio de la cobertura y distribución de los manglares y humedales.....	25
1.1.12 Factores antropogénicos que influyen en el cambio de la cobertura y distribución de los manglares y humedales.....	25
1.1.13 Revisión de estudios previos sobre cambios en los manglares y humedales en la región de Barra de Santiago.....	26

1.2 Proyecto Copérnicus y Satélite Sentinel 2.....	27
1.2.1 Proyecto Copérnicus .....	27
1.2.2 Satélite Sentinel 2 .....	28
1.3 QGIS .....	29
Capítulo II: Metodología y Procedimiento.....	31
2.1 Metodología.....	32
2.2 Procedimiento .....	32
2.2.1 Delimitación de la zona .....	34
2.2.2 Imágenes RGB.....	35
2.2.3 Índice de vegetación diferencial normalizado, ecuación .....	40
2.2.4 Código Python.....	40
2.2.4.1 Código Python para el cálculo de NDVI .....	40
2.2.4.2 Código Python para el cálculo del área a partir del NDVI .....	42
Capítulo III: Resultados .....	43
3.1 Colección de imágenes obtenidas.....	44
3.1.1 Zona completa de estudio .....	44
3.1.2 Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	49
3.1.3 Zona de Metalio.....	53
3.1.4 Zona de Garita Palmera .....	56
3.2. Análisis de la colección de imágenes obtenidas por zona.....	60
3.2.1 Análisis de la Zona Total de estudio .....	60
3.2.2 Análisis de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino .	61
3.2.3 Análisis de la Zona de Metalio.....	62
3.2.4 Análisis de la Zona de Garita Palmera .....	63
3.3 Análisis general .....	64
Visita Técnica a la Barra De Santiago.....	67
Imágenes tomadas con drone en visita técnica a la Barra de Santiago .....	68
Conclusiones.....	70
Bibliografía .....	72

## Índice de Figuras

Figura 1. Delimitación del área global de estudio (Sitio Ramsar Barra de Santiago, Ahuachapán).....	33
Figura 2. Delimitación del área específica de estudio (Sitio Ramsar Barra de Santiago, Ahuachapán).....	34
Figura 3. Recolección de imágenes Satelitales del proyecto Copernicus de la European Space Agency (ESA).....	35
Figura 4. Canales RGB (Banda Roja).....	36
Figura 5. Canales RGB (Banda Verde).....	36
Figura 6. Canales RGB (Banda Azul).....	37
Figura 7. Banda NIR (Infrarrojo Cercano).....	37
Figura 8. Imagen que muestra la combinación de canales RGB y banda infrarroja cercana.....	38
Figura 9. Recorte de imagen en QGIS, tomando únicamente la porción de estudio para acelerar el tiempo de procesamiento en el programa.....	39
Figura 10. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona Total.....	44
Figura 11. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona Total.....	45
Figura 12. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona Total.....	45
Figura 13. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona Total.....	46
Figura 14. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona Total.....	46
Figura 15. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona Total.....	47
Figura 16. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona Total.....	47
Figura 17. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona Total.....	48
Figura 18. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona Total.....	48
Figura 19. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	49
Figura 20. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	49
Figura 21. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	50
Figura 22. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	50
Figura 23. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	51
Figura 24. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	51
Figura 25. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	52
Figura 26. Imagen NDVI del periodo de 20 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	52

Figura 27. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.....	53
Figura 28. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de Metalio.....	53
Figura 29. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de Metalio.....	54
Figura 30. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de Metalio.....	54
Figura 31. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de Metalio.....	54
Figura 32. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de Metalio.....	55
Figura 33. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de Metalio.....	55
Figura 34. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de Metalio.....	55
Figura 35. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona de Metalio.....	56
Figura 36. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de Metalio.....	56
Figura 37. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de Garita Palmera. ....	56
Figura 38. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de Garita Palmera. ....	57
Figura 39. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de Garita Palmera. ....	57
Figura 40. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de Garita Palmera. ....	57
Figura 41. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de Garita Palmera. ....	58
Figura 42. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de Garita Palmera. ....	58
Figura 43. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de Garita Palmera. ....	58
Figura 44. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona de Garita Palmera. ....	59
Figura 45. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de Garita Palmera. ....	59
Tabla 1. Datos del cambio en la cobertura en la Zona Total de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino. ....	60
Figura 46. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona Total de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino. ....	60
Tabla 2. Datos del cambio en la cobertura en la Zona de Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino. ....	61
Figura 47. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino. ....	61
Tabla 3. Datos del cambio en la cobertura de la Zona de Metalio. ....	62
Figura 49. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de Metalio.....	62
Tabla 4. Datos del cambio en la cobertura de la Zona de Garita Palmera. ....	63
Figura 50. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de Garita Palmera. ....	63
Figura 51. Integrantes del grupo de investigación en el Sitio Ramsar Barra de Santiago. ....	67
Figura 52. Docente asesor e integrantes del grupo en zona de cultivo, dentro de la Barra de Santiago. ....	67
Figura 53. Imagen tomada con drone de la Barra de Santiago.....	68
Figura 54. Filtro de NDVI visible, aplicado a la Figura 53.....	68
Figura 55. Zona de Cultivos y vegetación en la Barra de Santiago.....	69
Figura 56. Filtro de NDVI aplicado a Figura 55. ....	69

## Resumen

La investigación sobre el cambio en la cobertura y distribución de manglares o humedales en el sitio Ramsar barra de Santiago, Ahuachapán usando series temporales en el periodo 2015-2023, se basó en el uso de recursos tecnológicos como son los GIS (Geographic Information System), los datos utilizados se obtuvieron de la página oficial del proyecto Copernicus, programa aeroespacial de la EU (Unión Europea), proyecto destinado a la observación y monitorización del planeta Tierra, proporcionando la información de manera gratuita, se utilizaron las imágenes de tipo L2A tomadas mediante el satélite Sentinel 2, que capturan información de manera continua y tiene una resolución de hasta 10-20-60 metros en 10 bandas diferentes, utilizando las bandas roja, azul, verde e infrarrojo cercano.

Además, para el procesamiento de las imágenes de las bandas correspondientes se realizó dentro del entorno del software QGIS, que un sistema de información geográfica de libre acceso y gratuito, que nos permite visualizar y analizar los datos geoespaciales mediante Python, lenguaje de programación ampliamente utilizado en el análisis de información debido a la eficiencia que genera.

Los manglares y humedales son zonas muy importantes no solo para el país o territorio que se encuentren, son un valioso recurso del planeta desde el más grande hasta el más pequeño, son hogares para muchas especies, logrando ser zonas con una gran biodiversidad, y ventajas ecológicas que proporcionan, por eso es de vital importancia la observación y el cuidado de estos.

## Introducción

Los manglares y humedales son ecosistemas de gran relevancia tanto a nivel local como global, que se encuentran en la interfaz entre los ambientes terrestres y marinos. Su singularidad radica en su adaptación a condiciones de alta salinidad, fluctuaciones de mareas y una diversidad biológica excepcional. Estos ecosistemas son auténticos guardianes de la biodiversidad y desempeñan un papel esencial en la conservación ambiental y la protección de las zonas costeras.

En el contexto de la Reserva Natural Barra de Santiago, situada en Ahuachapán, El Salvador, estos manglares y humedales alcanzan un estatus de especial importancia, ya que esta área ha sido designada como sitio Ramsar, una distinción que subraya su trascendencia internacional para la conservación de la vida silvestre y la sostenibilidad ecológica. La conservación y estudio de los manglares y humedales en Barra de Santiago no solo son fundamentales para la protección de los hábitats costeros, sino que también están intrínsecamente ligados a la supervivencia de numerosas especies de flora y fauna, incluyendo aves migratorias, peces y crustáceos.

Sin embargo, la perpetuidad de estos valiosos ecosistemas enfrenta una serie de amenazas y desafíos en la actualidad. Los efectos del cambio climático, la urbanización, la pesca insostenible y la degradación de la calidad del agua, entre otros factores, han generado un escenario crítico que exige un análisis riguroso y una acción inmediata. En este contexto, la presente investigación se plantea como una respuesta crucial para comprender y abordar los cambios en la cobertura y distribución de los manglares y humedales en la Reserva Natural Barra de Santiago aplicando tecnología geoespacial como es el software QGIS.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Realizar un análisis de cambios en la cobertura y distribución de manglares y humedales en la Reserva Natural Ramsar Barra de Santiago, Ahuachapán, El Salvador, utilizando imágenes de satélite y análisis de series temporales.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar y delimitar las áreas de manglares y humedales en la Reserva Natural Ramsar Barra de Santiago utilizando imágenes satelitales durante diferentes fechas del periodo 2015 – 2023.
- Generar series temporales de datos de cobertura de manglares y humedales a lo largo del período de estudio.
- Aplicar técnicas de procesamiento de imágenes y análisis de series temporales para cuantificar y visualizar los cambios en la cobertura y distribución de manglares y humedales.
- Evaluar los factores naturales y antropogénicos que podrían haber contribuido a los cambios observados en la cobertura y distribución de los ecosistemas.
- Proporcionar información de utilidad para la toma de decisiones con el fin de la conservación del sitio Ramsar a estudiar.
- Evaluar el impacto y degradación ecológica que ha provocado el cambio climático y otros factores externos sobre la reserva natural estudiada el período de tiempo establecido.

## **Planteamiento del problema**

Los manglares y humedales son ecosistemas críticos que desempeñan un papel vital en la conservación de la biodiversidad, la protección costera y la mitigación del cambio climático. Sin embargo, en las últimas décadas, estos valiosos ecosistemas han estado experimentando cambios significativos en su cobertura y distribución, debido a factores naturales y antropogénicos. La Reserva Natural Barra de Santiago, ubicada en Ahuachapán, El Salvador, es un sitio Ramsar de gran importancia debido a su biodiversidad y su papel en la conservación de la fauna marina y las aves migratorias. Este estudio se centra en analizar el cambio en la cobertura y distribución de manglares y humedales en el sitio Ramsar Barra de Santiago durante el período del año 2015 al año 2023, utilizando series temporales y tecnologías geoespaciales avanzadas.

## **Alcances**

- El estudio se centrará en el desarrollo de series temporales en el periodo de 2015 a 2023 a partir de datos obtenidos mediante imágenes satelitales de la zona correspondiente de estudio utilizando colección de imágenes del satélite sentinel 2, dentro del entorno de QGIS y Python para su procesamiento.
- Mediante los resultados obtener determinar la tendencia de la distribución y cobertura de los manglares en la zona Ramsar de barra de Santiago, y determinar posibles factores que contribuyan a la tendencia descrita por los resultados de la investigación mediante investigación teórica de la zona.

## **Justificación**

La justificación de esta investigación radica en su potencial para proporcionar información valiosa para la toma de decisiones en la gestión y conservación de estos ecosistemas únicos. Al utilizar series temporales y tecnologías geoespaciales, se pretende analizar y documentar de manera sistemática y científica la evolución de la cobertura y distribución de los manglares y humedales en un período crucial que abarca desde el año 2015 hasta el año 2023.

En esta investigación se busca, primero, analizar y cuantificar los cambios en la cobertura y distribución de los manglares y humedales en Barra de Santiago durante el período de estudio; y segundo, evaluar los factores y procesos, tanto naturales como antropogénicos, que han contribuido a dichos cambios. Con estas metas en mente, se pretende proporcionar una base sólida para la toma de decisiones y la implementación de estrategias de conservación efectivas que aseguren la persistencia de estos ecosistemas vitales para la biodiversidad y la resiliencia de la costa en la región.

## **Antecedentes**

En la región de América Latina y el Caribe, los manglares y humedales han sido objeto de investigaciones intensivas debido a su importancia en términos de biodiversidad, protección costera y almacenamiento de carbono. Los manglares, en particular, actúan como barreras naturales que amortiguan los efectos de tormentas y previenen la erosión costera, además de albergar diversas especies de fauna y flora.

La Reserva Natural Barra de Santiago en Ahuachapán, El Salvador, se destaca como un área de particular relevancia en términos de conservación de manglares y humedales. Designada como sitio Ramsar en 2005, esta reserva alberga una rica biodiversidad marina y costera, siendo refugio de aves migratorias y hogar de especies marinas vulnerables y en peligro de extinción. Sin embargo, la continua transformación de la tierra y la presión antropogénica plantean desafíos significativos para la integridad de estos ecosistemas en la región.

A pesar de la importancia ecológica y socioeconómica de la Reserva Natural Barra de Santiago, existe una falta de estudios exhaustivos que examinen los cambios en la cobertura y distribución de manglares y humedales en este sitio Ramsar utilizando técnicas de análisis de series temporales. A medida que las preocupaciones sobre el cambio climático, la urbanización y la degradación de los ecosistemas continúan aumentando, es esencial entender cómo estos factores están afectando a los manglares y humedales en la región. Los estudios previos que se han centrado en otros sitios Ramsar y áreas costeras han demostrado la utilidad de las series temporales y el análisis geoespacial para rastrear y cuantificar estos cambios, lo que destaca la necesidad de aplicar este enfoque en la Reserva Natural Barra de Santiago.

En este contexto, el presente estudio busca llenar esta brecha de conocimiento al llevar a cabo un análisis de series temporales para evaluar los cambios en la cobertura y distribución de manglares y humedales en la Reserva Natural Barra

de Santiago durante el período de 2015 a 2023. Al hacerlo, se contribuirá a la comprensión de la dinámica de estos ecosistemas y se proporcionará información valiosa para la toma de decisiones informadas en la gestión y conservación de este importante sitio Ramsar.

# **Capítulo I: Marco Teórico**

## 1.1 Manglares y Humedales

### 1.1.1 Humedales

Hay distintas definiciones de humedales, esto se debe a que existen un gran de variedad de humedales como pueden ser los pantanos y ciénagas, en el caso de esta investigación se utilizara la definición establecida en el convenio internacional para la protección de humedales RAMSAR, firmado en la ciudad de Ramsar, Irán en 1971.

El convenio RAMSAR define en el art.1 a los humedales como todas las extensiones de marismas, pantanos y tuberías o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancados o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las exenciones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros , debido a que esta es una definición demasiado amplia por lo que puede resultar imprecisa , el servicio de pesca y vida silvestre de Estados Unidos propuso una definición más adecuado al caso , el cual lo define como tierras en transición entre sistemas acuáticos y terrestres , donde el manto freático esta habitualmente al mismo nivel o cerca de la superficie , o bien el terreno está cubierto por agua poco profundas.

Los humedales deben tener una de estas características:

- Presencia de una lámina o capa de agua poco profunda o bien agua subterránea próxima a la superficie del terreno, ya sea permanente o temporal.
- El suelo debe tener características de suelo saturado de agua durante parte de año o bien todo el año (suelos hidromorfos), es decir no ordenados por lo menos partes del año.
- Periódicamente el terreno debe mantener una vegetación acuática (hidrofitas) es decir plantas que requieran de inundación para crecer y reproducirse.

Se dice que debe tener una o más características de las mencionadas anteriormente debido a que una es consecuencia de la otra. Si hay agua durante suficiente tiempo, el suelo adquiere propiedades hidromorfos, es decir que indica que ha habido

inundaciones, y la única vegetación que sobrevive bajo esas condiciones son las plantas de humedales.

Los humedales tienen límites poco definidos; son espacios de transición, y su naturaleza es muy cambiante, por ejemplo, entre época seca y de lluvias. Por ello en ocasiones es difícil reconocerlos, pero eso no hace que sean menos importantes.

En algunos humedales la presencia de agua no es visible (por ejemplo, cuando es subterránea), pero su existencia sigue teniendo impacto en el sistema, tanto por su influencia a nivel del suelo como de las plantas que viven en el humedal. Por ello la vegetación es un buen indicador de la existencia de un humedal y cuando vemos manglares, juncales, y carrizales, sabemos que es un lugar húmedo. En realidad, son pocas las plantas que toleran vivir en un humedal y por tanto la vegetación de humedales, las plantas que ahí habitan se conocen como hidrófitas, plantas superiores que requieren de un período de anegación o de inundación para completar su ciclo de vida, y pueden vivir en el agua o bien en terrenos total o parcialmente anegados.

#### **1.1.1.1 Tipos de Humedales**

Hay muchos tipos de humedales. Varían en función de su origen, de su tamaño, de donde se localizan, de su régimen hidrológico o de inundaciones, de las condiciones químicas del agua, de las características de la vegetación, del tipo de suelo y características de los sedimentos. Por ello, hay muchos tipos de suelo y características de los sedimentos. Por ello, hay muchos tipos de comunidades de los humedales tanto como tipos de comunidades terrestres (bosques, selvas, desiertos, matorrales pastizales, etc.)

Se presentan en todos los climas y en todos los continentes abarcando desde una hectárea hasta miles, desde sistemas sumamente productivos hasta los muy pobres.

Las plantas que viven en los humedales presentan adaptaciones y formas de crecimiento muy variadas. Hay hidrófitas herbáceas (tulares, carrizales, popales, pasto marino) y arbóreas (árboles de manglares y de selvas), hay enraizadas y flotantes (flor de loto y

lirio de agua), es decir, con formas muy distintas. Dentro de esta variedad, hay plantas que requieren necesariamente un ambiente acuático para sobrevivir, otras toleran cambios drásticos el nivel de agua y otras solo sobreviven bajo grados moderados de inundación. Esta última ya no son hidrofitas, solamente especies tolerantes.

En general se ha clasificado a los humedales en cinco tipos

1. Marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral)
2. Estuarios (incluidos deltas, marismas de marea y bajos intermareales de lodo y manglares).
3. Lacustre (Son humedales situados en una hondonada o depresión topográfica asociado a los lagos.
4. Ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos)
5. Palustre es decir “pantanosos” son humedales que no reciben influencia de las mareas, sino únicamente agua dulce, además se ubican entre un cuerpo de agua y la tierra firme elevada, es decir corresponden a la vegetación que se encuentran en los márgenes de las lagunas de agua dulce o en las planicies inundables, marismas, pantanos y ciénegas. Están formados por árboles, arbustos y/o hierbas perennes. Se dividen en dos tipos de acuerdo con la fisionomía de las especies más abundantes:
  - i. Humedales herbáceos o arbustivos: popal, tular, carrizal, juncal, praderas, inundables de ciperáceas y de gramíneas, sabanas.
  - ii. Humedales arbóreos o arbustivos bosques riparios, palmeras (tasistal, palmares de diferentes especies), selva baja y median inundables, matorrales arbustivos inundables de varios tipos.

### 1.1.2 Manglares

Según la UNESCO los manglares son ecosistemas singulares, espectaculares y prolíficos que se encuentran en el límite entre la tierra y el mar. Estos ecosistemas extraordinarios contribuyen al bienestar, a la seguridad alimentaria y a la protección de las comunidades costeras de todo el mundo, “grandiosos, únicos y maravillosos” [3] es la descripción de la bióloga Marta Vannucci, una de las pioneras en el estudio oceanográfico en Brasil y responsable de más de 100 publicaciones científicas sobre los manglares.

"Al igual que otros bosques, no hay suelo que pisar. Durante la marea alta, el bosque se inunda y, cuando la marea retrocede, deja tras de sí una caótica maraña de raíces de todo tipo, cubiertas de mucílago, líquenes y algas que también crecen en las ramas y emergen del barro, donde es posible hundirse hasta las rodillas, si hay espacio suficiente para apoyar los pies"(Los manglares y nosotros, Edusp 2003, Marta Vannucci)

Los bosques de manglar son comunidades vegetales halófitas que se encuentran distribuidas en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Se desarrollan en la frontera entre tierra firme y el mar; generalmente se encuentran en las franjas de estuarios, lagunas costeras o desembocaduras de grandes ríos; por lo tanto, están sujetos al régimen intermareal.

Los requisitos mínimos para el establecimiento de las comunidades de manglar son: suelos lodosos, temperatura del aire promedio de 25°C, hábitats protegidos contra la acción de las olas, régimen intermareal, que estén bajo la influencia de corrientes oceánicas y de fuentes de agua dulce, así como estén situadas en costas someras (Kathiresan y Bingham 2001; Saenger 2002, Allaby 2005 y Hogarth 2007). Los manglares residen en ambientes de alto estrés fisiológico, originado principalmente por el régimen intermareal, suelos inestables y salinidad del agua, lo que dificulta la obtención de O<sub>2</sub>, el anclaje y limita la absorción de agua dulce, la cual debe obtenerse en contra de un gradiente. Es por ello que han desarrollado una serie de adaptaciones anatómicas y fisiológicas para vivir en el medio que les rodea. Han modificado su sistema radicular,

desarrollando raíces fúlcreas (p.e. *Rhizophora*) o neumatóforos con geotropismo negativo (p.e. *Avicennia* y *Laguncularia*) que le dan una mayor superficie de intercambio de gases. Las raíces de tipo fúlcreas contribuyen además a darle un mayor y mejor anclaje al organismo (Tomlinson 1986; Saenger 2002). A pesar de encontrarse cerca de un cuerpo de agua (estuario), la vegetación de manglar presenta características de plantas xerófitas para contrarrestar las elevadas salinidades y la dificultad en la obtención del agua dulce; dichas características son la presencia de estomas hendidos, de un mesófilo engrosado, y de hojas en forma de ramilletes que maximizan la absorción de radiación lumínica por parte de las hojas y a la vez reducen la tasa de fotodegradación de los tejidos. Especies como *Avicennia* y *Laguncularia* han desarrollado mecanismos para la secreción de sales por medio de glándulas o presentan solutos compatibles que les dan una mayor tolerancia a la salinidad (Tomlinson 1986; Saenger 2002).

### **1.1.3 Funciones y servicios ecosistémicos proporcionados por los manglares y humedales**

Los manglares y humedales son ecosistemas maravillosos que reflejan múltiples funciones y servicios ecosistémicos, entre los cuales destacan:

**Hábitat para la Biodiversidad:** Los manglares y humedales son auténticos oasis de vida, albergando una amplia diversidad de especies adaptadas a sus condiciones únicas. Numerosas especies de peces, crustáceos y moluscos encuentran refugio en las raíces y aguas de los manglares. Además, muchas aves migratorias dependen de estos ecosistemas como lugares de alimentación y reproducción.

**Protección Costera:** La densa vegetación de los manglares funciona como una barrera natural que protege la costa de la erosión causada por las olas y las mareas. Durante tormentas y eventos climáticos extremos, los manglares reducen la velocidad del agua y absorben su energía, disminuyendo así el impacto de estos eventos en las comunidades costeras.

**Filtración de Agua:** Los humedales actúan como sistemas de filtración natural, limpiando el agua de contaminantes y nutrientes en su camino hacia el mar o cuerpos de agua dulce. Este proceso mejora la calidad del agua y contribuye a la salud de los ecosistemas acuáticos.

**Almacenamiento de Carbono:** Tanto los manglares como los humedales son sumideros de carbono altamente efectivos. Almacenan grandes cantidades de carbono orgánico en sus sedimentos, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático al capturar el dióxido de carbono atmosférico.

**Recreación y Turismo:** Estos ecosistemas también tienen un valor recreativo y turístico considerable. La observación de aves, la pesca recreativa y el ecoturismo son actividades populares que generan ingresos económicos y promueven la apreciación de la naturaleza.

#### **1.1.4 Manglares en El Salvador**

El ecosistema de manglar del país está distribuido a lo largo de toda la costa, desde Bola de Monte, en Ahuachapán, hasta la Bahía de Jiquilisco, La Unión. En total 39,976 hectáreas de bosque salado que representan el 1.67 % del territorio nacional.

El país cuenta con seis especies de mangle: Madresal (*Avicennia bicolor*), Istaten (*A. germinans*), botoncillo (*Conocarpus erectus*), Cincahuite (*Laguncularia racemosa*), mangle rojo (*Rhizophora harrizonii* y *R. mangle*) y mangle rojo espigado (*Rhizophora racemosa*), siendo esta última la especie predominante. El botoncillo es mucho más frágil y está a punto de llegar a la categoría “en peligro de extinción”, se encuentra en las áreas transitorias entre bosque dulce y bosque salado.

Estos ecosistemas poseen esteros y canales, barras de arena y playas, islas, manglares y bosques, por lo que tienen una gran importancia. En ellos se alberga una gran cantidad de biodiversidad. Diferentes especies de aves, mamíferos y crustáceos, entre otras,

encuentran en los bosques salados un lugar para refugio, alimentación, descanso y reproducción.

Además, contribuye al control de inundaciones, depuración y almacenamiento de aguas, producción pesquera, producción de madera, recarga de acuíferos, fijación de carbono y regulación climática, protección y estabilización de la línea de costa y como barrera natural para la protección de las comunidades ante huracanes o depresiones.

### **1.1.5 Valor Ecológico y Socioeconómico de los Manglares y Humedales en El Salvador**

En el contexto específico de El Salvador, los manglares y humedales poseen un valor excepcional tanto desde una perspectiva ecológica como socioeconómica:

**Protección contra desastres naturales:** Dada la exposición de El Salvador a tormentas tropicales y marejadas, la función de protección costera de los manglares es esencial para prevenir la erosión de playas y áreas habitadas. Estos ecosistemas actúan como un "colchón" natural que disipa la energía de las olas y minimiza los daños causados por eventos climáticos extremos.

**Pesca y alimentación:** Los manglares sirven como criaderos naturales de peces y crustáceos, lo que apoya a la pesca artesanal y contribuye a la seguridad alimentaria de las comunidades costeras. La pesca en manglares es una fuente importante de proteínas y sustento económico para las poblaciones locales.

**Turismo sostenible:** Los humedales, como el embalse Cerrón Grande y la Reserva Natural Barra de Santiago, atraen a turistas y excursionistas, lo que impulsa la economía local a través del turismo sostenible y actividades recreativas. El turismo también fomenta la conciencia ambiental y la conservación.

**Mitigación del cambio climático:** El Salvador enfrenta los desafíos del cambio climático, y los manglares y humedales desempeñan un papel importante en la mitigación. Almacenando carbono en sus sedimentos, contribuyen a reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero, una consideración esencial en la lucha contra el cambio climático.

**Biodiversidad y conservación:** Estos ecosistemas albergan una rica biodiversidad, incluyendo especies amenazadas y endémicas. Su conservación es esencial para proteger la diversidad biológica de El Salvador y preservar los servicios que proporcionan a las comunidades locales y la sociedad en general.

En conjunto, los manglares y humedales de El Salvador no solo son tesoros ecológicos, sino también motores de desarrollo sostenible y resiliencia ante los desafíos ambientales y sociales contemporáneos. Su estudio y conservación son cruciales para la gestión ambiental y la sustentabilidad de la región, y proporcionan un valioso contexto para abordar el cambio en su cobertura y distribución en el período 2015-2023 en la Reserva Natural Barra de Santiago.

### **1.1.6 Zona Protegida Barra de Santiago**

Complejo Barra de Santiago. 16/01/14; Ahuachapán, Sonsonate; 11,519 ha; 13°42'24" N 90°0'59" W. El Sitio contiene un área representativa de los manglares de la ecorregión del Pacífico Norte seco de Centroamérica y un pantano de palmeras (*Brahea salvadorensis*) representativo de un ecosistema específico de la ecorregión del bosque tropical seco mesoamericano. Sustenta numerosas especies amenazadas o en peligro de extinción. Entre ellas se encuentran cuatro especies de tortugas marinas (*Eretmochelys imbricata*, *Lepidochelys olivacea*, *Dermochelys coriacea* y *Chelonia mydas*) y otras especies severamente amenazadas por su valor comercial, como la cotorra nuquiamarilla (*Amazona auropalliata*).

Los manglares también sustentan alrededor del 75% de la fauna costera de importancia comercial de El Salvador. Muchas de estas especies, como los camarones de la familia Penaeidae, dependen de los manglares como zonas de alimentación, desove y crianza. El Sitio es importante para las comunidades locales, ya que dependen de la pesca artesanal para su sustento. Se encuentra amenazado por la urbanización descontrolada,

el pastoreo excesivo, el cultivo de caña de azúcar y la creciente demanda de madera para la construcción, ya que han provocado deforestación, cambios en la hidrología de la zona y contaminación.

#### **1.1.6.1 Designación como Sitio Ramsar Barra de Santiago y su importancia internacional**

Barra de Santiago ha sido designada como un sitio Ramsar, lo que significa que está reconocida y protegida a nivel internacional por su valor como humedal de importancia global. Destacando los motivos para la designación:

**Biodiversidad:** Barra de Santiago alberga una extraordinaria diversidad de especies, incluyendo aves acuáticas, peces, crustáceos y mamíferos. Es un hábitat crítico para numerosas especies migratorias, algunas de las cuales viajan miles de kilómetros cada año.

**Ecosistemas Únicos:** La combinación de manglares, estuarios y playas brinda una variedad de hábitats que son vitales para la reproducción, alimentación y refugio de la fauna silvestre.

**Protección Costera:** Los manglares de Barra de Santiago desempeñan un papel vital en la protección costera, reduciendo la erosión y la vulnerabilidad de las comunidades a eventos climáticos extremos.

**Importancia Internacional:** La designación como sitio Ramsar coloca a Barra de Santiago en un contexto internacional. Esto significa que El Salvador se compromete a conservar y gestionar de manera sostenible este valioso humedal, reconociendo su papel en la preservación de la biodiversidad global y su contribución a la mitigación del cambio climático. Además, la designación como sitio Ramsar promueve la cooperación internacional en la conservación de estos ecosistemas críticos.

### 1.1.6.2 Descripción de la biodiversidad y los ecosistemas presentes en el área

El Barra de Santiago es un paraíso para la biodiversidad, albergando una amplia variedad de especies y ecosistemas. A continuación, se presenta una descripción detallada de la rica diversidad biológica y los ecosistemas presentes en esta área Ramsar:

**Manglares:** Los manglares son una característica destacada de la Barra de Santiago. Estos bosques costeros proveen refugio a numerosas especies de peces y crustáceos, además de desempeñar un papel vital en la protección costera.

**Estuarios:** Los estuarios formados por la desembocadura del río Paz son hábitats cruciales para una variedad de especies acuáticas. La mezcla de agua dulce y salina crea condiciones ideales para la vida silvestre.

**Playas y Dunas:** Las playas arenosas y las dunas contribuyen a la belleza paisajística de Barra de Santiago y proporcionan hábitats para reptiles, aves marinas y vegetación adaptada a la costa.

**Aves Acuáticas:** Barra de Santiago es un lugar de descanso y alimentación para muchas aves acuáticas migratorias. Se pueden observar garzas, garcetas, playeros, zarapitos y muchas otras especies durante las migraciones estacionales.

**Peces y Crustáceos:** Los manglares y estuarios son criaderos naturales para una variedad de peces y crustáceos, incluyendo camarones y cangrejos.

**Flora Única:** La vegetación costera incluye especies adaptadas a las condiciones salinas, como el mangle rojo y el mangle negro, así como otras plantas adaptadas a las dunas y playas.

La biodiversidad y los ecosistemas de Barra de Santiago son de gran valor científico y ecológico. La conservación de esta área no solo contribuye a la protección de la biodiversidad local, sino que también tiene implicaciones globales al preservar los servicios ecosistémicos clave que estos humedales brindan a nivel internacional. Su

designación como sitio Ramsar subraya la importancia de esta área única y su compromiso con la conservación global.

### **1.1.7 Importancia de la protección de los manglares**

La protección de los bosques de manglares constituyen uno de los más grandes proyectos que se desarrollan no solo en El Salvador sino también a lo largo del mundo, los bosques de manglares juegan un papel fundamental, al albergar una gran biodiversidad, los manglares son responsables de una serie de servicios ecosistémicos que benefician tanto a los seres humanos como a las demás especies que habitan estos entornos desde la protección de las costas y el control del clima, hasta su papel esencial en la reproducción de especies.

“La maraña de raíces y el suelo rico en nutrientes forman un excelente vivero para muchos animales, en particular para los animales marinos que viven en las raíces sumergidas cuando son jóvenes y pasan a mar abierto cuando son adultos” (Manglares: que son y porque conservarlos (2022, NATIONAL GEOGRAPHIC, Octavio Aburto). A su vez protegen las costas reduciendo la vulnerabilidad de las zonas costeras a los peligros naturales.

"Evita la erosión de las costas y protege cualquier infraestructura, ya sean casas, hoteles y otras urbanizaciones, porque puede frenar la fuerza de las olas y los temporales"(Manglares: que son y porque conservarlos (2022, NATIONAL GEOGRAPHIC, Octavio Aburto).

Según la UNESCO una franja de 500 metros de manglares puede reducir la altura de las que llegan a las costas entre un 50% y un 99%, una de las mayores ventajas que ofrecen los manglares es ser unos de los pilares fundamentales contra el cambio climático, debido a que los manglares son los principales acumuladores de CO<sub>2</sub>.

“Secuestran el CO<sub>2</sub> de la atmósfera 50 veces más rápido que cualquier otro árbol y lo almacenan en el suelo en una cantidad que puede ser hasta cinco veces superior a la de

cualquier otro bosque” "(Manglares: que son y porque consérvalos (2022, NATIONAL GEOGRAPHIC, Octavio Aburto).

“Por eso los manglares han sido considerados los grandes superhéroes que pueden ayudarnos a combatir el cambio climático” Manglares: que son y porque conservarlos (2022, NATIONAL GEOGRAPHIC, Octavio Aburto).

"Los manglares y otros ecosistemas de carbono azul, como los pastos marinos y las marismas, son increíblemente eficientes para almacenar carbono” (Isabelle Vanderbeck, experta internacional en aguas del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).

Los datos de la UNESCO indican que una hectárea de manglar es capaz de almacenar 3.754 toneladas de carbono, lo que equivale a lo que emiten 2.650 coches en un año.

### **1.1.8 Manglares y humedales como defensa ante el cambio climático**

Los manglares o como también son conocidos como bosques azules son uno de los ecosistemas más valiosos del planeta. No solo resultan ser un hábitat crucial para la biodiversidad, sus peculiaridades los convierten en una protección propia de la naturaleza. Es por ello por lo que proteger los manglares resulta clave para luchar contra el cambio climático. Según la ONU, alrededor del 75% de las especies de pesca comercial pasan parte de su ciclo de vida en estos ecosistemas por lo que dependen de ellos para su alimentación y desarrollo. Gracias a sus densas raíces, sus numerosos tipos de árboles y sus aguas salobres los convierten en un hábitat muy valioso y único para la vida de diferentes especies de peces y crustáceos.

Además, proteger los manglares significa también proteger las costas ya que sus peculiares raíces actúan como amortiguadores naturales contras las marejadas ciclónicas, las inundaciones y las tormentas siendo capaces de disipar la energía de las olas a lo largo de las costas.

Una de las funciones más importantes de los manglares es la de acumular CO<sub>2</sub>, reduciendo así su presencia en la atmósfera. Por esa razón, se consideran sumideros naturales de dióxido de carbono que queda almacenado en depósitos de sedimentos por miles de años.

- Según Isabelle Vandenberg experta internacional en aguas del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).
- "Los manglares y otros ecosistemas de carbono azul, como los pastos marinos y las marismas, son increíblemente eficientes para almacenar carbono", dice Isabelle Vanderbeck, experta internacional en aguas del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).
- "Pueden absorber y almacenar hasta 10 veces más carbono que los ecosistemas terrestres, por lo que no hace falta decir que son una parte fundamental de los esfuerzos para mitigar el cambio climático", añade.
- El mundo está perdiendo estos ecosistemas a un ritmo alarmante, entre tres y cinco veces más rápido que otros bosques.
- "Más de un tercio de los manglares del mundo ha desaparecido en los últimos 100 años. Es una tendencia que debe detenerse ahora mismo si queremos que sobrevivan las especies y comunidades que dependen de estos bosques costeros", dice Vanderbeck.

Es en esta lucha contra el cambio climático que nacen los proyectos de carbono azul donde las palabras carbono azul se refiere a la captura, almacenamiento y secuestro de carbono por parte de ecosistemas costeros, principalmente manglares, marismas y pastos marinos. Estos ecosistemas tienen la capacidad de capturar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera a través de la fotosíntesis y luego almacenar este carbono en su biomasa vegetal y en los sedimentos acumulados en sus áreas. La denominación "azul" se debe a la proximidad de estos ecosistemas con cuerpos de agua, generalmente de color azul, como los océanos y mares. Mientras que los proyectos de carbono azul se encargan de cuantificar, conservar, restaurar o gestionar de manera sostenible los ecosistemas de carbono azul (principalmente manglares, marismas y pastos marinos)

con el propósito de mitigar el cambio climático y sus efectos. Estos proyectos se centran en aprovechar la capacidad de estos ecosistemas para capturar y almacenar carbono, además de ofrecer otros beneficios ambientales y socioeconómicos, realizando actividades como mapear las extensiones de los ecosistemas de carbono azul, restauración, conservación, monitoreo, desarrollo de mercado de carbono, educación y concientización.

### **1.1.9 Manglares en riesgo**

“Más de un tercio de los manglares del mundo ha desaparecido en los últimos 100 años. Es una tendencia que debe detenerse ahora mismo si queremos que sobrevivan las especies y comunidades que dependen de estos bosques costeros” (Isabelle Vandeberk)

El estado de los manglares se encuentra en peligro debido a las actividades humanas, como a su vez por factores naturales causados por el cambio climático, según datos para el 2022 puede haberse perdido un 20-35% de la población de mangle mundial.

El salvador no es un caso aislado el cual también se ha visto afectado cifras reveladas en el foro “Desafío para la Adaptación al Cambio Climático” que inauguró 08 de julio de 2011 el ministro de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Herman Rosa Chávez, El Salvador ha perdido cerca de un 60% de su población de manglar desde 1950 al 2011.

### **1.1.10 Cambio en la cobertura y distribución de los manglares y humedales**

Los manglares y humedales son ecosistemas altamente dinámicos que están influenciados por una interacción compleja de factores naturales y actividades humanas. Comprender estos factores es esencial para analizar los cambios en su cobertura y distribución en la región de Barra de Santiago.

### **1.1.11 Factores naturales que influyen en el cambio de la cobertura y distribución de los manglares y humedales**

**Ciclones:** Los eventos climáticos extremos, como tormentas tropicales y huracanes, pueden causar inundaciones, erosión y cambios en la topografía costera. Estos eventos naturales pueden llevar a la pérdida temporal o permanente de áreas de manglares y humedales.

**Variabilidad de las Mareas:** Las fluctuaciones de las mareas influyen en la dinámica de estos ecosistemas, ya que las especies de manglar están adaptadas a condiciones de salinidad variable. Las mareas altas pueden afectar la propagación de las semillas y el establecimiento de nuevas plántulas.

**Cambios en los sedimentos:** La sedimentación y erosión naturales pueden alterar la configuración de los manglares y humedales con el tiempo. La acumulación de sedimentos puede crear nuevas áreas de manglares, mientras que la erosión puede reducir su extensión.

### **1.1.12 Factores antropogénicos que influyen en el cambio de la cobertura y distribución de los manglares y humedales**

**Urbanización y Desarrollo Costero:** El crecimiento urbano y la construcción de infraestructuras costeras, como carreteras y hoteles, a menudo resultan en la pérdida directa de hábitats de manglar y la modificación de ecosistemas circundantes.

**Agricultura y acuicultura:** La expansión de la agricultura y la acuicultura, como la producción de camarones, puede implicar la conversión de áreas de manglar en estanques de cultivo. Esto suele dar como resultado la pérdida de hábitats naturales.

**Deforestación y Extracción de Recursos:** La tala de árboles de manglar para la obtención de madera y la recolección de leña son prácticas comunes que afectan la salud de estos ecosistemas. Además, la extracción excesiva de recursos, como la pesca insostenible, puede dañar la biodiversidad.

**Cambio Climático:** A nivel global, el cambio climático contribuye al aumento del nivel del mar y la acidificación de los océanos, lo que puede tener efectos adversos en los manglares y humedales costeros. El aumento del nivel del mar puede provocar la inundación de áreas de manglar.

### **1.1.13 Revisión de estudios previos sobre cambios en los manglares y humedales en la región de Barra de Santiago.**

La región de Barra de Santiago ha sido objeto de interés para investigadores y conservacionistas que buscan comprender cómo los factores mencionados anteriormente han afectado la cobertura y distribución de los manglares y humedales, por lo cual algunos estudios relevantes son:

**Monitoreo Satelital:** Estudios han utilizado imágenes de satélite para rastrear cambios en la cobertura de manglares en la Barra de Santiago. Estos análisis han revelado tasas de deforestación y cambios en la extensión de los manglares a lo largo de los años.

**Efectos del Desarrollo Costero:** Investigaciones han evaluado cómo la urbanización y el desarrollo costero han llevado a la pérdida de hábitats de manglar en la región. Se han identificado áreas específicas que enfrentan una mayor presión debido a la expansión urbana.

**Impacto de la Agricultura y la Acuicultura:** Estudios han examinado cómo la conversión de manglares en estanques de camarones y la agricultura influyen en la distribución de estos ecosistemas. Se han documentado los efectos negativos en la biodiversidad y la salud de los manglares.

**Evaluación de la Erosión Costera:** La erosión costera es un problema grave en Barra de Santiago. Los estudios han investigado las causas subyacentes y las posibles soluciones para mitigarla y proteger los manglares.

**Cambio Climático y Aumento del Nivel del Mar:** La investigación se ha centrado en cómo el cambio climático y el aumento del nivel del mar están afectando la vulnerabilidad

de los manglares en esta región. Se han explorado medidas de adaptación y conservación.

Estos estudios anteriores proporcionan una base sólida para comprender la dinámica de los manglares y humedales en Barra de Santiago y los desafíos que enfrentan en un contexto de cambios naturales y presiones antropogénicas. El análisis de esta información previa es fundamental para orientar la investigación actual sobre el cambio en la cobertura y distribución de estos ecosistemas en el período 2015-2023 en esta región Ramsar.

En el caso particular de nuestra investigación realizando un estudio sobre la cobertura y distribución de estos ecosistemas se utilizará la colección de imágenes disponibles en el Satélite Sentinel2 del proyecto Copernicus.

## **1.2 Proyecto Copérnicus y Satélite Sentinel 2**

### **1.2.1 Proyecto Copérnicus**

Copérnicus es el programa de la Unión Europea de observación y monitorización de la Tierra, que analiza el planeta y su medio ambiente en beneficio de los ciudadanos europeos. El programa, liderado por la Comisión Europea, proporciona datos de manera operacional y servicios de información de forma gratuita sobre numerosas áreas de aplicación, gracias a una gran variedad de tecnologías, que van desde los satélites en el espacio a los sistemas de medición en tierra, mar y aire.

Aunque sus operaciones iniciales se remontan años antes de su confirmación legal (antiguo programa GMES), el programa se materializó finalmente mediante el Reglamento UE nº 377/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de abril de 2014 por el que se establece el Programa Copernicus.

La puesta en marcha de los servicios de Copernicus ha sido asignada a varios proyectos de investigación financiados por el «Séptimo Programa Marco FP7», mientras que las

actividades relacionadas con la infraestructura de observación son desarrolladas por la Agencia Espacial Europea, la Agencia Europea de Medio Ambiente y los Estados Miembros.

La sostenibilidad de los servicios operativos de Copernicus es posible a través de la financiación de la Unión Europea, organismos intergubernamentales y los propios Estados Miembros, considerando a estos servicios como "bienes públicos" que deben ser por tanto accesibles para cualquier organización o ciudadano particular.

### **1.2.2 Satélite Sentinel 2**

La misión Sentinel-2 se basa en una constelación de dos satélites, ambos orbitando la Tierra a una altitud de 786 km, pero separados 180°. Esta configuración optimiza la cobertura y los tiempos de revisita global [6]. Las imágenes satelitales multiespectrales, como es el caso del Sentinel-2, tiene diferentes niveles de procesamiento los cuales designan el grado de tratamiento que estas tienen. Esta información es relevante a la hora de implementar una cadena de trabajo para la obtención de un determinado producto.

Se sugiere considerar la siguiente nomenclatura:

Nivel-0: Llamada también data raw o cruda, se refiere a la data adquirida del satélite sin ningún tipo de procesamiento. Propiamente dicho, en este nivel, la data satelital no es aún una imagen (raster) sino únicamente un conjunto de bytes.

- Nivel-1: Es la data satelital procesada con algunas correcciones básicas (radiométrica, geométrica, remuestreo, etc.). Para el caso de las imágenes Sentinel-2, estas suelen ser distribuidas con Nivel de tratamiento 1C (Level-1C), ello es, en valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA).
- Nivel-2: Se refiere a la data obtenida a partir de la corrección atmosférica de la data Sentinel-2 Level-1C. La data con nivel de procesamiento 2A (Level-2A) suele

ser referida también como Reflectancia en la Superficie (SR o Surface Reflectance) o como reflectancia Bajo la Atmósfera (BOA). De ser necesario, esta data puede ser empleada para la obtención de Índices Normalizados (NDVI, NDWI, NBR, etc.), Ratios (B8/B4, B4/B3, etc.).

- Nivel-3: Es la data obtenida a partir producto de un mosaico espacio-temporal. Este tipo de información es generada para estudios que buscan analizar un determinado fenómeno dentro de intervalo de tiempo (mensual, semestral o anual), como es el caso de la deforestación.

En el caso de la investigación se utilizan imágenes de nivel 2, esto refiere a la data obtenida a partir de la corrección atmosférica de la data Sentinel-2 Level-1C. La data con nivel de procesamiento 2A (Level-2A) suele ser referida también como Reflectancia en la Superficie (SR o Surface Reflectance) o como reflectancia Bajo la Atmósfera (BOA). De ser necesario, esta data puede ser empleada para la obtención de Índices Normalizados (NDVI, NDWI, NBR, etc.), Ratios (B8/B4, B4/B3, etc.).

### **1.3 QGIS**

La tecnología GIS (Sistemas de Información Geográfica), constituye una de las herramientas adecuadas de manejo de información, ya que usa el modelo de base de datos geo relacional asociando un conjunto de información gráfica en forma de planos/mapas con bases de datos digitales. Esto, sintéticamente quiere decir que los GIS tienen como característica principal que el manejo de la información gráfica y alfanumérica se realiza de forma integrada, dentro de un mismo sistema informático, pudiendo abordar aspectos de alta complejidad relacionando datos de distintos orígenes.

QGIS es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto fácil de usar con licencia pública general GNU. Se ejecuta en Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y admite numerosos formatos y funcionalidades vectoriales, ráster y de bases de datos.

También ofrece diversas funcionalidades sobre sistemas de información geográfica y percepción remota debido a sus características principales admite diferentes formatos de datos representados vectoriales y ráster, con un nuevo soporte de formato que se agrega fácilmente mediante la arquitectura del complemento.

QGIS proporciona un número cada vez mayor de capacidades proporcionadas por funciones y complementos principales. Puede visualizar, administrar, editar, analizar datos y componer mapas imprimibles. Puede realizar análisis de datos espaciales en bases de datos espaciales y otros formatos compatibles con OGR. QGIS actualmente ofrece herramientas de análisis vectorial, muestreo, geoprocésamiento, geometría y gestión de bases de datos. Se puede componer mapas y explorar datos espaciales interactivamente con una GUI amigable.

Por lo general, las diferentes versiones de QGIS tienen nombres de ubicaciones donde se han celebrado reuniones o congresos de la Comunidad de desarrolladores. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su interfaz gráfica de usuario. QGIS permite la integración de herramientas desarrolladas tanto en C++ como en Python.

Las imágenes por percepción remota son una herramienta para la cartografía, la que resulta indispensable para el monitoreo de bosques de mangle y un valioso apoyo para la conservación y restauración de ambientes naturales. En la actualidad, distintos investigadores en el mundo utilizan fotografías aéreas e imágenes satelitales para la elaboración de mapas de la dinámica de cambio de las coberturas de uso de suelo y vegetación.

## **Capitulo II: Metodología y Procedimiento**

## **2.1 Metodología**

El desarrollo de la investigación se realizó mediante el análisis de imágenes satelitales, que fueron obtenidas de la galería del satélite Sentinel 2, existente en el proyecto corpernicus de la unión europea, que permite la descarga de datos de manera gratuita, la investigación en sus mayoría consiste en una recopilación de datos como las imágenes del nivel L2A de la bandas a utilizar correspondientes a la zona de estudio en distintas fechas a lo largo del intervalo de tiempo entre 2015 y 2023 con un filtro del 30% de nubosidad , para sus posterior procesamiento basado en el filtrado del NDVI, actividad que se realizó apoyándose en el software QGIS, que es un programa dedicado a la investigación medioambiental, en el fin de nuestro es el poder realizar un estudio sobre la cobertura y distribución de manglares y humedales en la zona de la barra de Santiago ,Ahuachapán , debido a que el ecosistema de los manglares es tan extenso difícilmente podemos tomar la barra de Santiago individualmente , por lo que se toma la decisión de extender el área de estudio a los ecosistemas semejantes colindantes a él , como en el caso de Metalio, Zanjón el chino , Santa Rita , Garita Palmera, el procesamiento de las imágenes correspondientes a estas zonas se realiza por medio de Python y su posterior comparación con el fin de lograr una visualización de los cambios en la área de estudio.

## **2.2 Procedimiento**

Al realizar este tipo de estudio primero debemos limitar nuestra área de trabajo utilizando el recurso proporcionado en QGIS donde nos encontramos con OpenStreetMaps para poder referenciar las imágenes descargadas y poder seguir utilizando las posteriores herramientas.



*Figura 1. Delimitación del área global de estudio (Sitio Ramsar Barra de Santiago, Ahuachapán).*

El área de la Barra de Santiago, por lo que nuestra nueva zona de estudio abarca otras zonas protegidas que son, El Zanjón El Chino, Santa Rita, Metalio, Garita Palmera, para delimitar toda esta extensión de territorio utilizamos como límites la carretera del Litoral, el río Paz, la orilla colindante del océano pacifico hasta la carretera de Acajutla.

Teniendo la visualización en vista de mapa del área a estudiar delimitamos nuestra zona de interés, como mencionamos anteriormente, no podemos tomar independientemente como se planteó originalmente.

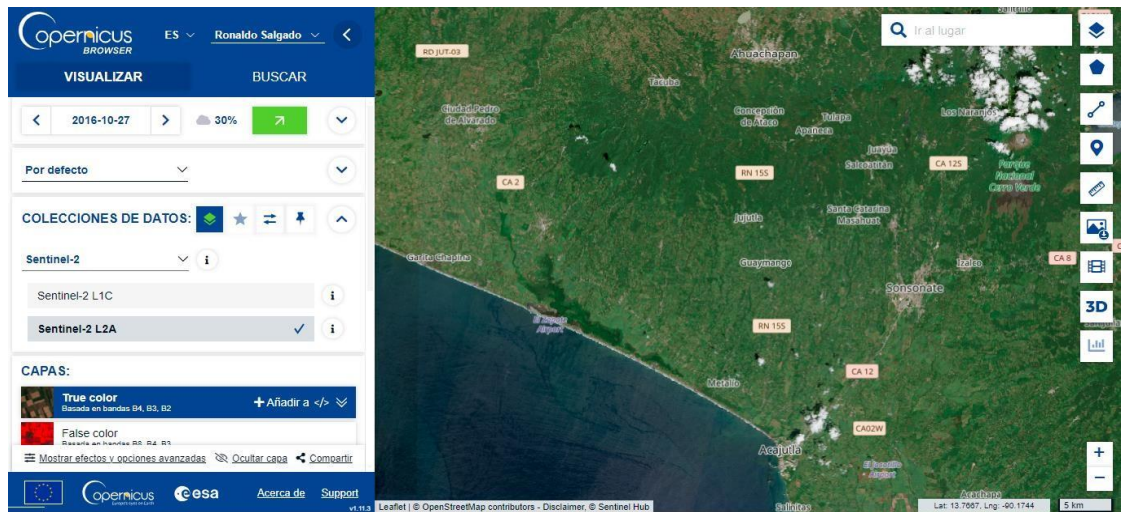
## 2.2.1 Delimitación de la zona



*Figura 2. Delimitación del área específica de estudio (Sitio Ramsar Barra de Santiago, Ahuachapán.*

En la Figura 2, se tiene la delimitación de cada zona de estudio que comprenden la Zona de Metalio, Zona de Barra de Santiago y la Zona que abarca Garita Palmera y Bola de Monte.

Delimitada el área de interés total obtenemos las imágenes de las bandas que necesitamos para realizar el estudio, datos que obtendremos desde la página oficial del proyecto Copérnicus.



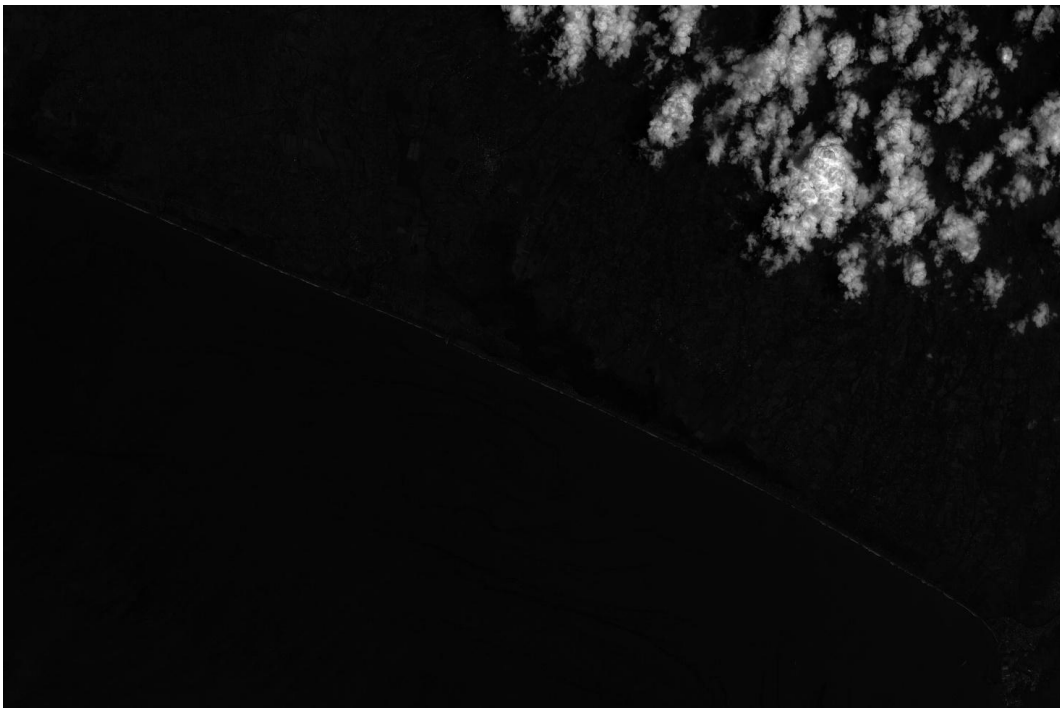
*Figura 3. Recolección de imágenes Satelitales del proyecto Copernicus de la European Space Agency (ESA).*

## 2.2.2 Imágenes RGB

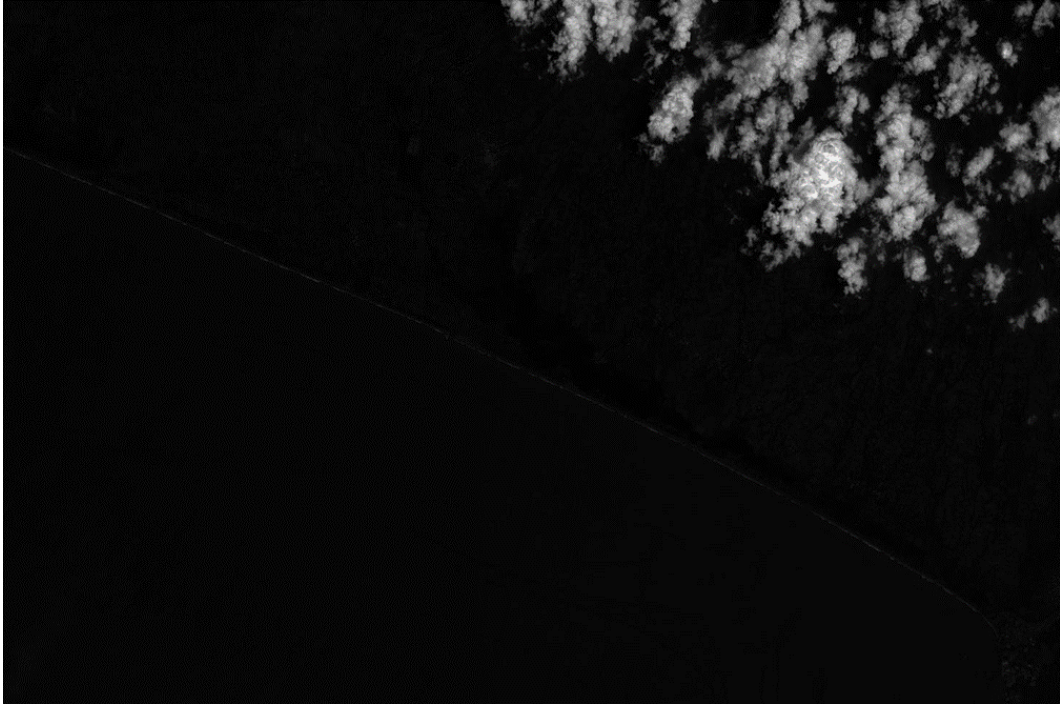
La creación de estas imágenes parte del paso de bandas a través de cuatro canales: rojo, verde, azul e infrarrojo. El paso de cada banda por un canal u otro permitirá teñir de colores los elementos que ofrezcan mayor o menor reflexión de longitudes de onda. Así, por ejemplo, la vegetación refleja en la zona del infrarrojo y absorbe en la zona visible del rojo. El juego cromático de estas bandas ayudará a elaborar mapas específicos de vegetación.



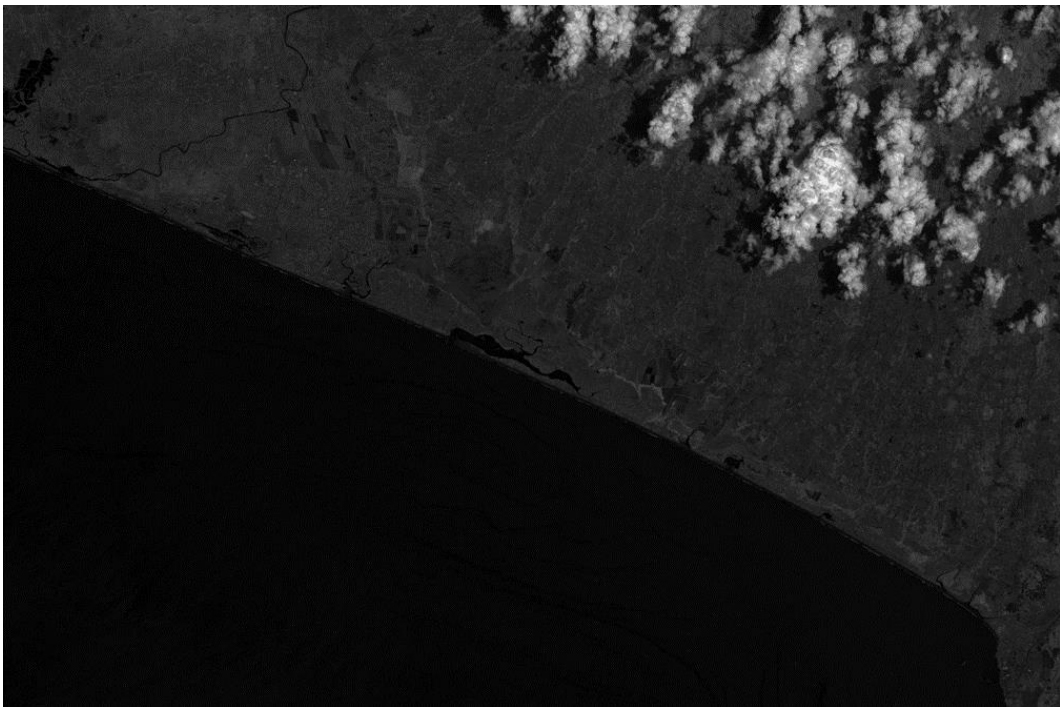
*Figura 4. Canales RGB (Banda Roja).*



*Figura 5. Canales RGB (Banda Verde).*

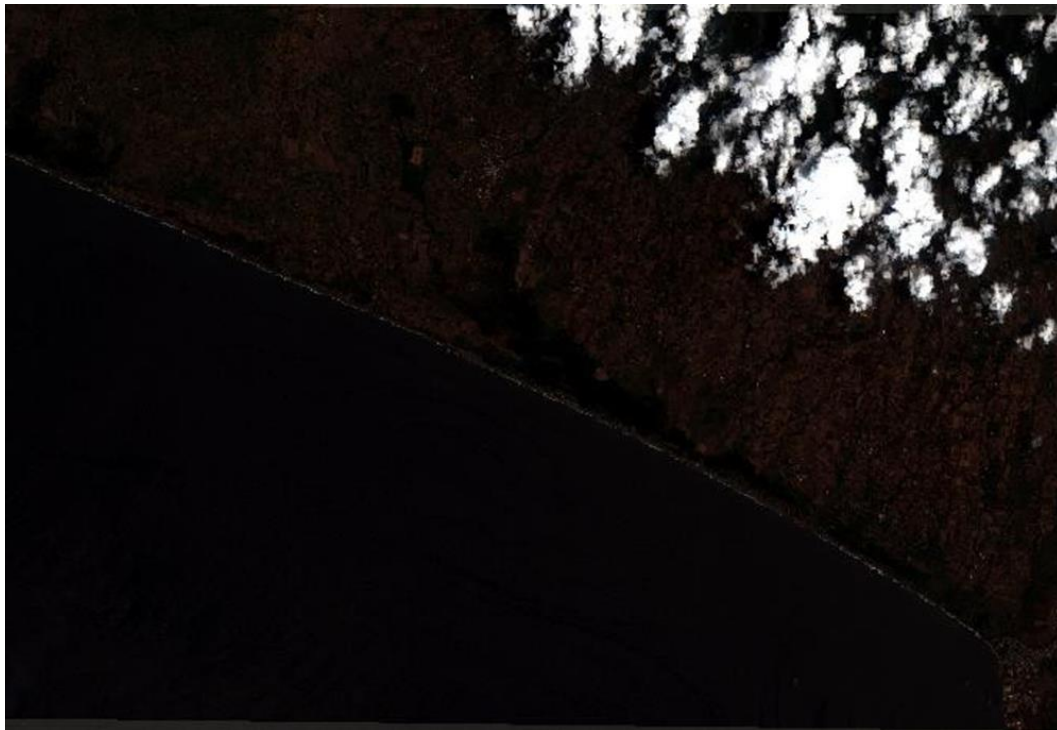


*Figura 6. Canales RGB (Banda Azul).*



*Figura 7. Banda NIR (Infrarrojo Cercano).*

Los pasos de cada una de las bandas por los tres canales RGB dará, como resultado, la combinación de imágenes satélite para formar una imagen a color natural o a falso color, realzando elementos muy concretos para su posterior estudio y análisis. Podremos realizar estas combinaciones siempre y cuando conozcamos el rango de trabajo en el que operan las bandas del satélite seleccionado y el comportamiento de reflexión de los elementos objeto de estudio. Cada imagen será teñida de un color y la mezcla de las tres bandas dará, como resultado, la imagen RGB destinada a realzar los aspectos territoriales deseados para el caso en específico de que se utiliza el NDVI se necesita una cuarta banda que es la NIR la banda de infrarrojo cercano, para la combinación de estas bandas nos apoyamos de las herramientas disponibles en el entorno de QGIS combinación de capa raster.



*Figura 8. Imagen que muestra la combinación de canales RGB y banda infrarroja cercana.*

Teniendo en cuenta que las imágenes obtenidas de la colección de Sentinel 2 son imágenes en formatos jp2 que son imágenes de alta resolución contienen una cantidad de información muy grande por lo que el filtrado se convierte en un proceso que consume una buena cantidad de los recursos del equipo informático por lo que para reducir el tiempo de procesamiento de las imágenes mediante el código que se le realiza un recorte a las imágenes siguiendo el área delimitada anteriormente utilizando la herramienta de recorte por máscara de QGIS donde la imagen base será la imagen RGB obtenida y se superpondrá las dimensiones de la máscara para recortar la zona de interés de la imagen RGB.



*Figura 9. Recorte de imagen en QGIS, tomando únicamente la porción de estudio para acelerar el tiempo de procesamiento en el programa.*

### 2.2.3 Índice de vegetación diferencial normalizado, ecuación

El índice de vegetación diferencial normalizado o índice NDVI, responde a uno de los parámetros calculados mediante el juego de bandas para el estudio de cubiertas vegetales. Su fundamento radica en el análisis de los valores de reflectancia de longitudes de onda en diferentes secciones del espectro electromagnético. Más concretamente en la banda visible del rojo y en la banda del infrarrojo cercano. Su resultado te ayudará a identificar de manera rápida la distribución y el tipo de vegetación en imágenes aéreas.

El índice de NDVI, se calcula por la ecuación (1):

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

### 2.2.4 Código Python

Para realizar el filtrado se desarrolló un código en lenguaje de Python para el cálculo del NDVI y para el cálculo del área a partir de este.

#### 2.2.4.1 Código Python para el cálculo de NDVI

```
1. #ZONA RAMSAR FILTRADO NDVI
2. from osgeo import gdal
3. import numpy as np

4. # se obtiene la capa actual que se desea llamar del area de
   trabajo del proyecto de QGIS
5. capa = QgsProject.instance().mapLayersByName("20230315AREA")[0]
6. ruta_capa = capa.source()

7. # Llama y abre la capa mediante GDAL
8. imagen_ds = gdal.Open(ruta_capa)

9. # Leer las bandas roja e infrarroja cercana
10. red_band =
    imagen_ds.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(np.float32)
```

```

11. # Band 3 es la banda roja
12. nir_band =
    imagen_ds.GetRasterBand(4).ReadAsArray().astype(np.float32)
13. # Band 4 es la banda infrarroja cercana
14. #se coloca como (1) y (4) para llamar las bandas
    respectivamente porque así se cargo el orden para generar la
    imagen RGB en QGIS

15. #Se realiza el calculo del NDVI
16. ndvi = (nir_band - red_band) / (nir_band + red_band)

17. # Aplicar umbral para identificar zonas con manglares asumiendo
    una ventana del 0.4 y 1 para el ndvi
18. umbral_manglares = 0.4 #El umbral se ajusta según sea
    necesario
19. manglares = ndvi > umbral_manglares

20. # Aplicar la máscara a las bandas de interés
21. red_manglares = np.where(manglares, red_band, 0)
22. nir_manglares = np.where(manglares, nir_band, 0)

23. # Calcular el NDVI solo en áreas de manglares
24. ndvi_manglares = np.where(manglares, (nir_manglares -
    red_manglares) / (nir_manglares + red_manglares), 0)

25. # Definir la ruta de la imagen de salida
26. output_path = 'E:/TESIS/NDVI/20230315NDVI.tif'

27. # Crear un objeto de imagen con GDAL
28. driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')

29. ndvi_ds = driver.Create(output_path, imagen_ds.RasterXSize,
    imagen_ds.RasterYSize, 1, gdal.GDT_Float32)

30. # Escribe el NDVI en la imagen de salida
31. ndvi_ds.GetRasterBand(1).writeArray(ndvi_manglares)

32. #Se establece información geoespacial
33. ndvi_ds.SetProjection(imagen_ds.GetProjection())
34. ndvi_ds.SetGeoTransform(imagen_ds.GetGeoTransform())

35. # Ciera los datasets
36. imagen_ds = None
37. ndvi_ds = None

38. print("NDVI calculado y guardado en:", output_path)

39. # Abrir la imagen de salida del NDVI con GDAL
40. ndvi_ds = gdal.Open(output_path)

41. # Lee el NDVI como un array numpy
42. ndvi_array =
    ndvi_ds.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(np.float32)
43. # Cuenta los pixeles de manglares (pixeles con valor diferente
    de cero)
44. pixeles_manglares = np.count_nonzero(ndvi_array)

```

```

45. # Obtener la resolución espacial de la imagen
46. resolucion_x = ndvi_ds.GetGeoTransform()[1]
47. resolucion_y = ndvi_ds.GetGeoTransform()[5]
48. # Cierra el dataset
49. ndvi_ds = None

```

#### 2.2.4.2 Código Python para el cálculo del área a partir del NDVI

```

1. #ZONA RAMSAR CALCULO NUMERICO DE AREA NDVI
2. from osgeo import gdal
3. import numpy as np

4. # Definir la ruta de la imagen de salida del NDVI
5. output_path = 'E:/TESIS/NDVI/20230315NDVI.tif'

6. # Abrir la imagen de salida del NDVI con GDAL
7. ndvi_ds = gdal.Open(output_path)

8. # Lee el NDVI como un array numpy
9. ndvi_array =
   ndvi_ds.GetRasterBand(1).ReadAsArray().astype(np.float32)

10. # Cuenta los píxeles de manglares (píxeles con valor diferente
    de cero)
11. pixeles_manglares = np.count_nonzero(ndvi_array)

12. # Obtener la resolución espacial de la imagen
13. resolucion_x = ndvi_ds.GetGeoTransform()[1]
14. resolucion_y = ndvi_ds.GetGeoTransform()[5]
15. # Calcula el área de cada píxel en metros cuadrados
16. area_pixel_m2 = abs(resolucion_x * resolucion_y)

17. # Calcula el área cubierta por manglares en metros cuadrados
18. area_manglares_m2 = pixeles_manglares * area_pixel_m2

19. print("Área cubierta por manglares en la imagen de salida:",
    area_manglares_m2, "metros cuadrados")

20. # Cierra el dataset
21. ndvi_ds = None

```

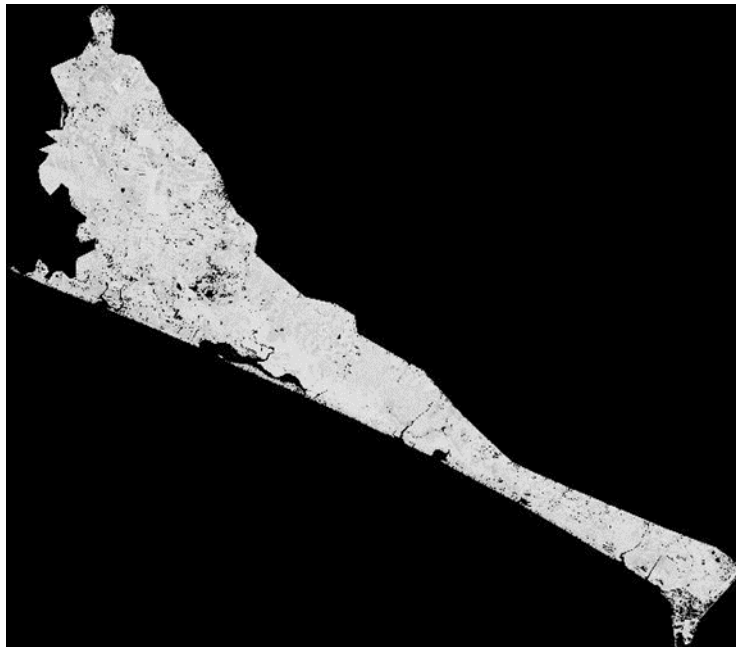
Al procesar las imágenes mediante el primer código obtenemos la imagen NDVI, con el segundo código cuantificar numéricamente el área cubierta por lo píxeles que son reconocidos como población vegetal de mangle que posteriormente se anotan para generar la serie temporal, en la cual se logra visualizar el cambio que ha tenido las zonas con presencia de manglares en los periodos entre 2015 y 2023.

## **Capitulo III: Resultados**

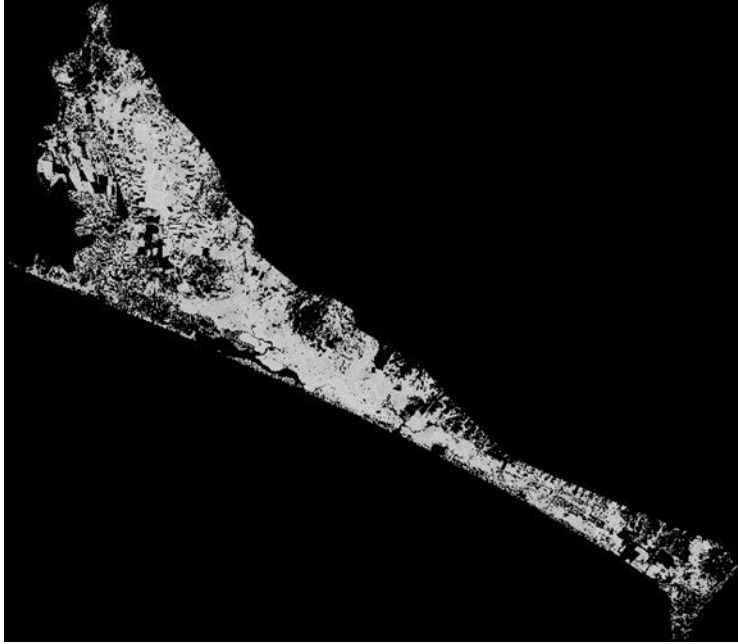
### 3.1 Colección de imágenes obtenidas

A continuación, se presentan los resultados de la investigación. Durante el desarrollo del estudio, se decidió ampliar el enfoque más allá de la zona de Barra de Santiago para incluir también los ecosistemas similares y adyacentes a la zona Ramsar de Barra de Santiago. Por lo tanto, se muestra una serie de imágenes que conforman la colección de datos utilizada en la investigación.

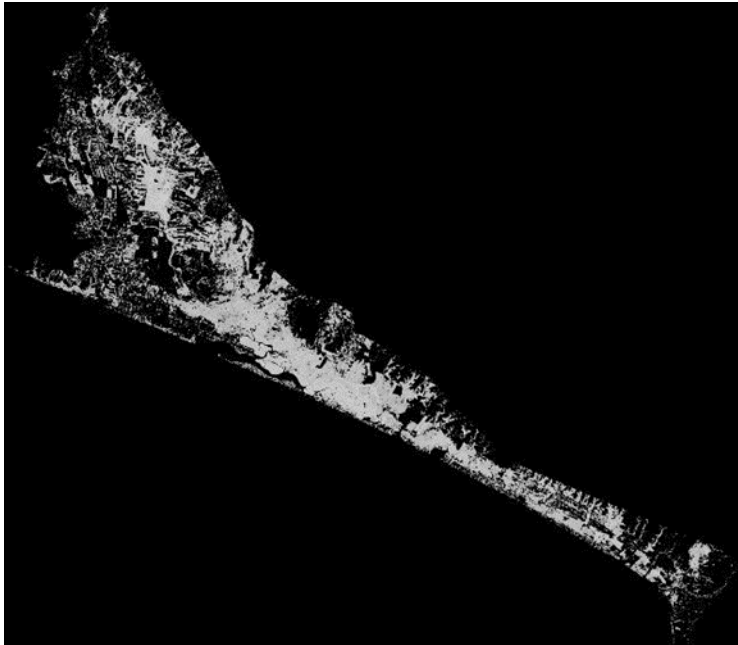
#### 3.1.1 Zona completa de estudio



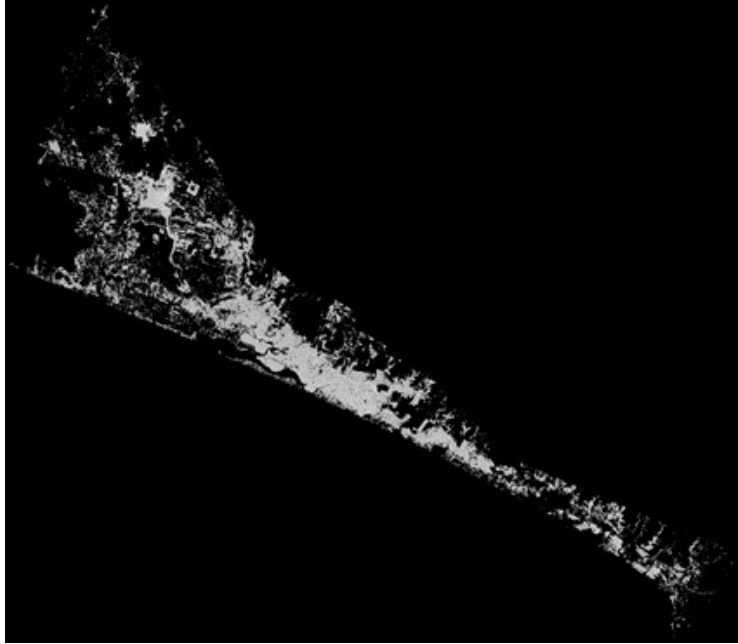
*Figura 10. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona Total.*



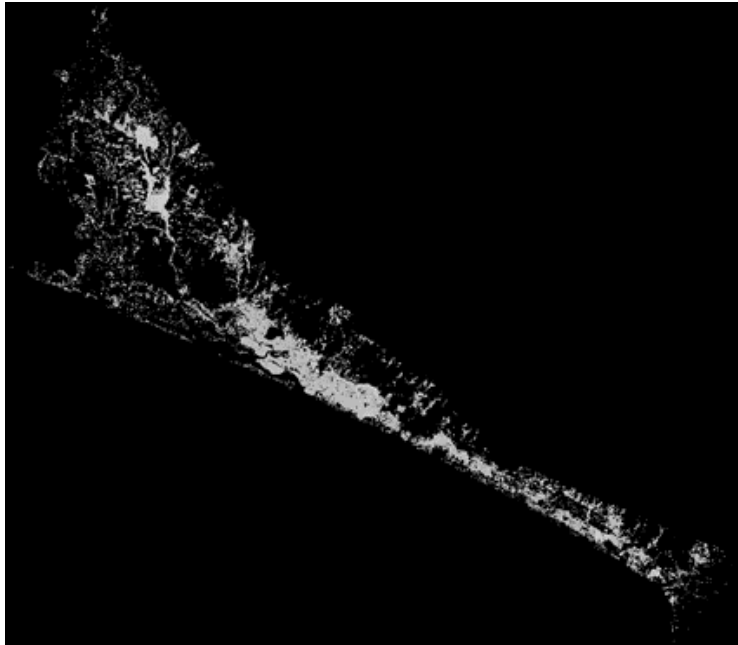
*Figura 11. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona Total.*



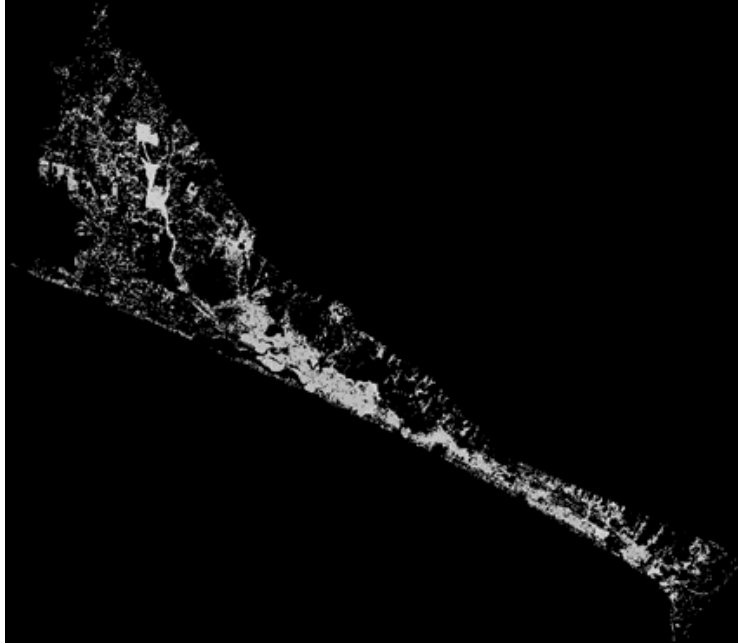
*Figura 12. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona Total.*



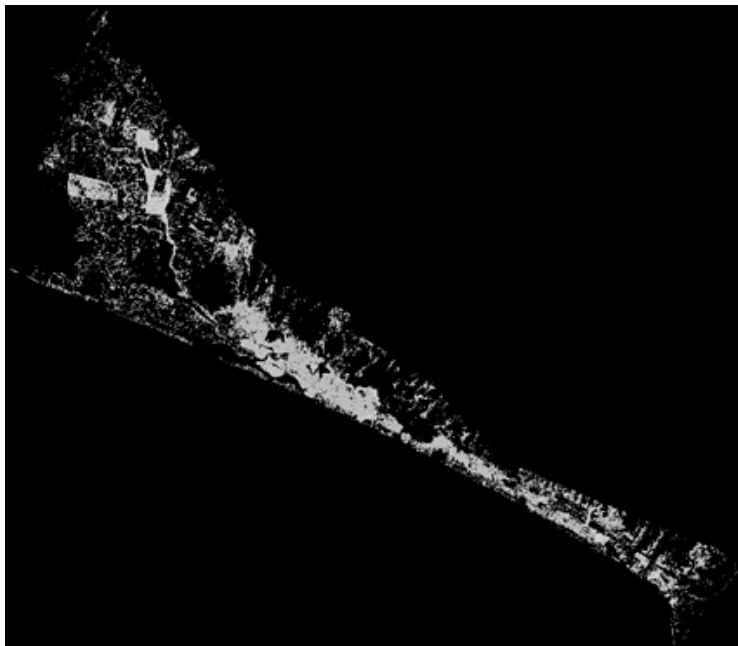
*Figura 13. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona Total.*



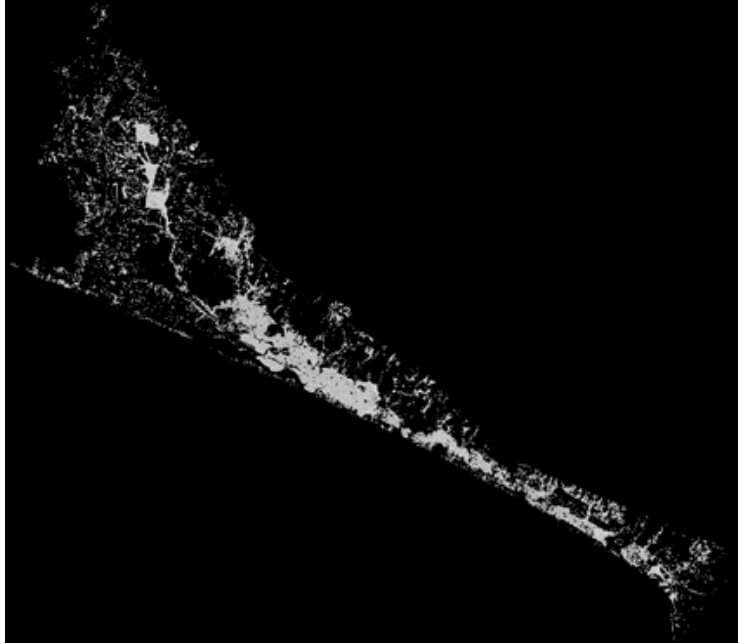
*Figura 14. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona Total.*



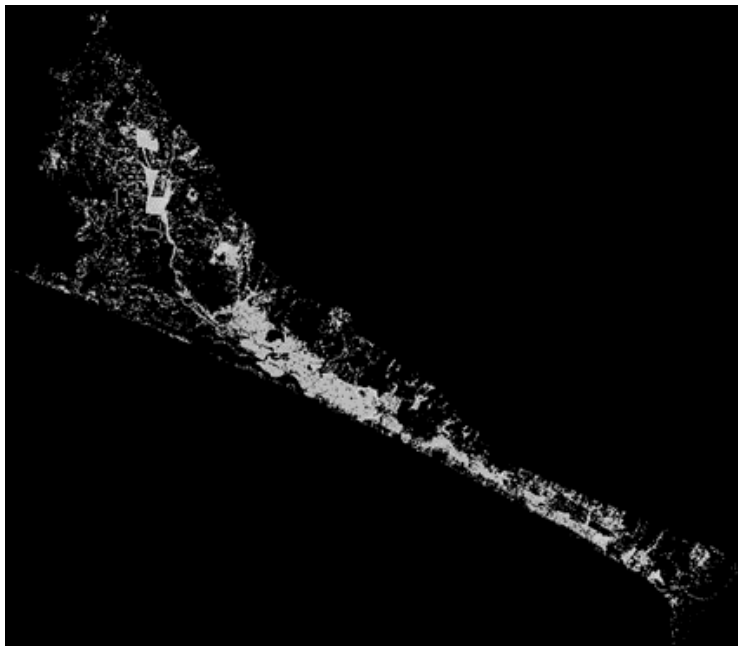
*Figura 15. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona Total.*



*Figura 16. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona Total.*

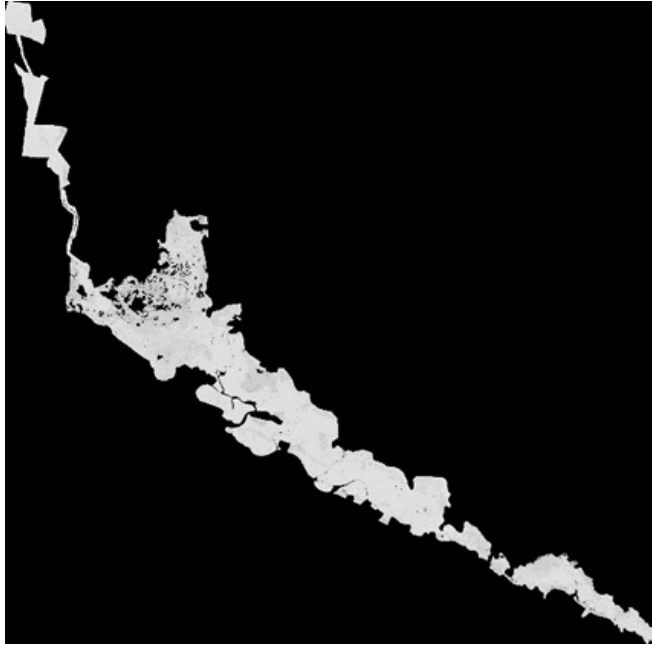


*Figura 17. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona Total.*

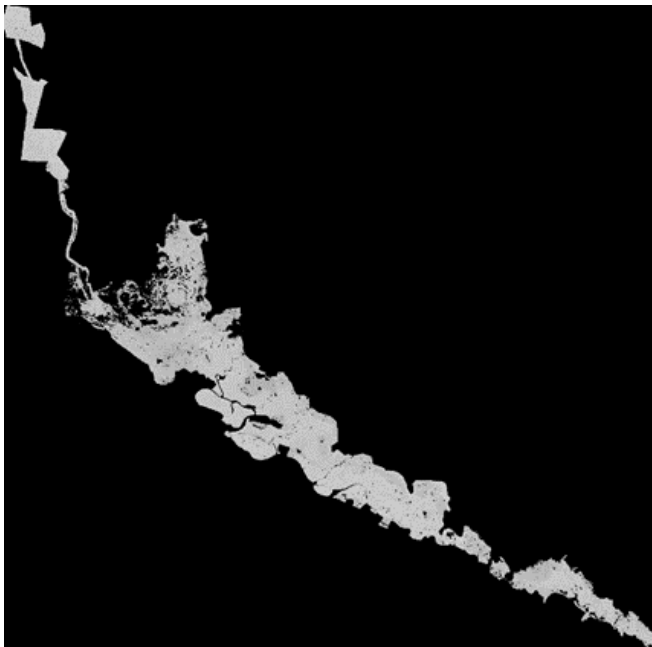


*Figura 18. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona Total.*

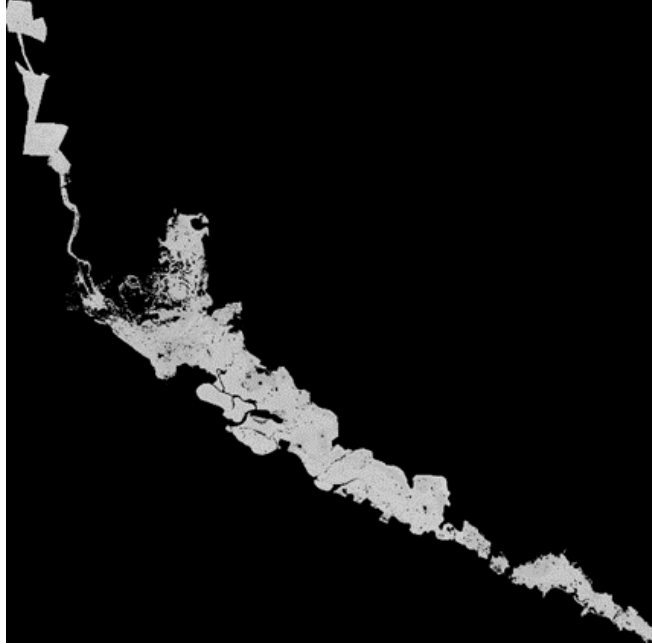
### 3.1.2 Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino



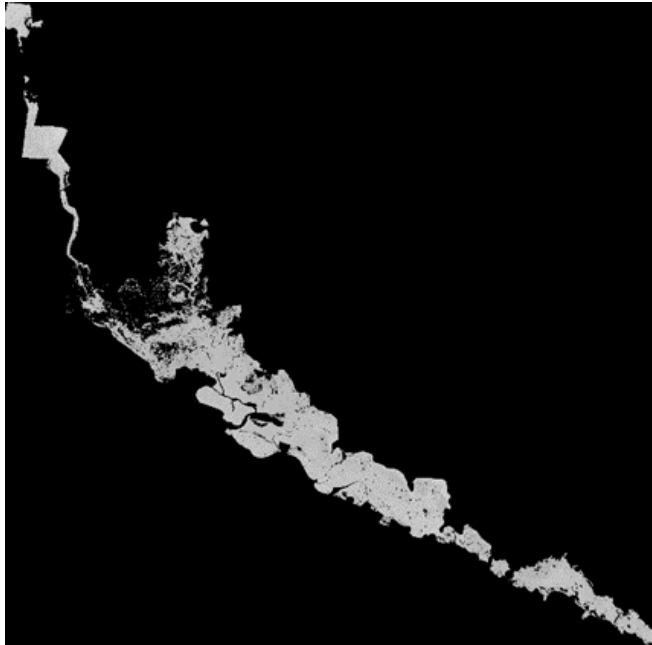
*Figura 19. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



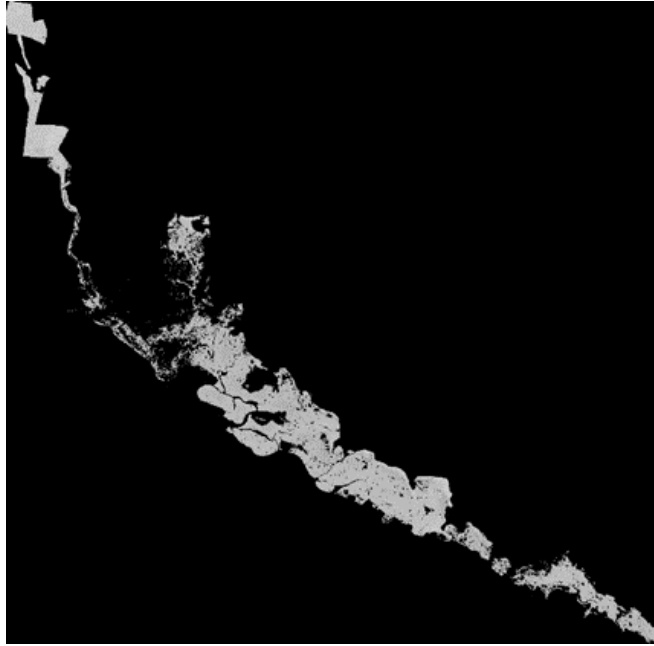
*Figura 20. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



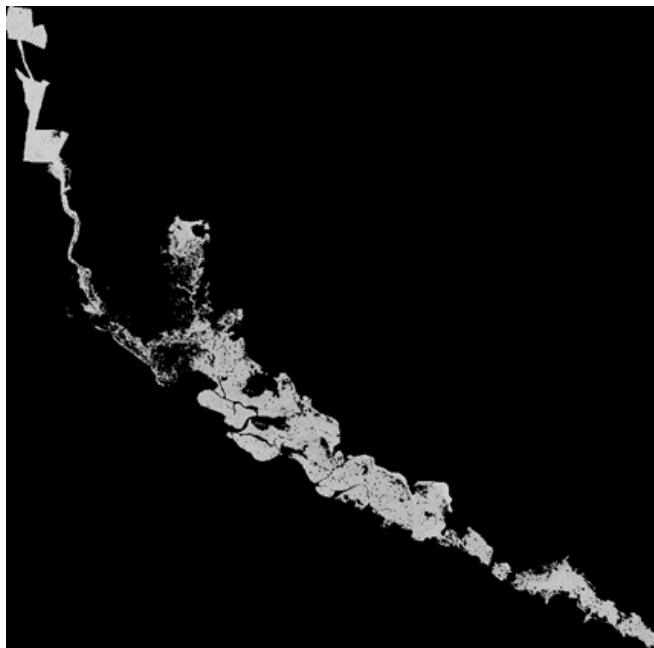
*Figura 21. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



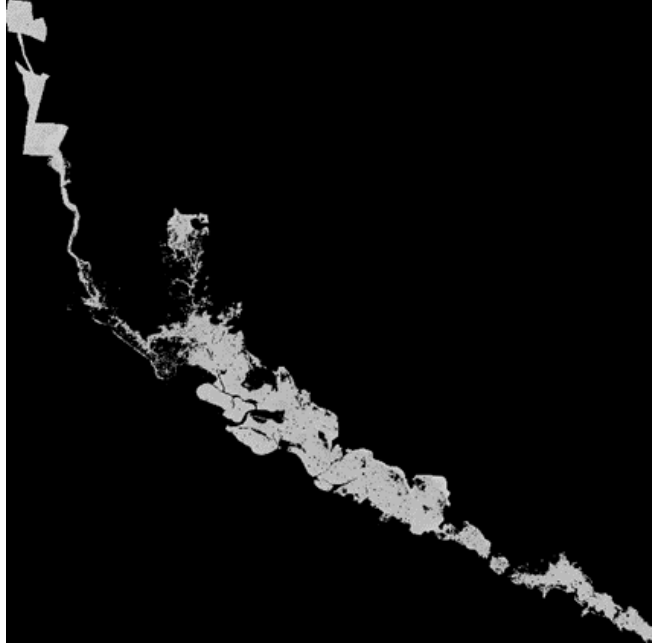
*Figura 22. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



*Figura 23. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



*Figura 24. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*



*Figura 25. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*

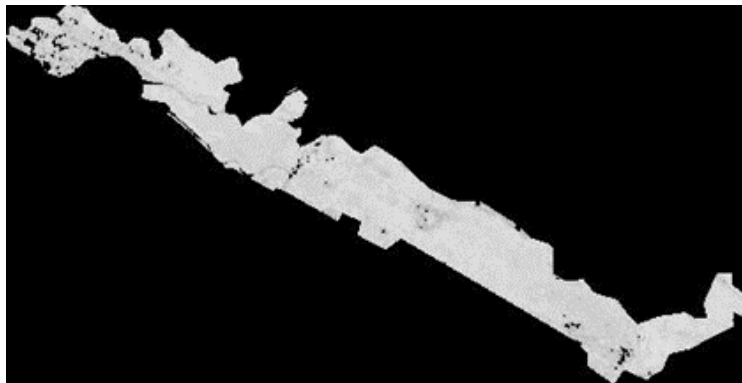


*Figura 26. Imagen NDVI del periodo de 20 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*

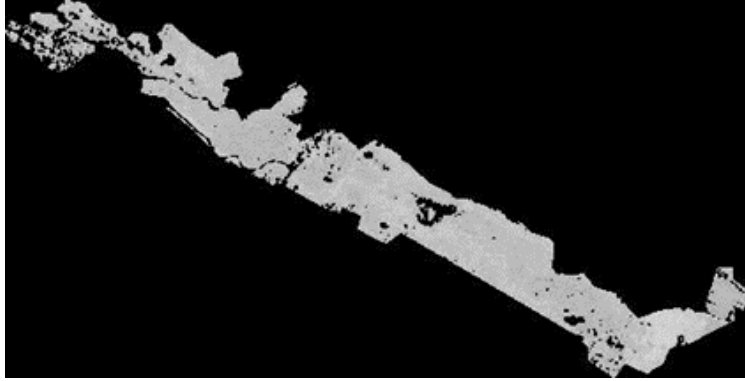


*Figura 27. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.*

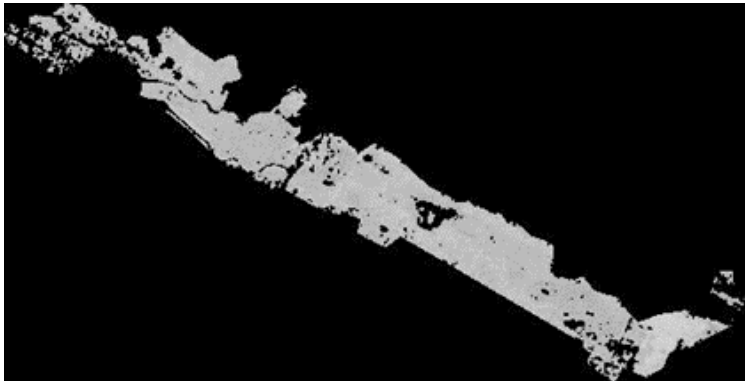
### **3.1.3 Zona de Metalio**



*Figura 28. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de Metalio.*



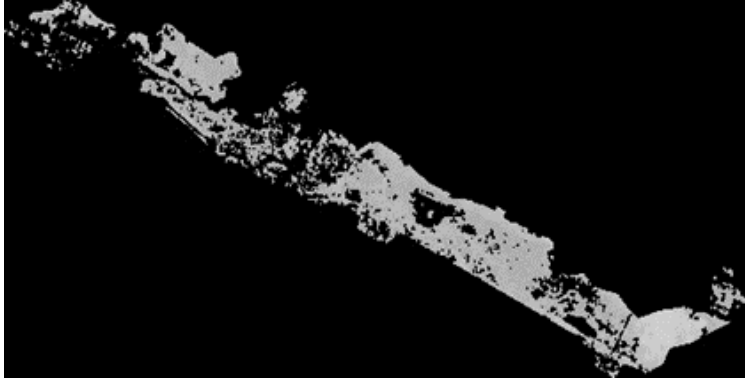
*Figura 29. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de Metalio.*



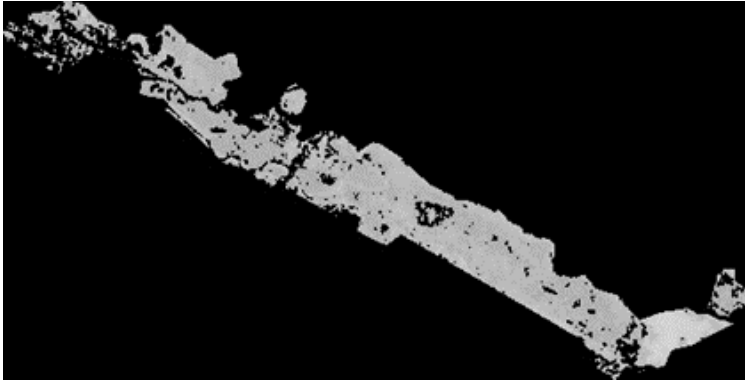
*Figura 30. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de Metalio.*



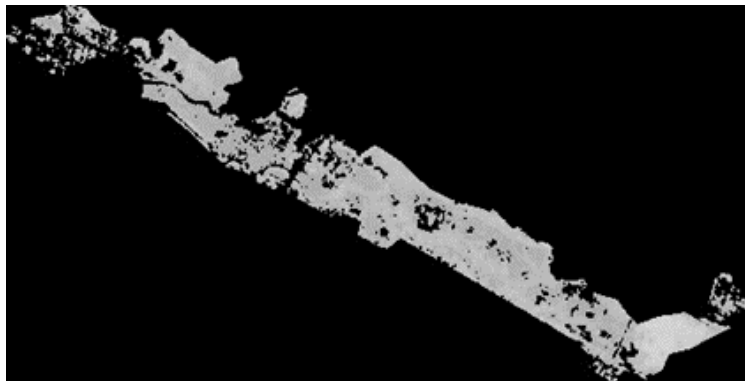
*Figura 31. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de Metalio.*



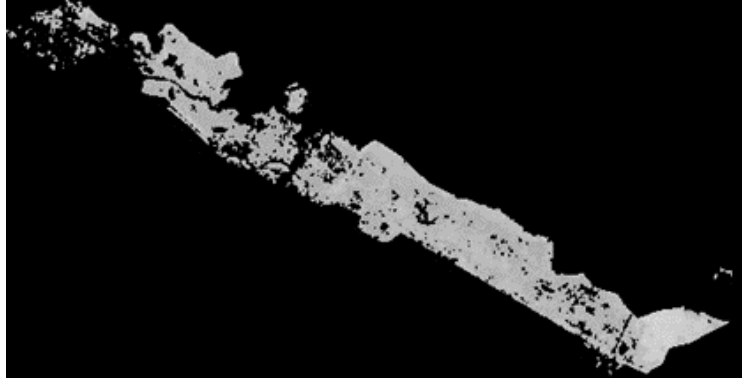
*Figura 32. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de Metalio.*



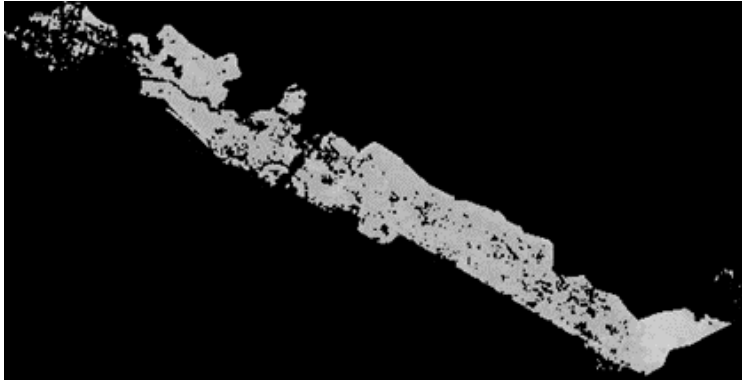
*Figura 33. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de Metalio.*



*Figura 34. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de Metalio.*



*Figura 35. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona de Metalio.*



*Figura 36. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de Metalio.*

#### **3.1.4 Zona de Garita Palmera**



*Figura 37. Imagen NDVI del periodo de 2015 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 38. Imagen NDVI del periodo de 2016 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 39. Imagen NDVI del periodo de 2017 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 40. Imagen NDVI del periodo de 2018 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 41. Imagen NDVI del periodo de 2019 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 42. Imagen NDVI del periodo de 2020 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 43. Imagen NDVI del periodo de 2021 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 44. Imagen NDVI del periodo de 2022 de la Zona de Garita Palmera.*



*Figura 45. Imagen NDVI del periodo de 2023 de la Zona de Garita Palmera.*

### 3.2. Análisis de la colección de imágenes obtenidas por zona

#### 3.2.1 Análisis de la Zona Total de estudio

De las imágenes generadas se calcula el área que es reconocida como zona de manglar obteniendo la Tabla 1 para la zona total de estudio.

AREA DE ESTUDIO TOTAL				
Año	Mes	Día	Cobertura(m2)	Porcentaje
2015	10	23	30,312,400.0	100%
2016	12	16	27,676,900.0	91%
2017	1	15	26,443,300.0	87%
2018	1	30	23,916,100.0	79%
2019	3	16	19,908,300.0	66%
2020	4	9	20,406,300.0	67%
2021	4	4	20,684,000.0	68%
2022	3	15	21,040,500.0	69%
2023	3	15	21,134,000.0	70%

Tabla 1. Datos del cambio en la cobertura en la Zona Total de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.

Suavizando la gráfica de la cobertura total del área de estudio utilizando solo las imágenes de temporada de verano para evitar la interferencia de cultivos, se obtienen los siguientes resultados:

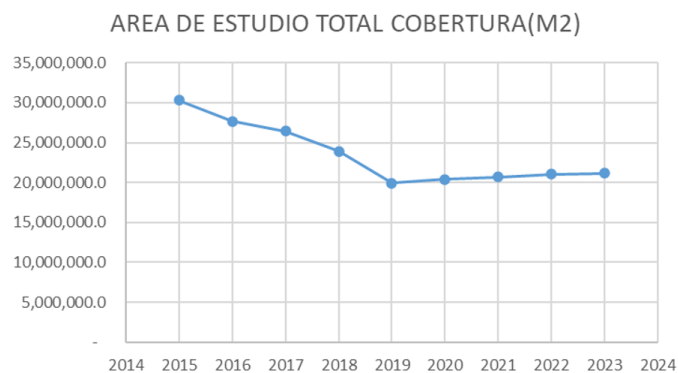


Figura 46. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona Total de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.

### 3.2.2 Análisis de la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino

De las imágenes generadas se calcula el área que es reconocida como zona de manglar, obteniendo la Tabla 2.

BARRA DE SANTIAGO, SANTA RITA Y ZANJON EL CHINO				
Año	Mes	Día	Cobertura (m2)	Porcentaje
2015	10	23	26,635,800.0	100%
2016	12	16	24,605,100.0	92%
2017	1	15	23,652,800.0	89%
2018	1	30	20,987,700.0	79%
2019	3	16	18,221,700.0	68%
2020	4	9	18,303,600.0	69%
2021	4	4	18,665,100.0	70%
2022	3	15	18,999,500.0	71%
2023	3	15	19,066,700.0	72%

Tabla 2. Datos del cambio en la cobertura en la Zona de Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.

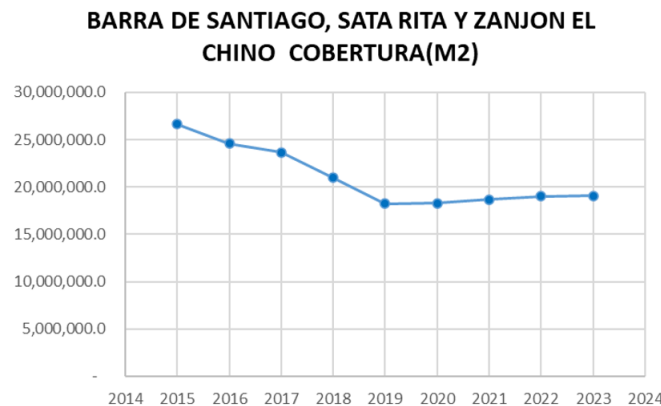


Figura 47. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de la Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino.

### 3.2.3 Análisis de la Zona de Metalio

De las imágenes generadas se calcula el área que es reconocida como zona de manglar, obteniendo la Tabla 3.

METALIO		
Año	Cobertura (m2)	Porcentaje
2015	2,107,500	100%
2016	1,918,800	91%
2017	1,792,100	85%
2018	1,951,800	93%
2019	1,351,600	64%
2020	1,711,900	81%
2021	1,672,200	79%
2022	1,563,400	74%
2023	1,611,000	76%

Tabla 3. Datos del cambio en la cobertura de la Zona de Metalio.

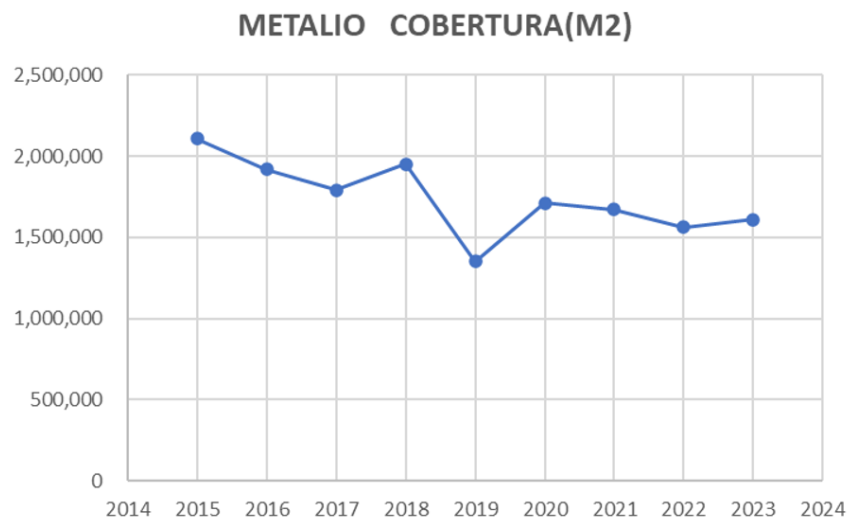


Figura 49. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de Metalio.

### 3.2.4 Análisis de la Zona de Garita Palmera

De las imágenes generadas se calcula el área que es reconocida como zona de manglar, obteniendo la Tabla 4.

GARITA PALMERA, BOLA DE MONTE		
Año	Cobertura (m <sup>2</sup> )	Porcentaje
2015	1,569,100	100%
2016	1,153,000	73%
2017	998,400	64%
2018	976,600	62%
2019	335,000	21%
2020	390,800	25%
2021	346,700	22%
2022	477,600	30%
2023	456,300	29%

Tabla 4. Datos del cambio en la cobertura de la Zona de Garita Palmera.

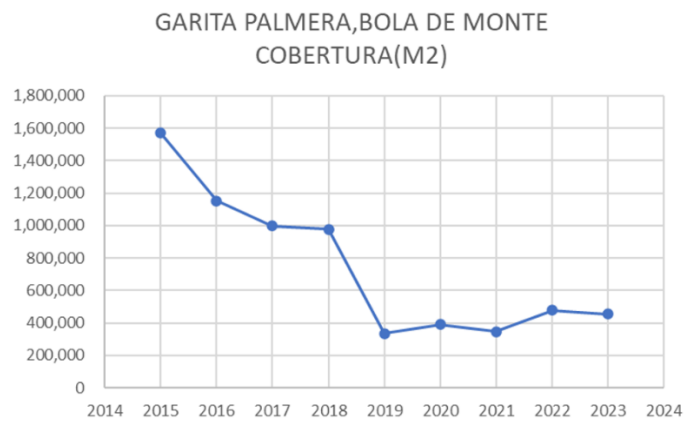


Figura 50. Resultados del cambio en la cobertura en la Zona de Garita Palmera.

### 3.3 Análisis general

Con las gráficas, se observa claramente una reducción en la cobertura de los manglares. En El Salvador, se destacan dos estaciones entre las cuatro que se han considerado: verano e invierno. Estas estaciones abarcan las otras dos, por lo que, en los años 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022, se utilizaron imágenes con un porcentaje de nubosidad del 30%. Por esta razón, se decidió generar un gráfico que tomara en cuenta estas condiciones para mostrar la variación entre ambas estaciones.

El índice NDVI, se basa en las bandas roja e infrarroja cercana. En esta investigación, se utilizó un umbral de NDVI de 0.4, ya que en este rango puede incluirse cierta vegetación perteneciente a cultivos. Aunque este rango puede afectar los resultados debido a su capacidad para incluir vegetación que no es manglar, se decidió mantenerlo para evitar descartar zonas con mangle blanco. La estructura del mangle blanco es más sensible a cambios ambientales, lo que puede dificultar su detección. Para reducir posibles datos erróneos, se sugiere realizar el análisis en estaciones en las que los cultivos no estén totalmente maduros o aún se encuentren en temporada de siembra, evitando fases de germinación, plántula o crecimiento vegetal. Esto permitirá aprovechar la estabilidad de los manglares en su ubicación, facilitando su delimitación visual. Se utilizarán mapas y recursos geográficos previos para obtener resultados parciales de cada zona en condiciones óptimas para el análisis. Al analizar los resultados, se observa una tendencia general a la disminución del área de manglares con el paso del tiempo. Sin embargo, también se identifican momentos en los que esta tendencia muestra un aumento. Este incremento puede atribuirse a los diversos proyectos en curso destinados a la recuperación de las zonas de manglares.

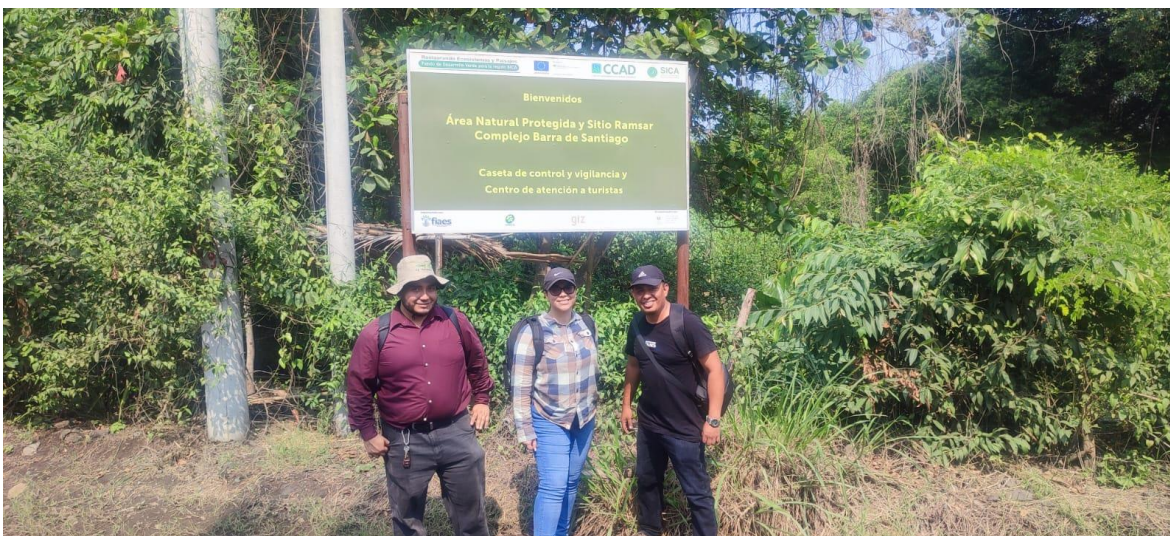
A partir de los resultados obtenidos decidimos indagar sobre los posibles eventos que han colaborado en la Evolución de los eventos relacionados con el impacto ambiental en la región, incluyendo proyectos de expansión, contaminación, desastres naturales, y daños a ecosistemas locales.

- 2015: No se reportan desastres naturales en la Barra de Santiago, pero comienza el proyecto de expansión urbana en Santa Rita, impulsado por la alcaldía, lo que afecta negativamente las áreas de manglares cercanas.
- 2016: Se experimentan inundaciones moderadas, debido a fuertes lluvias estacionales, afectando principalmente las áreas bajas alrededor de la Barra de Santiago.
- 2017: La región enfrenta impactos menores de tormentas tropicales (Nate), con lluvias intensas que causan inundaciones en áreas vulnerables.
- 2018: La Barra de Santiago experimenta una sequía prolongada que afecta los niveles de agua en ríos y humedales, exacerbando los problemas ambientales y la falta de recursos hídricos para las comunidades locales.
- 2019: Se descubren altos niveles de arsénico y cadmio en la Barra de Santiago, contaminantes que resultan altamente tóxicos para la flora y fauna local. Además, se reporta la pérdida de manglares cerca de la comunidad Playa Monzón, en el cantón Metalio, Acajutla, Sonsonate. Esta pérdida se atribuye a monocultivos, la sobreexplotación de recursos hídricos, escorrentías de agua con agrotóxicos, y amenazas adicionales como el cultivo de caña de azúcar y el cambio climático.
- 2020: En junio, la Barra de Santiago sufre los efectos de las tormentas Amanda y Cristóbal. Las fuertes lluvias y vientos provocan inundaciones y daños a las infraestructuras, así como a los ecosistemas costeros y áreas de manglares.
- 2021: La Zona experimenta olas de calor y sequías que agravan la situación de los humedales y los recursos hídricos, afectando la biodiversidad local.
- 2022: Incendios Forestales: Aunque no se registran incendios directos en la Barra de Santiago, Un incendio devastador en Zanjón El Chino, ubicado en el cantón Garita Palmera, destruyó más de 5,000 árboles de diversas especies, así como nidos de cocodrilos e iguanas. Además, el manglar de Garita Palmera se encuentra seco debido a la obstrucción de bocanas y ríos, resultado de la construcción de represas para el riego de monocultivos de caña de azúcar. La contaminación por herbicidas usados en la producción de caña también afecta negativamente a los manglares.

- 2023: La región enfrenta inundaciones debido a tormentas intensas y lluvias prolongadas, que afectan las áreas costeras y los humedales de la Barra de Santiago.

Durante este período, la Barra de Santiago ha enfrentado una serie de desastres naturales, incluyendo tormentas, inundaciones, sequías y olas de calor, que han tenido un impacto significativo en el medio ambiente y las comunidades locales.

## Visita Técnica a la Barra De Santiago



*Figura 51. Integrantes del grupo de investigación en el Sitio Ramsar Barra de Santiago.*

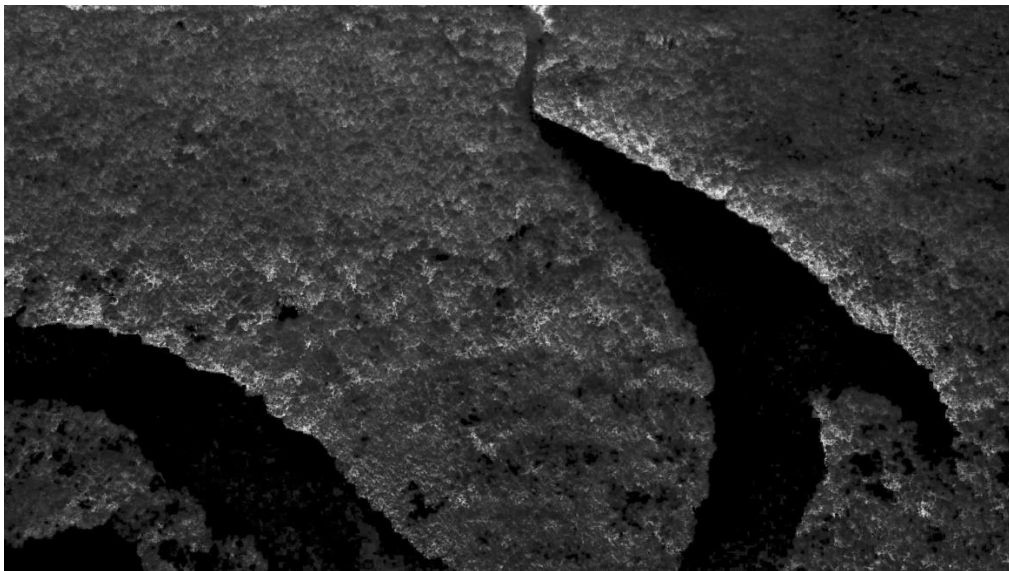


*Figura 52. Docente asesor e integrantes del grupo en zona de cultivo, dentro de la Barra de Santiago.*

## Imágenes tomadas con drone en visita técnica a la Barra de Santiago



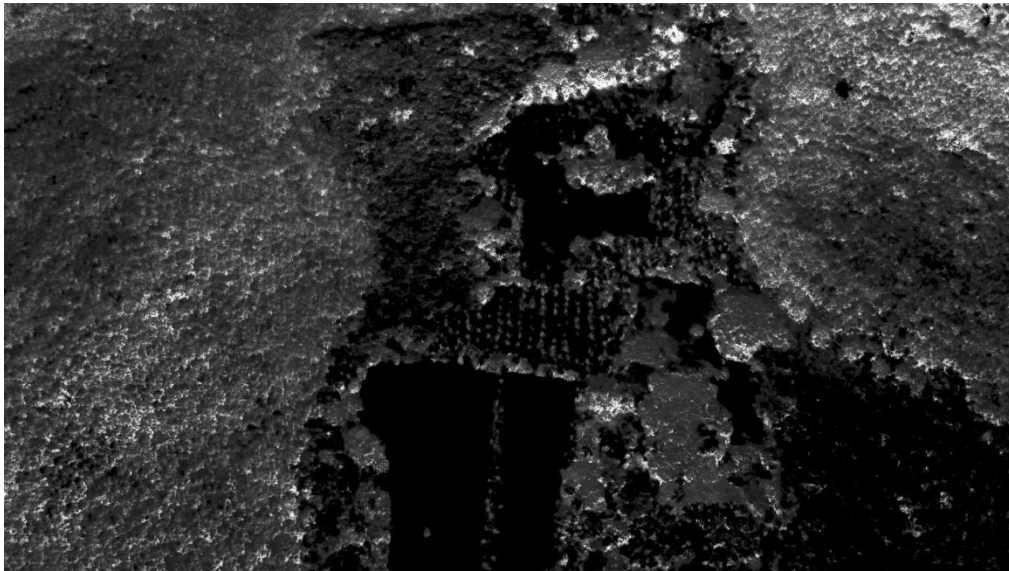
*Figura 53. Imagen tomada con drone de la Barra de Santiago.*



*Figura 54. Filtro de NDVI visible, aplicado a la Figura 53.*



*Figura 55. Zona de Cultivos y vegetación en la Barra de Santiago.*



*Figura 56. Filtro de NDVI aplicado a Figura 55.*

## Conclusiones

A través del mapa oficial del MARN, se identificó el Sitio Ramsar Barra de Santiago en Ahuachapán, el cual se extendió posteriormente a las zonas de Santa Rita, Zanjón El Chino, Metalio y Garita Palmera. Estas áreas fueron delimitadas mediante polígonos irregulares en el entorno QGIS, utilizando imágenes del nivel L2A del satélite Sentinel-2, contenidas en el proyecto Copernicus de la ESA. Se obtuvieron imágenes en diferentes períodos entre los años 2015 y 2023. La zona de estudio principal se amplió porque, al analizar un ecosistema de humedales y manglares, es necesario considerar las zonas adyacentes y no tratarlas de manera aislada.

Las series temporales se generaron a partir de las imágenes obtenidas de la colección del proyecto Copernicus, correspondientes a los años 2015-2023. Se seleccionaron los meses en los que se observó el mayor cambio en la cobertura de los manglares. Cada archivo se importó especificando las capas RGB, y las imágenes se procesaron en el entorno QGIS. Posteriormente, se aplicó un filtro mediante código Python utilizando un índice NDVI de 0.4, con el objetivo de incluir todos los tipos de manglares presentes en el área de estudio.

Con base en las series temporales obtenidas, se observa una disminución en la cobertura de los manglares. Se ha recopilado información sobre eventos significativos que involucran factores tanto naturales como humanos en diversas áreas del sitio Ramsar durante el período de estudio. Entre estos eventos destacan el inicio de proyectos de expansión urbana en las zonas adyacentes a áreas protegidas, la presencia de sustancias tóxicas que afectan a la flora y fauna, el uso de herbicidas, así como el incremento de cultivos, especialmente de caña de azúcar. También se han identificado problemas relacionados con la explotación de la zona para acuicultura, la sobrepesca, el desequilibrio del ecosistema, incendios, tormentas tropicales y la obstrucción de bocanas y ríos debido a la construcción de represas para el riego de cultivos.

Para asegurar la conservación del Sitio Ramsar, se propone continuar con programas específicos destinados a la restauración de los humedales. Estos programas deben

incluir la participación de las comunidades codependientes y la regulación de las actividades extractivas. Es fundamental garantizar el cumplimiento de las leyes que protegen los humedales y regular las actividades económicas con un enfoque de sostenibilidad ambiental con el fin de proteger este tipo de ecosistema.

El cambio climático es un problema global que afecta a todos los ecosistemas, incluidos los manglares en El Salvador. Estos ecosistemas están experimentando impactos negativos debido al aumento del nivel del mar, lo cual, durante las mareas altas, incrementa la salinidad del agua. Este cambio altera la proporción de agua dulce y salada que los manglares necesitan para prosperar. Además, las tormentas tropicales contribuyen a su deterioro mediante el flujo de agua generado por las lluvias y las ráfagas de viento, que pueden derribar mangles de gran altura. Las sequías también afectan negativamente a estos ecosistemas al reducir los niveles de agua disponibles y aumentar su vulnerabilidad a los incendios.

Entre los factores externos que agravan el deterioro de los manglares se encuentran la tala indiscriminada, el uso excesivo de tierras para el cultivo de caña de azúcar, la extracción de madera, la contaminación y la pesca destructiva.

Con la investigación realizada se puede observar que dentro del periodo de tiempo de 2015 al 2023 el Área de estudio delimitada por el río Paz, la carretera Litoral y Carretera de Acajutla ubicado al occidente de El Salvador presenta una reducción en la cobertura y distribución de los manglares de las zonas un 30% con respecto a su valor en el 2015, Para el bloque de la Barra de Santiago, Zanjón el Chino y Santa Rita con una reducción del 28%, Para segundo bloque conformado por Metalio del 24% y para el tercer bloque conformado por Garita Palmera y Bola de Monte del 71%.

Con base a lo encontrado en la ficha informativa del sitio Ramsar que cuantifica un área de 25.715 km<sup>2</sup> de bosque de mangle para la reserva natural Barra de Santiago, se calcula un porcentaje de error del 3% aproximadamente, respecto al área calculada de 26.6358 km<sup>2</sup> de las zonas de Barra de Santiago, Santa Rita y Zanjón El Chino por medio de las imágenes satelitales.

## Bibliografía

### I. Referencias

- Alas, A. (2023). *La UES establece cooperación científica con asociación de la Barra de Santiago*. Obtenido de <https://diarioelsalvador.com/la-ues-establece-cooperacion-cientifica-con-asociacion-de-la-barra-de-santiago/359783/>
- Alas, L. (2014). *Elsalvador.com*. Obtenido de MARN EL SALVADOR: Liseth Alas. (2014). MARN El Salvador. Complejo Barra de Santiago <https://historico.elsalvador.com/historico/131600/complejo-barra-de-santiago-es-nuevo-sitio-ramsar-de-el-salvador.html>
- Aquae. (2022). *Manglares*. Obtenido de Para que sirven los manglares: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/los-manglares-que-son-tipos-importancia/>
- Bell. (2009). *Habitat Biosfera y Antropia*. Obtenido de Manglares: <https://habitatbiosferasyantropia.home.blog/2019/01/09/manglares/>
- Biodiversidad Mexicana. (2024). *Análisis de series de tiempo para el monitoreo de ecosistemas*.
- Borotkanych, N. (2024). *Resolución Espacial*. Obtenido de <https://eos.com/es/blog/resolucion-espacial/>
- Castillo, J. (2023). *Revista Aquaciencia • julio - diciembre 2023 Año II, VOL.2, NÚM.1 pp.* Obtenido de Jaime Castillo (2023) Revista Aquaciencia • julio - diciembre 2023 Año II, VOL.2, NÚM.1 pp. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/aqc/article/view/2820/2889>
- EOS DATA ANALITYCS. (2023). *NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada*. Obtenido de <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>
- FAO. (2023). *The world's mangroves 2000–2020*. Rome. Obtenido de <https://doi.org/10.4060/cc7044en>
- Geoinnova. (2021). *NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada*. Obtenido de [https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indicevegetacion/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw2ou2BhCCARIsANAwM2Fv\\_NcMx4dEFtAxD4KGAXH6M5rIH3\\_LPGYBTANEqa3fgOeVimaLA6AaAKLZEALw\\_wcB](https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indicevegetacion/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw2ou2BhCCARIsANAwM2Fv_NcMx4dEFtAxD4KGAXH6M5rIH3_LPGYBTANEqa3fgOeVimaLA6AaAKLZEALw_wcB)
- GIS. (2022). *Modelos preentrenados de GIS*. Obtenido de <https://doc.arcgis.com/es/pretrained-models/latest/imagery/introduction-to-cloud-mask-generation-sentinel-2-.htm>

- Gis&Beers. (2020). *Limitaciones del Índice de vegetación NDVI*. Obtenido de <https://www.gisandbeers.com/limitaciones-del-indice-vegetacion-ndvi/>
- Global Mangrove Alliance. (2021). *El estado de los manglares del mundo*. Obtenido de <https://www.mangrovealliance.org/wp-content/uploads/2022/02/The-State-of-the-Worlds-Mangroves-Spanish.pdf>
- Marinero Orantes, M. G.-G. (2021). *Marinero Orantes, M. García-González. (2021). Revista Iberoamericana de Bioeconomía Los desastres naturales en El Salvador, una descripción cronológica de sus impactos, 1900-2020*. Obtenido de Marinero Orantes, M. García-González. (2021). *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático Los desastres naturales en El Salvador, una descripción cronológica de sus impactos, 1900-2020*. Obtenido de <https://unes.org.sv/wp-content/uploads/2023/05/Contamina>
- National Geographic. (2022). *Manglares: qué son y por qué conservarlos*. Obtenido de Redacción National Geographic. (2022). *Manglares: qué son y por qué conservarlos*. <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/07/manglares-que-son-y-por-que-conservarlos>
- ONU. (2023). *Cambio climático y Medioambiental*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2023/07/1522977>
- Ramos, D. (2019). *Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel*. Obtenido de <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>
- Ramsar, C. (2023). *Los manglares son “un increíble ecosistema de humedales*. Obtenido de <https://www.ramsar.org/es/news/los-manglares-son-un-increible-ecosistema-de-humedales-dice-la-dra-mumba>
- The European Space Agency. (2015). *The European Space Agency*. Obtenido de Sentinel L2: [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain/SENTINEL\\_2](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2)
- The Nature Conservancy. (2021). *Estado de los manglares en el mundo*. Obtenido de The Nature Conservancy (2021). *Estado de los manglares en el mundo*. <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/perspectives/state-of-world-mangroves/>
- UNESCO. (2024). *Día internacional de Conservación del Ecosistema de Manglares*. Obtenido de <https://www.unesco.org/es/days/mangrove-ecosystem-conservation>
- Vides, W. (2023). *UNES, Contaminación de reservorios de biodiversidad en la Barra de Santiago*. Obtenido de William Vides. (2023), *UNES, Contaminación de reservorios de biodiversidad en la Barra de Santiago*. Obtenido de <https://unes.org.sv/2023/03/05/contaminacion-de-reservorios-de-biodiversidad-en-la-barra-de-santiago/>

Villa, L. (2017). *a revolución de la teledetección satelital de libre acceso*. Obtenido de SENTINEL 2: <https://luciovilla.blogspot.com/2017/05/sentinel-2-la-revolucion-de-la.html>