



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA
EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD
DURANGO



**Análisis multitemporal de los cambios de uso
de suelo en la Reserva de la Biósfera Marismas
Nacionales mediante teledetección**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
GESTIÓN AMBIENTAL**

PRESENTA

ALFONSO GAYTÁN ALARCÓN

DURANGO, DGO., MAYO DE 2025



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Dirección de Posgrado

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ciudad de México, a 10 de febrero del 2025

El Colegio de Profesores de Posgrado de IPN CIIDIR Unidad Durango en su Sesión (Unidad Académica)

Ordinaria No. 2 celebrada el día 07 del mes febrero de 2025, conoció la solicitud presentada por el (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Gaytán	Apellido Materno:	Alarcón	Nombre (s):	Alfonso
-------------------	--------	-------------------	---------	-------------	---------

Número de boleta: B 2 3 1 2 2 4

del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

Referente al registro de su tema de tesis

1.- Se acordó aprobar el tema de tesis:

Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo en la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales mediante teledetección

Objetivo general del trabajo de tesis:

Realizar un análisis espacial multitemporal de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales usando técnicas de teledetección durante los últimos 38 años para proponer una actualización de la zonificación del área

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: Dra. Sarahí Sandoval Espinoza Director: Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

IPN CIIDIR Unidad Durango

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente, hasta la aprobación de la versión completa de la tesis por parte de la Comisión Revisora correspondiente.

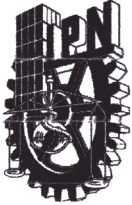
Director(a) de Tesis
Sarahí Sandoval
Dra. Sarahí Sandoval Espinoza

Director de Tesis (en su caso)
Jonathan Escobar Flores
Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores

Alumno
Alfonso Gaytán Alarcón
Alfonso Gaytán Alarcón

Presidente del Colegio
Eduardo Sánchez Ortiz
Dr. Eduardo Sánchez Ortiz





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Dirección de Posgrado

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Durango siendo las 14:00 horas del día 23 del mes de Mayo del 2025 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de CIIDIR IPN Unidad Durango para examinar la tesis titulada:

Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo en la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales mediante teledetección

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Gaytan	Apellido Materno:	Alarcon	Nombre (s):	Alfonso
-------------------	--------	-------------------	---------	-------------	---------

Número de boleta: B 2 3 1 2 2 4

Alumno del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 9 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI** **NO** **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN: *(Por ejemplo, el % de similitud se localiza en metodologías adecuadamente referidas a fuente original)*
El 9% se localiza en antecedentes adecuadamente referidas a fuente original

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:
El alumno cumplió con todos los objetivos y requisitos de tesis

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dra. Sarahi Sandoval Espinoza
Director de Tesis
Nombre completo y firma

Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores

Dr. Eduardo Sánchez Ortiz
Nombre completo y firma

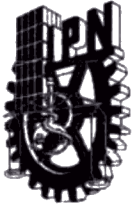
M.C. Cesar Israel Hernández Ramírez

Dra. Yolanda Herrera Arrieta
Nombre completo y firma

Nombre completo y firma
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

2° Director de Tesis
Nombre completo y firma

Nombre completo y firma



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 23 del mes de Junio del año 2025, el (la) que suscribe Alfonso Gaytán Alarcón alumno(a) del programa de Maestría en Ciencias en Gestión Ambiental con número de registro B231224, adscrito(a) a Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango. CIIDIR IPN Unidad Durango manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de la Dra. Sarahi Sandoval Espinoza y del Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores y cede los derechos del trabajo intitulado Análisis multitemporal de los cambios de uso de suelo en la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales mediante teledetección, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo sarahisandovale@gmail.com, JONAS286@hotmail.com y gaytana.alfonso@gmail.com. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

ALFONSO GAYTÁN ALARCÓN

La presente tesis se realizó en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, del Instituto Politécnico Nacional, bajo la dirección de la Dra. Sarahi Sandoval Espinoza y el Dr. Jonathan Gabriel Escobar Flores en colaboración con el Dr. Eduardo Sánchez Ortiz y el M.C. Cesar Israel Hernández Ramírez.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes siempre enfrentaron juntos cada dificultad sin darse por vencidos, sin soltarse jamás el uno al otro. Son el mejor ejemplo de un amor verdadero e incondicional, de compañerismo y fortaleza compartida. A mi madre, que jamás se dio por vencida y enfrentó cada obstáculo con una fortaleza admirable. Gracias por apoyarme siempre de la forma más sincera, por ser mi base emocional y por haber forjado los cimientos que han mantenido unida a nuestra familia. Tu entrega y tu amor son el corazón de todo lo que soy. A mi padre, por su sentido de responsabilidad, por el cariño con el que siempre me ha guiado, por su madurez ante cada desafío, su lealtad inquebrantable y ese carisma que transforma cada momento. Gracias por estar presente no solo como padre, sino también como un amigo. A mi hermana, cuya determinación y entrega me inspiran a trabajar con constancia y pasión. Gracias por estar siempre dispuesta a escucharme, por tu consejo sincero y por brindarme la confianza de saber que siempre puedo contar contigo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la oportunidad que me brindó el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango y su personal para realizar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT, actualmente SECIHTI), por la beca otorgada durante mis estudios.

Gracias a mis directores, por su infinita paciencia, su entrega generosa y la amistad sincera que me ofrecieron a lo largo de este camino. Agradezco profundamente el conocimiento que compartieron conmigo, así como la orientación y el respaldo constante. Sin su guía y compromiso, la realización de esta tesis no habría sido posible. Su apoyo marcó una diferencia fundamental en mi formación. A mis asesores, les agradezco sinceramente por sus valiosas aportaciones y comentarios, siempre orientados a mejorar la calidad de mi trabajo.

A todas las personas que contribuyeron de alguna u otra forma a la realización del presente trabajo.

Índice

Glosario	I
Lista de acrónimos	III
Lista de tablas	IV
Lista de figuras	V
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES	6
2.1. Teledetección	6
2.2. Historia de Marismas Nacionales (ANP y Reserva de la Biosfera).....	9
2.3. Técnicas de teledetección en el estudio de los manglares	12
2.4. Estudios de teledetección en la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales...	15
III. JUSTIFICACIÓN	19
IV. HIPÓTESIS	20
V. OBJETIVOS	20
5.1. Objetivo general	20
5.2. Objetivos particulares	20
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	21
6.1. Área de estudio	21
6.2. Obtención de imágenes de satélite	24
6.3. Variables espectrales	25
6.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	25
6.5. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).....	27
6.6. Temperatura superficial de la tierra (LST).....	29
6.7. Hidrología	30
6.8. Cambio y uso de suelo	32
6.9. Propuesta de zonificación	35
6.10. Estadísticos	38
VII. RESULTADOS	41
7.1. Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	41
7.2. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)	43

7.3. Temperatura Superficial de la Tierra (LST).....	46
7.4. Comparativo de zona (ANP y exterior) por índice espectral	47
7.5. Hidrología	49
7.6. Clasificación supervisada	51
7.7. Validación en campo	54
7.8. Propuesta de zonificación	56
7.9. Análisis estadístico	61
VIII. DISCUSIÓN	63
IX. CONCLUSIONES	73
X. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS	74
XI. BIBLIOGRAFIA CITADA	75
XII. ANEXOS	89

Glosario

Humedales: Zonas de transición entre ambientes acuáticos y terrestres.

Marisma: Humedales formados en la desembocadura de ríos, susceptibles a los efectos de las mareas inundándose en mayor o menor medida.

Pantano: Terrenos con capas de agua estancada poco profunda y abundante vegetación acuática que puede llegar a ser muy densa.

Turbera: Tipo de humedal caracterizado por la acumulación superficial de capas de materia orgánica en estado de descomposición.

Marismas Nacionales: Área Natural Protegida dentro de la costa de Nayarit, con una de las mayores extensiones de manglar de México.

Convención Ramsar: Acuerdo internacional que sirve de marco para la acción nacional y cooperativa internacional en beneficio de la conservación y uso racional y sostenible de los humedales.

Manglar: Ecosistema costero de árboles tolerantes a la salinidad, que brinda diferentes servicios ecosistémicos.

Servicios ecosistémicos: Beneficios que los ecosistemas brindan a la sociedad, como la captura de carbono, protección de la costa, recursos pesqueros, hábitat de diferentes especies, etc.

Teledetección: Ciencia que permite obtener información de la superficie terrestre mediante sensores remotos que no tienen contacto físico directo con el objeto estudiado.

Landsat: Título designado a la serie de misiones satelitales de observación de la Tierra más largo y continuo manejadas por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos (NASA) en conjunto con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

Sentinel-2: Misión satelital de observación de la tierra puesta en órbita en el año 2015, con el objetivo principal del monitoreo ambiental manejada por el programa Copernicus de la Unión Europea.

Imagen satelital: Representación visual de los datos adquiridos por un sensor montado en un satélite artificial.

Modelo digital de elevación (MDE): Representación digital de los valores de elevación del terreno, referenciados horizontalmente bajo la proyección de algún sistema de coordenadas geográficas.

Sensor remoto: Dispositivo capaz de captar información de un objeto a distancia.

Radiación electromagnética: Energía compuesta de campos eléctricos y magnéticos que se propaga entre sí en forma de ondas.

Banda espectral: Representación de un rango específico de longitud de onda en el espectro electromagnético.

Índice espectral: Indicadores basados en cálculos matemáticos a partir de imágenes satelitales, que permiten analizar aspectos del terreno.

Cambio de uso de suelo: Transformación de la cobertura del suelo debido a actividades humanas, como agricultura, ganadería o urbanización.

Zonificación: Delimitación de un territorio en zonas con usos y actividades concretas.

Lista de acrónimos

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index).

NDWI – Índice de Agua de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Water Index).

LST: Temperatura Superficial de la Tierra (Land Surface Temperature).

CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

USGS: United States Geological Survey.

REM: Radiación Electromagnética.

GIS: Sistema de Información Geográfica (Geographic Information System).

MDE: Modelo Digital de Elevación.

SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.

ALOS : Advanced Land Observing Satellite.

TM : Thematic Mapper (sensor de Landsat 4-5).

OLI: Operational Land Imager (sensor de Landsat 8).

Lista de tablas

Tabla 1. Errores de omisión (E) y comisión (Ce) para las clasificaciones supervisadas.	52
Tabla 2. Visita al Área Natural Protegida durante el mes de abril 2024.	54
Tabla 3. Áreas obtenidas para cada polígono propuesto como zona núcleo con base al incremento de manglar.	59
Tabla 4. Áreas obtenidas para cada polígono propuesto como zona núcleo con base a las especies amenazadas o en peligro de extinción.	59
Tabla 5. Prueba de varianza para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).	61
Tabla 6. Prueba de varianza para el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).	61
Tabla 7. Prueba de varianza para índice de temperatura superficial de la tierra (LST).	62

Lista de figuras

Figura 1. Distribución de humedales de importancia internacional (Disponible en https://rsis.ramsar.org/es).	2
Figura 2. Distribución de humedales Ramsar en México (Disponible en https://rsis.ramsar.org/es).	3
Figura 3. El espectro de la radiación electromagnética (no a escala) y su uso en la teledetección por los satélites.	7
Figura 4. Tipos de interacciones entre los objetos en tierra y los sensores satelitales.	7
Figura 5. Ejemplo de sensores activos en donde la fuente de energía es producida por el mismo sensor (imagen de la izquierda) y sensor pasivo en donde la fuente de energía es la energía del sol.	8
Figura 6. Ejemplo de arte de pesca prehispánica “tapos” con la cual se capturaban peces grandes, tiburones e incluso cocodrilos (fotografía personal).	10
Figura 7. Comportamiento espectral de dos especies de mangle en tres regiones del espectro electromagnético (Tomado de: Kuenzer et al., 2011).	14
Figura 8. La región denominada “borde rojo” en las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano son útiles para la detección de diferentes especies de manglar. ..	15
Figura 9. Polígono del área de estudio (color rojo), en color amarillo el polígono del ANP.	21
Figura 10. Área de estudio. Polígono de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales obtenido de la CONABIO, Sección Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020.	23
Figura 11. Escenas del área de estudio: Path: 30 Row: 44, Path: 31 Row: 44 y Path: 31 Row: 45.	24
Figura 12. Ilustración de las curvas de respuesta espectral y sus intersecciones con la banda roja (Landsat 8, banda 4) e infrarroja cercana (Landsat 8, banda 5), así como la dispersión dependiente de la longitud de onda.	26
Figura 13. Diagrama de flujo para estimar NDVI con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual Model Builder.	27

Figura 14. Diagrama de flujo para estimar NDWI con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual Model Builder.	28
Figura 15. Diagrama de flujo para estimar LST con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual Model Builder.	30
Figura 16. Representación de un modelo digital de elevación (adaptado de CIDHMA, 2021).....	31
Figura 17. Diagrama de flujo para estimar la hidrología del área de estudio en el lenguaje de programación visual Model Builder.	32
Figura 18. Secuencia de clasificación supervisada por algoritmo de máxima verosimilitud.	33
Figura 19. Ejemplo grafico del proceso de clasificación de máxima verosimilitud, se observa para cada clase la formación de una distribución gaussiana para dos bandas espectrales sin embargo en esta investigación se usaron 7 bandas.....	33
Figura 20. Los óvalos en color azul indican insumos para la clasificación, los cuadros amarillos son herramientas geoespaciales dentro de ArcGIS. Los óvalos en color verde son los resultados de los geoprosesos y el ovalo en color rojo es el resultado final. El superíndice P indica un parámetro que se puede cambiar es decir polígonos de entrenamiento e imágenes de otro periodo e inicia con una nueva clasificación. .	34
Figura 21. Zonificación de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales y sus políticas de uso (Diario Oficial de la Nación, Programa de Manejo del Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit, 2017).	35
Figura 22. Diagrama de procesos de la técnica de detección de cambio que muestra como resultado un raster con cambios positivos y negativos.....	36
Figura 23. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada desde el año 1986 hasta 2024 del área de estudio.	42
Figura 24. Diagrama de Cajas y Bigotes del Índice Vegetación de Diferencia Normalizada, dentro y fuera del ANP.	43
Figura 25. Histograma de frecuencias del Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).	44
Figura 26. Diagrama de Cajas y Bigotes del índice de agua de diferencia normalizado, dentro y fuera del ANP.	45

Figura 27. Temperatura superficial de la tierra (LST) desde 1986 hasta 202 del área de estudio.	46
Figura 28. Diagrama de Cajas y Bigotes del Índice de Agua de diferencia normalizado, dentro y fuera del ANP.	47
Figura 29. Comparativo entre zona exterior e interior del ANP para cada índice y variable espectral.	48
Figura 30. Orden de los arroyos del área de estudio con el Modelo digital de Elevación STRM y ALOS PALSAR.	49
Figura 31. Longitud de Ríos obtenida para cada DEM trabajado.	50
Figura 32. Porcentaje de precisión de cada una de las matrices de confusión de las clasificaciones.	52
Figura 33. Clasificación supervisada del área de estudio desde los años 1986 hasta el año 2024.	53
Figura 34. Áreas por clase de las diferentes clasificaciones supervisadas. a) exterior de la ANP, b) Interior de la ANP.	54
Figura 35. Áreas de cambio a partir de la clasificación supervisada 1986 vs 2024. ...	56
Figura 36. Polígonos propuestos como actualización ala zonificación actual	58
Figura 37. Propuesta de zonificación del ANP Marismas Nacionales.	60
Figura 38. Ajuste de los datos para cada uno de los índices a una distribución normal empírica.	61
Figura 39. Prueba post-hoc de Tukey entre cada año de estudio para cada uno de los índices.	62
Figura 40. Datos de precipitación en mm obtenidos de estaciones meteorológicas en la región para cada año del periodo de estudio.	65
Figura 41. Comportamiento de la temperatura ambiental reportado por CONAGUA para cada año que compone el periodo de estudio.	67
Figura 42. Mapa comparativo entre los polígonos dentro de la zonificación actual y los propuestos como actualización.	72

RESUMEN

Los humedales se encuentran entre los ecosistemas más importantes de la Tierra. Desempeñan un papel fundamental como reservorios de carbono contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático, sirven como barreras contra huracanes, controlan la erosión y mejoran la calidad del agua al funcionar como filtro biológico, así como para la conservación de la biodiversidad y son fuentes de agua dulce. A pesar de esto, los humedales han disminuido drásticamente a medida que la cobertura terrestre ha cambiado en algunas regiones. En esta investigación se realizó un análisis espacial multitemporal de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, ubicada en el estado de Nayarit, México usando técnicas de teledetección durante los últimos 38 años. Las aportaciones de esta investigación fueron: 1) Se calcularon variables e índices espectrales para conocer la cobertura del suelo dentro y fuera del Área Natural Protegida (ANP) Marismas Nacionales; 2) Se generó una red hidrológica utilizando modelos de RADAR con una resolución de 12 metros; 3) Se realizaron clasificaciones supervisadas utilizando imágenes Landsat con una resolución espacial de 30 metros desde los años 1986 hasta el 2024; 4) Se propuso una actualización de la zonificación del ANP a partir de los resultados obtenidos del análisis de detección de cambios observados en las clasificaciones supervisadas. Se concluye que en los últimos 38 años la cobertura de manglar disminuyó un 22 %. En general hubo una diferencia de ~ 7 °C entre el interior y exterior del ANP.

Palabras clave: Marismas Nacionales, humedal, teledetección, cambio de uso de suelo, Landsat.

ABSTRACT

Wetlands are among the most important ecosystems on Earth; they play a key role as carbon reservoirs, contributing significantly to climate change mitigation. Wetlands can function as hurricane barriers, control erosion, and improve water quality by acting as a biological filter, as well contributing to biodiversity conservation and serving as sources of fresh water. Despite this, wetlands have declined dramatically as land cover has changed in some regions. In this study, a multitemporal spatial analysis of the Marismas Nacionales Biosphere Reserve, located in the state of Nayarit, Mexico, was conducted using remote sensing techniques over the past 38 years. The contributions of this research were: 1) Variables and spectral indices were calculated to map land cover within and outside the Marismas Nacionales Natural Protected Area (NPA). 2) A hydrological network was generated using radar models with a resolution of 12 meters. 3) Supervised classifications were undertaken using Landsat images from 1986 to 2024, with a spatial resolution of 30 meters. 4) An updated zoning of the NPA was proposed based on the results of analyzing the observed changes detected in the supervised classifications. It was found that over the past 38 years, mangrove swamp cover decreased by 22 %. Overall, there was a ~ 7 °C difference between the interior and exterior of the NPA.

Keywords: Marismas Nacionales, wetland, remote sensing, land use changes, Landsat.

I. INTRODUCCIÓN

Los humedales son tierras de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos, donde el manto o nivel freático está generalmente en o cerca de la superficie o bien la tierra está cubierta por aguas poco profundas (Cowardin et al., 1979; Barducci et al., 2009).

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más importantes y valiosos de la Tierra denominados “Riñones de la Tierra” (Zhang et al., 2010). Entre los humedales continentales se incluyen acuíferos, lagos, ríos, arroyos, marismas, turberas, lagunas entre otros. En los humedales costeros se incluyen todo el litoral, manglares, marismas de agua salada, estuarios, albuferas o lagunas litorales, praderas de pastos marinos y arrecifes de coral (Berlanga-Robles & Ruiz-Luna, 2007).

Los humedales de importancia internacional son mejor conocidos como Sitios Ramsar, los cuales son áreas que han sido reconocidas internacionalmente mediante una designación de acuerdo con los criterios establecidos por la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional”, dicho tratado se adoptó en la ciudad iraní de Ramsar en 1972 (Gardner & Finlayson, 2018).

A pesar de cubrir menos del 6 % de la superficie terrestre del planeta, los humedales albergan alrededor del 40 % de todas las especies del mundo. A nivel global han sido identificados más de 2,400 Humedales de Importancia Internacional o sitios Ramsar cubriendo alrededor de 254 millones de hectáreas en 171 países (Fig. 1; Ramsar, 2021). Sin embargo, más de la mitad de los humedales del mundo se han perdido históricamente debido principalmente a actividades humanas como la conversión a la agricultura, ganadería, desarrollo urbano, contaminación y sobreexplotación de recursos (Gardner & Finlayson, 2018).

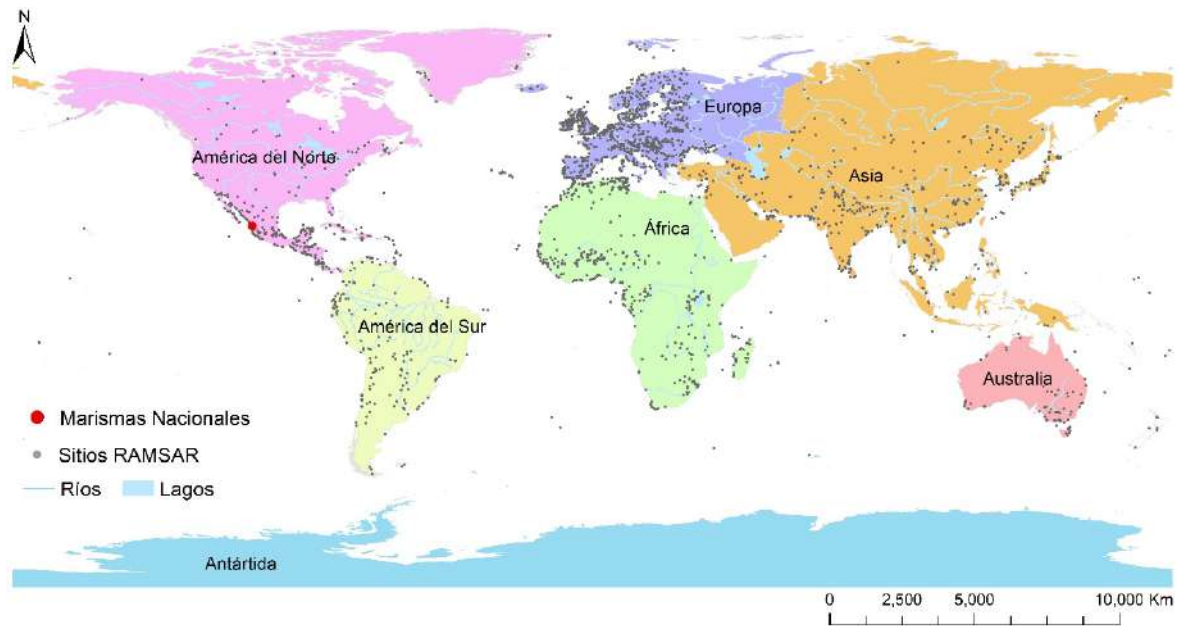


Figura 1. Distribución de humedales de importancia internacional (Disponible en <https://rsis.ramsar.org/es>).

México alberga una gran cantidad de humedales, con más de 6,331 sitios. Estos humedales incluyen manglares, ciénagas, esteros, marismas, lagunas costeras, lagos y otros humedales continentales. Algunos de los humedales mexicanos más destacados son los sistemas lagunares de la costa occidental como Marismas Nacionales en Nayarit, los Pantanos de Centla en Tabasco, Cuatro Ciénagas en Coahuila, Ría Lagartos en Yucatán y Xochimilco y Tláhuac en la Ciudad de México (CONAGUA, 2012). Actualmente en el país se cuenta con 142 sitios designados como Humedales de Importancia Internacional (Fig. 2), cubriendo una extensión total aproximada de 8.2 millones de hectáreas (RAMSAR, 2013).

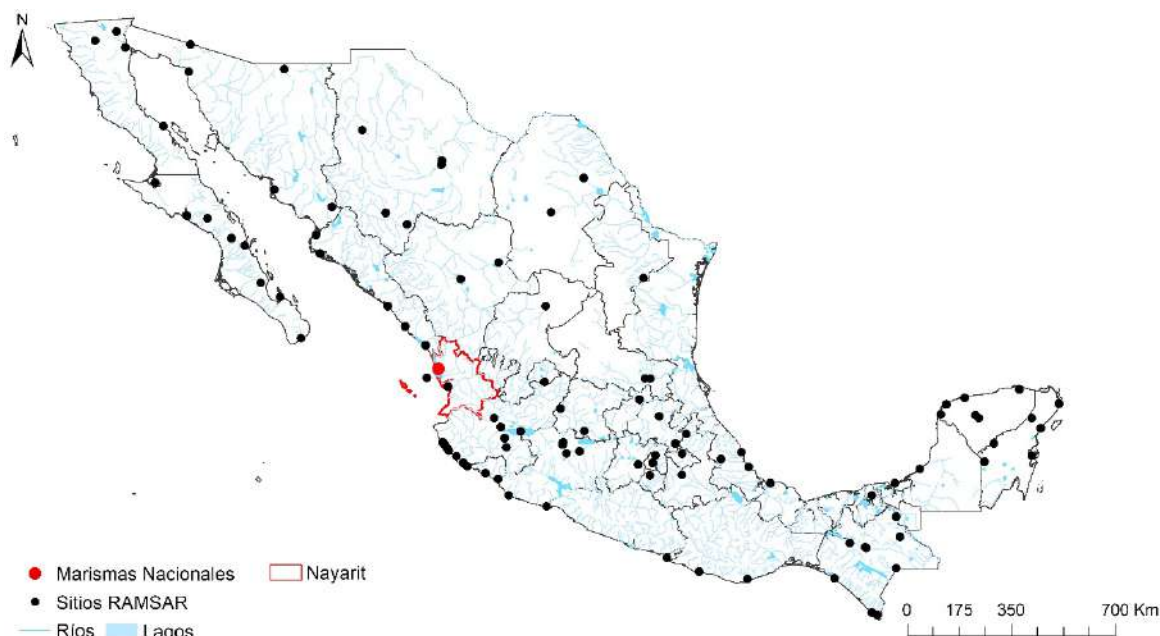


Figura 2. Distribución de humedales Ramsar en México (Disponible en <https://rsis.ramsar.org/es>).

Estos cuerpos de agua cumplen diversas funciones ecológicas y socioeconómicas, tales como proteger las pesquerías ribereñas y de altamar, pueden mejorar la calidad del agua, proteger las costas, recargar las aguas subterráneas, controlar la erosión del suelo y el mantenimiento del ciclo hidrológico global (Ramsar, 2013; Zhang et al., 2010; Fickas et al., 2016; Arifanti et al., 2019; Lagomasino et al., 2020). También son importantes reservorios de carbono (Lovelock, 2008; Sasmito et al., 2020), ya que lo almacenan en biomasa viva y, la mayor parte (hasta el 95 %), en el suelo al funcionar las raíces como filtro biológico (Kauffman & Donato, 2012; Adame et al., 2018; Sippo et al., 2019a).

Por tanto, los humedales participan en la mitigación del cambio climático absorbiendo dióxido de carbono (CO_2) atmosférico mediante el proceso de fotosíntesis (Zhong & Qiguo, 2001; FAO, 2010; Adame et al., 2018; Sasmito et al., 2020) y liberando oxígeno. Sin embargo, cuando ocurre un cambio de uso de suelo, como la deforestación, se emite CO_2 a la atmósfera por la descomposición de materia orgánica, además de que las altas temperaturas en el ambiente contribuyen a la emisión de este gas; esto acelera la respiración de las plantas (Donato et al., 2011; Troxler et al., 2015; Arellano

& Andrade, 2016) y contribuye al cambio climático (Lovelock et al., 2017; Adame et al., 2018; Alongi, 2002; Sippo et al., 2019b; Adams & Rajkaran, 2020; Sasmito et al., 2020).

A pesar de la importancia de los humedales, su extensión a nivel global se ha reducido notablemente, en los últimos 50 años (Alongi, 2002). Davidson (2014) afirma que los humedales de todo el mundo se han degradado aproximadamente un 87 % y la degradación se produjo principalmente en el siglo XX y principios del XXI y la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (1996) estimaron que el mundo había perdido el 50 % de sus humedales desde 1900. Casualmente, Mitsch et al. (2015) también insistió en que el mundo había perdido más de la mitad de los humedales, y que la pérdida se produjo principalmente en el siglo XX. La Secretaría de la Convención de Ramsar informó una reducción del 35 % de los humedales a nivel mundial con datos disponibles entre 1970 y 2015 (Gardner et al., 2018).

En el 2003, el Instituto Nacional de Ecología determinó 32 sitios con humedales prioritarios en México (Berlanga–Robles et al., 2007), uno de los humedales considerado de los más productivos del noroeste y catalogado a nivel nacional e internacional como un área importante para la conservación de las aves y manglares, es la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, este humedal resguarda el 20 % del total de mangle existente en el país (Abarca & Cervantes, 1996), por tal motivo Marismas Nacionales fue declarado sitio Ramsar en junio de 1995. La declaración tiene como objetivo principal la protección de las 200,000 ha de manglar (Ramsar Convention Secretaria, 2010).

En este contexto, el presente estudio busca analizar los cambios multitemporales en los usos de suelo dentro de la Reserva Marismas Nacionales durante el periodo 1986-2023. El mapeo y cuantificación de dichos cambios permitirá evaluar el impacto relativo de las distintas actividades humanas sobre las coberturas naturales y los ecosistemas originalmente presentes en esta región. Los resultados posiblemente sentarán las bases para la generación de recomendaciones orientadas a mitigar las presiones

antropogénicas y garantizar la conservación efectiva de los servicios ambientales que este importante humedal costero provee al país y Norteamérica.

II. ANTECEDENTES

2.1. Teledetección

La teledetección es la ciencia y arte de obtener información de un objeto, área o fenómeno por medio del análisis de datos adquiridos por un instrumento que no tiene contacto físico con el objeto investigando (Chuvieco, 2019). La información se adquiere detectando y midiendo los cambios que el objeto impone al campo circundante, ya sea un campo electromagnético, acústico o potencial. Esto podría incluir un campo electromagnético emitido o reflejado por el objeto, ondas acústicas reflejadas o perturbadas por el objeto, o perturbaciones del campo gravitatorio o potencial magnético circundante debido a la presencia del objeto (Elachi & van Zyl, 2021).

La información que se obtienen de los objetos es captada por sensores, y un ejemplo de la vida cotidiana de un sensor son nuestros ojos que son capaces de captar energía electromagnética en la región del visible (400-700 nm) y realizar interpretaciones de lo que se está observando como fue el caso del mapa más antiguo grabado en una roca de más de 13,660 años de antigüedad en la cueva de Abauntz, España (Utrilla et al., 2009), el cual representa paisajes, montañas y ríos.

La radiación electromagnética (REM) se define como toda la energía que se mueve con la velocidad de la luz en un patrón espaciado de forma igual y repetitiva en el tiempo. La luz visible es sólo una región de la REM; otros tipos incluyen ondas de radio, infrarrojos térmicos y de onda corta y rayos gamma. Todas estas regiones del REM conforman el espectro electromagnético (Fig. 3). Las variaciones de las formas de las ondas se les conoce como frecuencia, mientras que la longitud de onda es la distancia entre una posición de ciclo de onda y la misma posición en la siguiente onda en donde la unidad de medida se denota 1 ciclo por s = 1 Hertz.

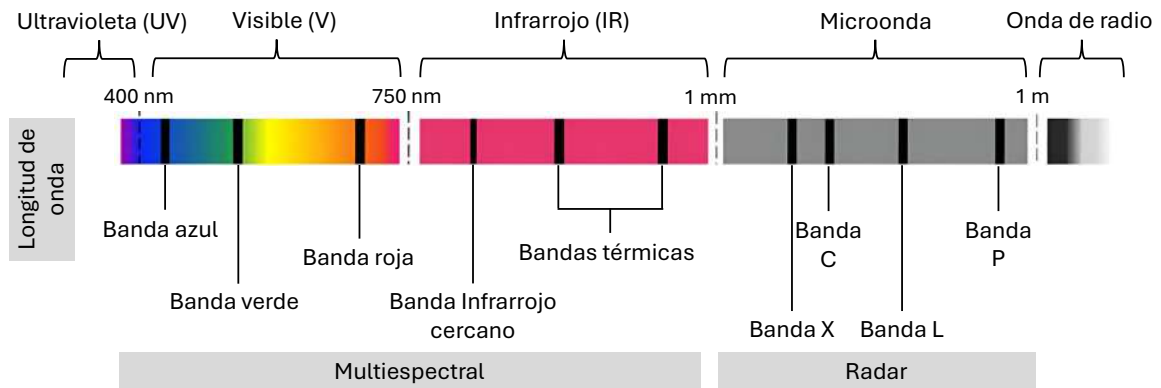


Figura 3. El espectro de la radiación electromagnética (no a escala) y su uso en la teledetección por los satélites.

Cuando la REM entra en contacto con los objetos en la tierra pueden suceder las siguientes interacciones: absorción, reflexión, dispersión o emisión. La teledetección se fundamenta precisamente en la detección y el registro de REM reflejados y emitidos. Esta detección es posible porque cada objeto o material tiene propiedades específicas de emisión y/o reflectancia, conocidas colectivamente como firma espectral, que lo distingue de otros objetos y materiales (Fig. 4).

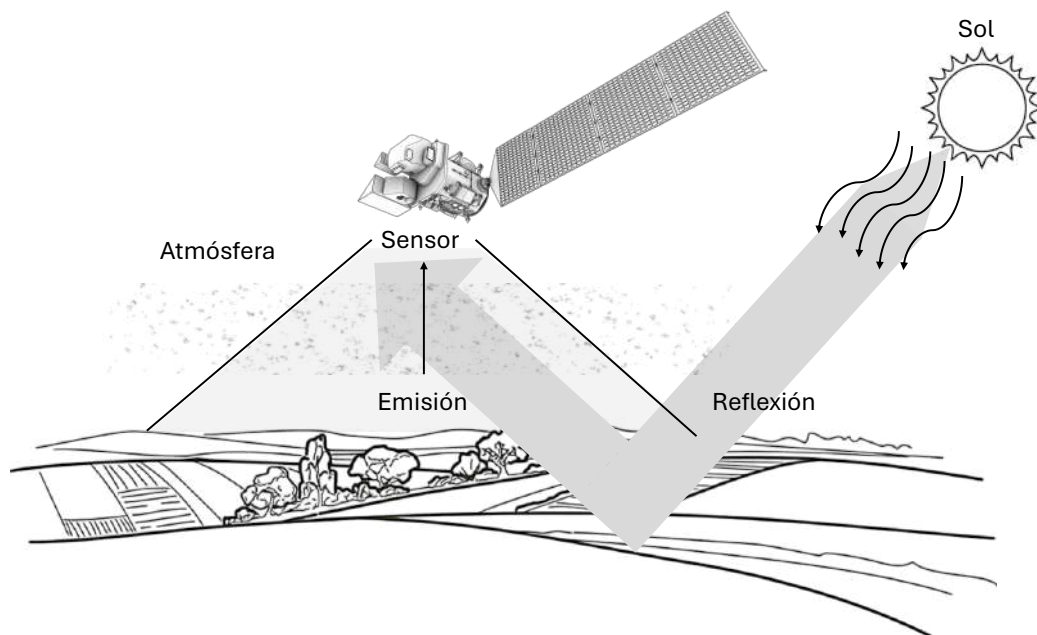


Figura 4. Tipos de interacciones entre los objetos en tierra y los sensores satelitales.

Un sensor remoto registra estos datos en formato analógico y digital (una matriz o imagen bidimensional compuesta de píxeles que almacenan REM) (Jensen, 2005). Además, los sensores pueden ser de naturaleza pasiva o activa. Los sensores pasivos son los más comunes por ejemplo los satélites de la serie Landsat y Copernicus, estos satélites registran REM naturales que se reflejan o emiten desde áreas y objetos de interés. Por el contrario, los sensores activos, como los sistemas de microondas (sistemas de detección y medición por radiofrecuencia, o radar), envían REM artificiales hacia las características de interés y luego registran qué parte de ese REM se refleja de regreso al sistema (Fig. 5) (Jensen, 2005).

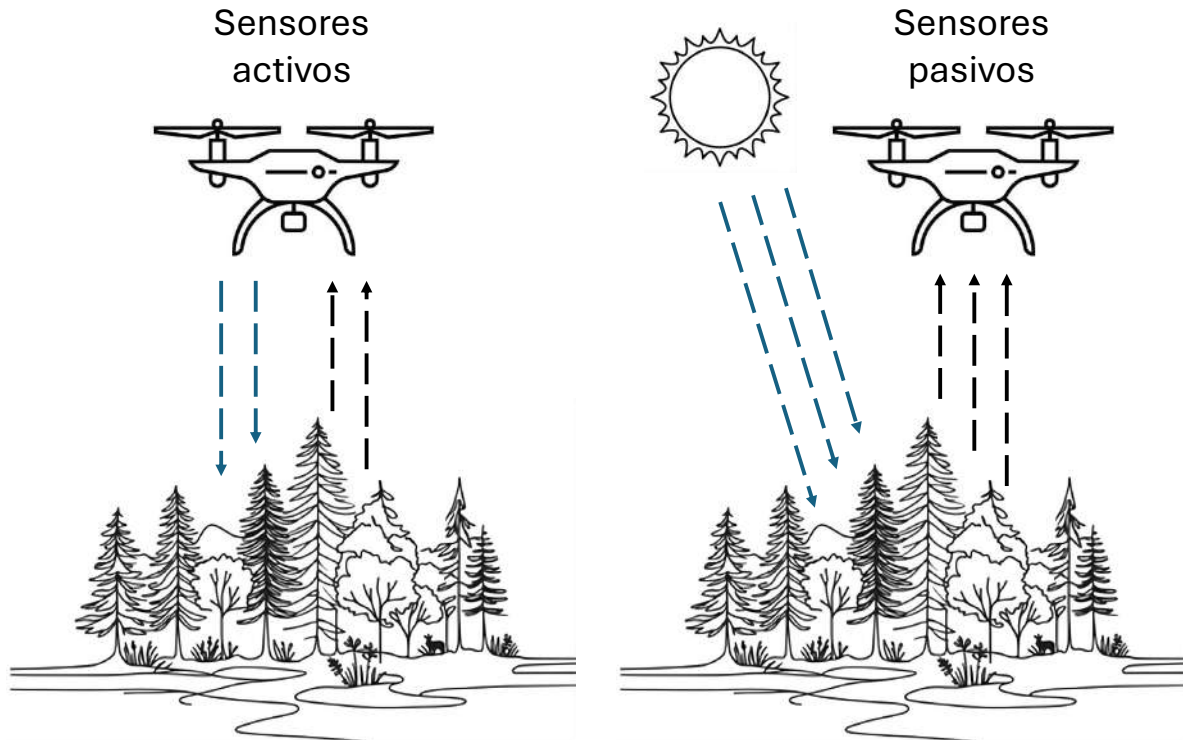


Figura 5. Ejemplo de sensores activos en donde la fuente de energía es producida por el mismo sensor (imagen de la izquierda) y sensor pasivo en donde la fuente de energía es la energía del sol.

2.2. Historia de Marismas Nacionales (ANP y Reserva de la Biosfera)

La importancia de los humedales es reconocida formalmente por la UNESCO el 2 de febrero de 1971 en una conferencia intergubernamental realizada en la localidad Ramsar en Irán, en donde 18 países firman la convención sobre los Humedales, y se comprometen a la conservación y uso racional de los humedales en su territorio (Astrálaga, 2006).

México es uno de 18 países que firmaron el convenio RAMSAR a partir del 4 de noviembre de 1986 al incluir a la Reserva de la Biosfera Río Lagartos como Humedal de Importancia Internacional. A la fecha en México se han incluido 144 humedales en la lista de Humedales de Importancia Internacional, cuya designación y manejo se hace por el gobierno federal, con la participación de las comunidades locales y la academia, manteniendo así el segundo lugar a nivel mundial (Carabias et al., 2010).

Uno de los sitios RAMSAR más importantes de México es Marismas Nacionales, el cual fue declarado el 22 de junio de 1995, y su importancia radica en la protección de 200,000 hectáreas en una cuenca hidrográfica que abarca dos estados: Nayarit y Sinaloa que contiene el 20 % de todo el mangle que existe en el país (Abarca & Cervantes, 1996; CONANP, 2013). Este sitio Ramsar es considerado uno de los más productivos en el sector pesquero del país y su riqueza cultural es inigualable debido a la presencia de la isla de Mexcaltitán, donde los relatos históricos describen que los aztecas emigraron hacia Tenochtitlán (CONANP, 2013).

Antes de ser declarado RAMSAR Marismas Nacionales históricamente es considerado uno de los ecosistemas lagunares-estuarinos con mayor diversidad del País. Por ejemplo, Rubio-Cisneros & Aburto-Oropeza (2013) mencionan que los pobladores entre 3700-1750 A.C emplearon conchas conocidas como cascos de burro (*Anadara grandis*) para edificar estructuras como El Calón con 25 m de altura que posiblemente eran utilizadas como centros ceremoniales.

Por otro lado, los registros arqueológicos demuestran que Marismas Nacionales prácticamente estuvo despoblada alrededor de 1300 d.C., y estuvo relacionado con la

desaparición de bivalvos, el principal recurso que se aprovechaba en aquel entonces. Para el año de 1523 cuando llegan los españoles la zona costera de Marismas Nacionales fue repoblada poco a poco y los recursos marinos eran abundantes (Shenkel, 1974). Así mismo, las artes de pesca también se diversificaron por los pueblos indígenas destacando la técnica de los “tapos” que consiste en estructuras elaboradas con ramas de mangle que forma una valla que sirve para cernir el agua que entraba a los esteros (De la Mota-Escobar, 1940) (Fig. 6) Esta arte de pesca con una antigüedad de 500 años se continua practicando en la actualidad pero no tiene ninguna normatividad y dentro de Marismas Nacionales se han documentado más de 200 “tapos” sin describirse con precisión su tamaño y posición geográfica (Rubio-Cisneros & Aburto-Oropeza, 2013).



Figura 6. Ejemplo de arte de pesca prehispánica “tapos” con la cual se capturaban peces grandes, tiburones e incluso cocodrilos (fotografía personal).

Los humedales de Marismas Nacionales constantemente han sido perturbados como ya se mencionó anteriormente, pero en los últimos 20 años sobresalen los siguientes impactos naturales y antropogénicos: 1) La apertura del canal de Cuautla en los años 70 ´s que tuvo por objetivo comunicar a la laguna Agua Brava con el océano Pacífico

y así incrementar la productividad pesquera, pero la falta de planeación de la obra ha provocado la erosión continua del canal que en la actualidad el ancho de la boca rebasa los 1.5 kilómetros, 2) El paso del Huracán Rosa en 1994, 3) cambios de uso de suelo deforestando manglar por agricultura, 4) la construcción de drenes y carreteras.

Toda esta problemática ambiental que fue resumida por el comité Nacional de Humedales Prioritarios (el cual tiene como objetivo principal asesorar a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y mejorar la comunicación entre los organismos gubernamentales y no gubernamentales para una gestión efectiva), fue la base para la declaración del Área Natural Protegida (ANP) Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales el 12 de mayo de 2010. Sin embargo, los reglamentos y normatividades para esta ANP son publicados en su programa de manejo hasta el año 2013, y es en este documento donde se establecen las actividades, acciones y lineamientos básicos para el manejo y la administración del Área Natural Protegida.

En resumen, existen dos instrumentos jurídicos ambientales que tienen por objetivo la protección y preservación de los recursos naturales en Marismas Nacionales, el primero es de pertinencia internacional y es la declaración de sitio Ramsar el 22 de junio de 1995, cumpliendo con al menos 5 criterios de elegibilidad enfocados en mantener la diversidad genética y ecológica de las 36 especies endémicas de aves acuáticas, entre las que se encuentran la cotorra guayabero (*Amazona finchii*), el perico atolero (*Aratinga canicularis*), y la catarinita (*Forpus cyanopygius*). Asimismo, el sitio sustenta de manera regular una población de 20,000 aves acuáticas, y es refugio invernal para más de 100,000 aves acuáticas migratorias. El segundo es la declaración de ANP modalidad Reserva de la Biosfera que tiene por objetivo principal la preservación de uno de los humedales de mayor relevancia del pacífico mexicano, así como orientar la protección del patrimonio natural reduciendo los impactos sobre el entorno de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales procurando mejores condiciones de vida para la población (CONANP, 2013).

2.3. Técnicas de teledetección en el estudio de los manglares

En las últimas décadas para evaluar grandes extensiones de terreno en zonas remotas e inaccesibles se han utilizado herramientas de teledetección (Veneros et al., 2020; Silva-López et al., 2023; Perea-Ardila & Murillo-Sandoval, 2024). El primer trabajo sobre teledetección y Humedales lo realizó Klemas (1973b), su investigación la realizó en las Marismas de Delaware, USA y determinó la biomasa verde y la altura del dosel en comunidades de plantas de borraza (*Spartina alterniflora*) y grama salada (*Distichlis spicata*), a partir de su trabajo se comenzó a investigar sobre la distribución y la abundancia de los manglares usando imágenes de satélite.

En este sentido las técnicas de teledetección son las más útiles para definir las estrategias de conservación, porque a partir del análisis de imágenes de satélite es posible la zonificación de los manglares, determinar su distribución mundial, diferenciar especies de mangle y analizar los cambios multi temporales (Kuenzer et al., 2011).

El estudio espacio-temporal de los manglares se puede realizar con diferentes tipos de sensores remotos, desde fotografías aerotransportadas, imágenes de satélite multiespectrales, hiperespectrales y de RADAR, y más recientemente imágenes capturadas por vehículos aéreos no tripulados. La información científica que se ha derivado a partir del uso de los sensores remotos la podemos resumir en los siguientes tópicos: detección de la extensión del manglar y estado de salud, monitoreo de los cambios del uso de suelo, estimación de biomasa, evaluación de la condición fisicoquímica del agua, planificación para la definición de estrategias de manejo, etc (Aschbacher et al., 1995; Manson et al., 2005 Giri et al., 2008).

Sin embargo, la detección de los manglares con sensores remotos no es tan simple, primero porque los manglares crecen en una transición entre ambiente terrestre y de agua (mar), y por lo tanto la composición de píxeles en cualquier sensor remoto estará mezclada por tres señales espectrales provenientes de la vegetación, suelo y agua, lo cual dificulta la clasificación de estos (Blasco et al., 1998). Una solución a lo anterior

fue propuesta por Ramsey y Jensen (1996), ellos utilizaron imágenes multiespectrales del satélite SPOT para determinar si las características texturales y espectrales del dosel de los manglares en Florida se correlacionaban con el Índice de Área Foliar (IAF) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Estos autores reportan una correlación entre el IAF y la altura del dosel de los manglares, sin embargo, mencionan que las región espectral del visible (400-700 nm), infrarrojo cercano (780-890 nm) y NDVI no son útiles para determinar la composición de especies.

Para la detección de diferentes especies de manglar se han reportado dos soluciones, la primera fue propuesta por Wang et al. (2008), ellos sugieren el análisis multitemporal con imágenes multiespectrales IKONOS. En su investigación en la costa de Panamá encontraron que en las imágenes del satélite del mes mayo (inicios de la estación de lluvias) las hojas de las especies de mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), y mangle rojo (*Rhizophora mangle*) los doseles están en crecimiento y tienen diferente composición química lo que permitió su distinción por medio de algoritmos no supervisados (ISODATA) y supervisados (Red Neuronal de Retropropagación).

El inicio de la temporada de lluvias se ha reportado como el más útil para la distinción espectral de especies, otro ejemplo fue reportado por Kuenzer et al. (2011) en su investigación de dos especies de manglar en Vietnam. Ellos utilizaron datos de un espectro radiómetro y encontraron que la señal espectral de las especies *Avicennia marina* y *Rhizophora conjugata* son muy diferentes debido a sus propiedades biofísicas y químicas e.g. el contenido de agua, celulosa, lignina y proteínas, así como pigmentos de clorofila a y b, y carotenoides. La señal de respuesta espectral también depende de la estructura interna de la hoja, compuesta principalmente por parénquima en empalizada y mesófilo esponjoso (Fig. 7).

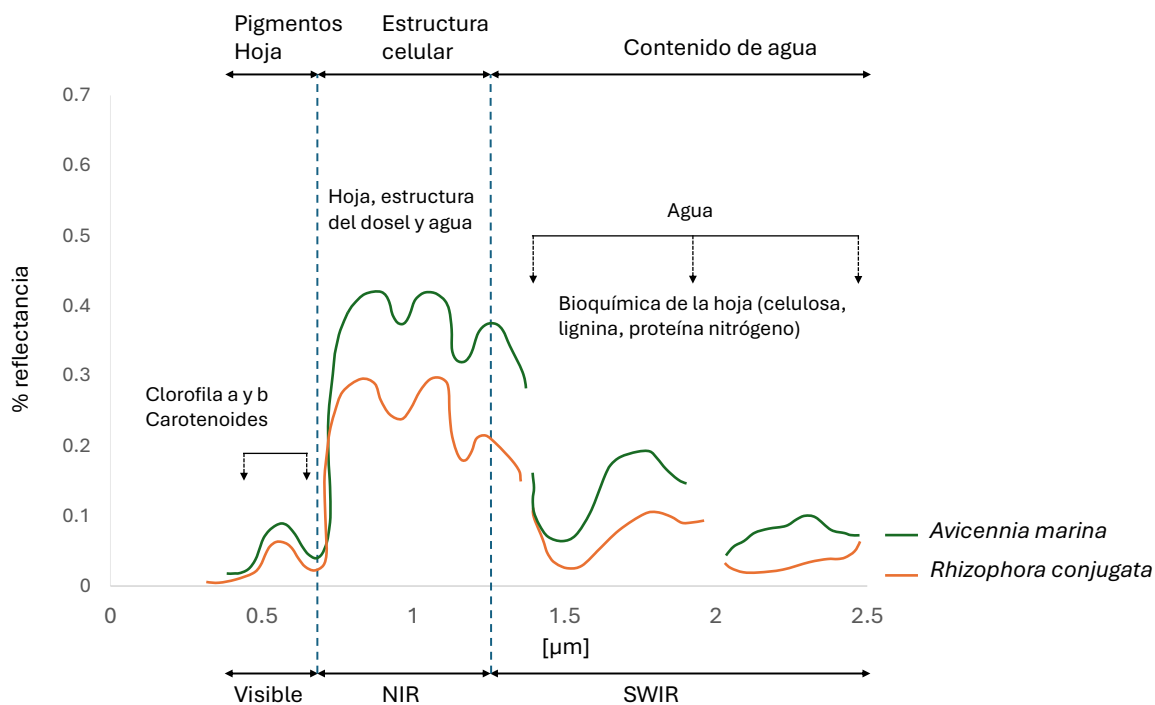


Figura 7. Comportamiento espectral de dos especies de mangle en tres regiones del espectro electromagnético (Tomado de: Kuenzer et al., 2011).

La segunda solución para la detección de especies de manglar la describen Green et al. (1998), ellos utilizaron diferentes sensores remotos para el mapeo de manglares: Imágenes Landsat TM, SPOT y CASI (imágenes multiespectrales aerotransportadas de un metro de resolución espacial) en las islas Turcas y Caicos. Con estas imágenes probaron varias metodologías: clasificaciones visuales, no supervisadas, supervisadas, análisis de componentes principales y proporciones de bandas. Reportan que en análisis de proporciones de bandas entre las regiones espectrales del rojo e infrarrojo de onda media (Bandas 3/5) y el infrarrojo cercano con la última (4/5) en imágenes provenientes del sensor TM resaltan un borde espectral denominado “red edge” el cual es un indicador del incremento de la reflectancia de la clorofila que ocurre entre los 680 nm y 730 nm, y mediante series multitemporales también es útil para diferenciar especies de manglar. El red edge es una señal espectral que en la actualidad se utiliza para buscar vida en otros planetas (Seager et al., 2005) (Fig. 8).

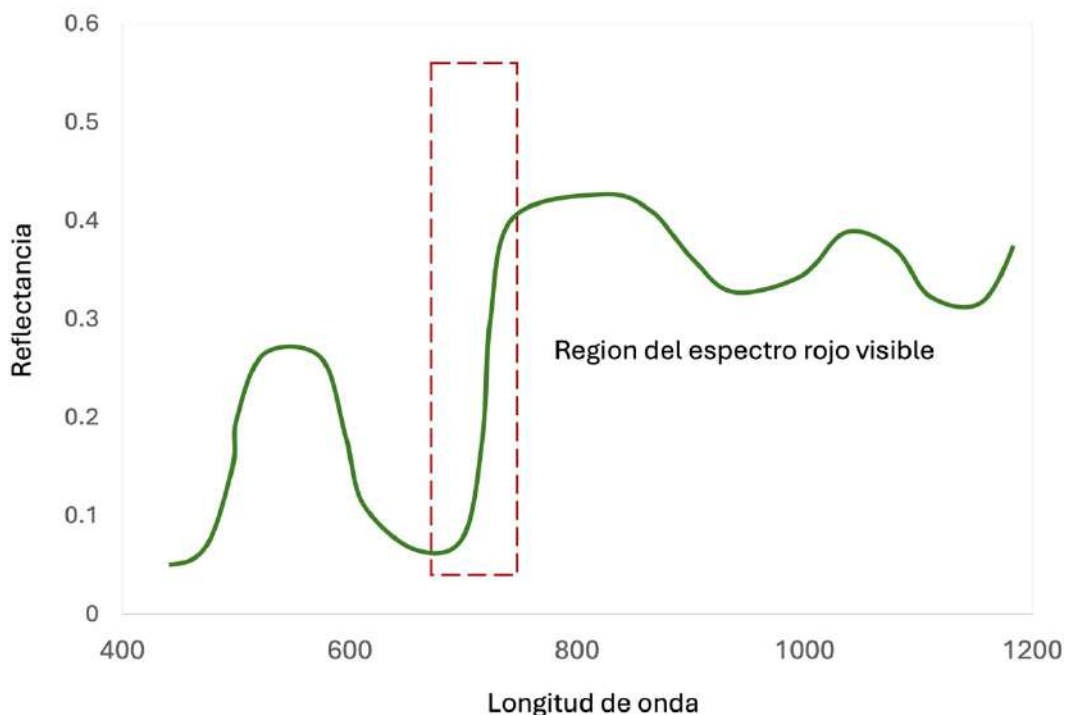


Figura 8. La región denominada "borde rojo" en las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano son útiles para la detección de diferentes especies de manglar.

2.4. Estudios de teledetección en la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales

Entre los artículos que se han publicado al respecto, se tiene el de Ramírez-García et al., 1998, ellos trabajaron en la desembocadura del río Santiago durante los años 1970-1993, describieron la composición vegetal y la estructura del manglar, evaluar el nivel de deforestación y su extensión, mostraron que el área de estudio estaba compuesta por cuatro especies, *Avicennia germinans*, *Conocarpus erecta*, *Laguncularia racemosa* y *Rhizophora mangle*. En sus resultados mostraron 2,417 hectáreas de mangle para el año 1973 realizado por la Comisión de estudios del territorio nacional (CETENAL), 2,417 hectáreas para el año 1973, y 1065 ha en el año 1970, y para el año 1993, 724 ha. Por lo que el área de estimada mediante fotointerpretación y la estimada por CETENAL fue una sobre estimación del 56 %, y

una disminución del 32 % a la interpretación actual del año 1993 por un periodo de 23 años.

Berlanga-Robles y Ruiz-Luna (2007), trabajaron en el Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava, que se ubica al sur de Sinaloa y Nayarit, durante los años 1973 al 2000, ellos analizaron las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar por dos vías: un análisis multitemporal posclasificadorio y la substracción de imágenes de índice de vegetación de diferencia normalizada. Ellos realizaron clasificaciones supervisadas usando imágenes Landsat 5-TM. Encontraron 89,183 ha de manglar para el año 1973; 87,155 ha para 1986; 79,972 ha para 1995 y 75,042 ha para el año 2000.

Valderrama-Landeros et al. (2020), mapearon la variabilidad costera antes de la construcción del Canal de Cuautla que se realizó en el año 1976 y cuantificaron tendencias de erosión y acreción utilizando una combinación de fotografías aéreas y datos satelitales. El canal se ubica en la parte central de la costa del ANP Marismas Nacionales. Los resultados indicaron que se han perdido 805 ha de depósitos de playa en el Canal de Cuautla y en la región de la cresta de la playa que de otro modo debería ser una zona costera de acreción o crecimiento. Por el contrario, la sección sur del sitio de estudio muestra 406 ha de acreción constante o que la playa creció constante durante el mismo período debido a la presencia libre del río San Pedro.

Nepita-Villanueva et al. (2019), trabajó en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, ellos calcularon el índice de vegetación mejorada (EVI), durante los años 2001 a 2016, usando imágenes MODIS, los promedios del índice oscilaron entre 0.18 y 0.33. Se encontró que el máximo vigor de la vegetación de los manglares ocurre en otoño, la mayor parte del dosel de los manglares se mantuvo estable (78 %), mientras que el 7 % restante se encontró en fase de recuperación. Los doseles de los manglares más vulnerables se detectaron en áreas definidas en estudios anteriores como dominadas por *Avicenia germinans*, mientras que los bosques resistentes y resilientes estaban ubicados en áreas dominadas por *Laguncularia racemosa*.

Lithgow et al. (2019) trabajaron en la ANP Marismas Nacionales y evaluaron el efecto de la acuicultura como impulsor de la degradación de los humedales y la calidad del agua, evaluaron los cambios en la extensión de los manglares, utilizaron imágenes aéreas de los años 1943, 1997 e imágenes satelitales de los años 1997, 2005, 2009 y 2013, se encontró que la cobertura acuícola aumentó a un ritmo constante entre 1997 y 2005, la mayoría de los estanques acuícolas se construyeron en humedales herbáceos (36 %), cultivos y pastizales (25 %), así como en áreas que anteriormente eran vegetación forestal (20 %). Entre 1997 y 2013, se descubrió que los humedales herbáceos y las tierras de cultivo se han perdido, mientras que los pastizales, las áreas urbanas, la acuicultura y los manglares han aumentado. Los análisis de sedimentos mostraron que la cantidad de los sedimentos gruesos como arena y grava disminuyeron significativamente aguas arriba y no llegan a la desembocadura del río. A pesar de este incremento, se localizaron parches de manglar perturbados cerca de los estanques acuícolas, principalmente en la zona sur, esto debido a que los estanques de camarón afectan negativamente la calidad de agua, así como los sedimentos.

Ezcurra et al. (2019) trabajaron en tres de los principales ríos (Rio Santiago, Acaponeta y San Pedro) que alimentan, analizando el impacto que tienen las presas hidroeléctricas sobre los estuarios de estos ríos, para esto hicieron uso de imágenes Landsat durante un periodo de 35 años (1975 a 2010), así como imágenes de Google Earth Pro para análisis de cambios a corto plazo (<10 años). Adicionalmente, realizaron muestreos de vegetación en campo, y se utilizaron conteos de botes pesqueros, así como estadísticas oficiales de pesquerías para evaluar la productividad de los estuarios. Con el objetivo de determinar como la reducción de sedimentos por el entrapamiento en presas afecta la estabilidad y productividad de los estuarios. Los resultados mostraron que los ríos con presas experimentan una rápida recesión costera (entre 7.9 y 21.5 ha/año), mientras que las costas de ríos libres se mantuvieron estables o crecieron. Las barreras de arena de ríos con presas presentaron erosión intensa, bosques de manglar expuestos a la acción erosiva del oleaje, y una baja diversidad de plantas. En contraste, los ríos libres mostraron costas con sucesión

vegetal, desde dunas pioneras hasta bosques maduros. Para el caso de las pesqueras, el número de botes y desembarques fueron drásticamente menor en estuarios de ríos con presas. Lo que indico que las presas hidroeléctricas tienen efectos destructivos sobre la estabilidad y productividad de los estuarios tropicales.

III. JUSTIFICACIÓN

Los humedales son valiosos sitios naturales que desempeñan un papel en la preservación de la diversidad biológica y paisajística: son sitios de anidación, invernación y migración de aves, zonas de desove de peces y reservorios de carbono contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático y actúan como control de inundaciones, barreras contra huracanes, controlan la erosión y mejoran la calidad del agua al funcionar como filtro biológico y fuentes de agua dulce (Manson et al., 2005; Xu et al., 2019).

El Instituto Nacional de Ecología determinó 32 sitios con humedales prioritarios en México, Marismas Nacionales además de estar protegido por la Convención de Ramsar sobre los Humedales es considerado uno de los humedales más productivos del noroeste y catalogado a nivel nacional e internacional como un área importante para la conservación de las aves y manglares, este humedal resguarda las cuatro especies de mangle presentes en el país y representa el 20% del total de mangle existente en México (Abarca & Cervantes, 1996), de igual manera alberga 402 especies de vertebrados y cinco de invertebrados, de las cuales, por lo menos 57 se encuentran bajo alguna categoría de riesgo bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010).

A pesar de la importancia nacional e internacional de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales la vegetación natural de este sitio se están convirtiendo en sistemas ganaderos o agrícolas (UNAM, 2012) y en conjunto con impactos de infraestructura e.g. la apertura del Canal Cuautla, la construcción de la represa Agua Milpa a lo largo de la región costera han producido procesos de erosión que superan las 800 ha, reducción de las zonas estuarinas que son vitales para la reproducción de la ictiofauna y un aumento de los sedimentos transportados al mar.

IV. HIPÓTESIS

A lo largo de los años se han producido impactos antropogénicos en el área de estudio, por lo que se espera que estos cambios sean menos severos dentro del polígono del área natural protegida en comparación con su periferia.

El uso de herramientas de teledetección y análisis multitemporal de imágenes de satélite permitirá cuantificar la magnitud de estos cambios de uso del suelo e identificar los sitios mejor conservados.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Realizar un análisis espacial multitemporal de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales usando técnicas de teledetección durante los últimos 38 años para proponer una actualización de la zonificación del área.

5.2. Objetivos particulares

- Determinar variables espectrales mediante imágenes de satélite para conocer la cobertura del suelo.
- Obtener una red hidrográfica a partir de datos de teledetección de alta resolución para determinar cauces y escurrimientos naturales.
- Determinar los cambios de uso de suelo durante los últimos 38 años para identificar áreas de manejo.
- Proponer una actualización de la zonificación del área.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Área de estudio

El área de estudio contempla la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales con límites hasta la carretera federal Tepic número 15, 15D y 72, con un área de 3500 km² (Fig. 9 y 10).

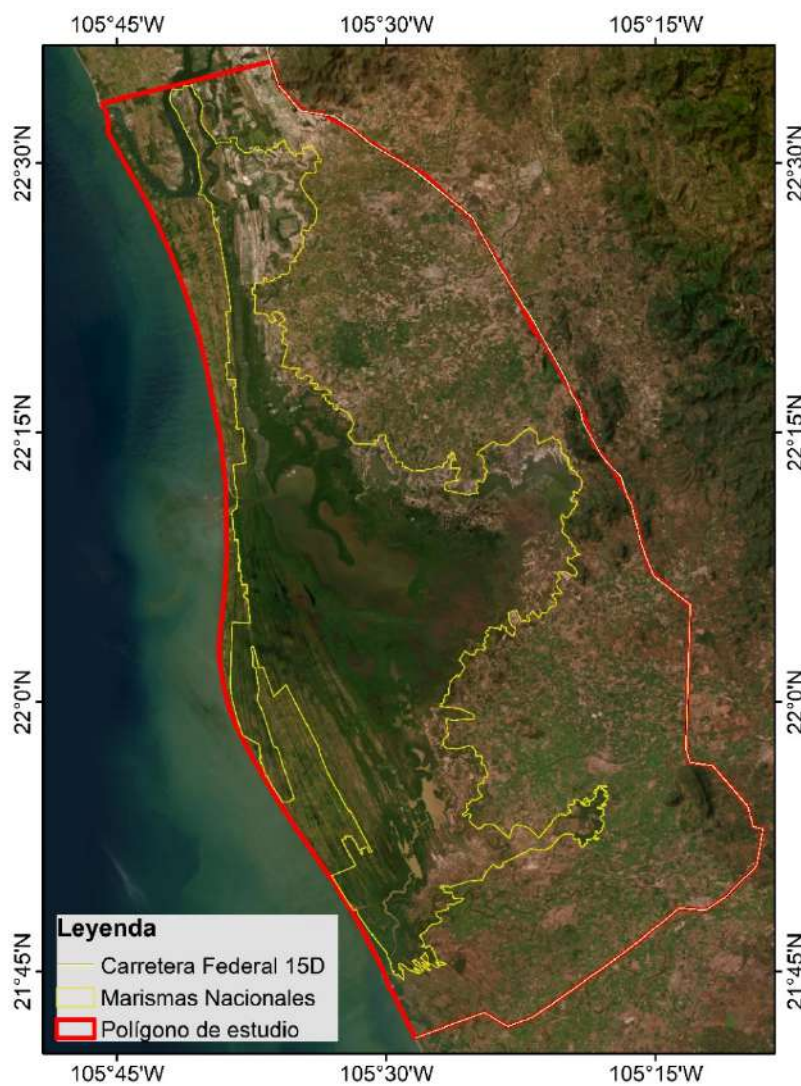


Figura 9. Polígono del área de estudio (color rojo), en color amarillo el polígono del ANP.

Dentro del área de estudio se encuentra el polígono del Área Natural Protegida (ANP) Marismas Nacionales, comprende una extensión de 1787 km² y se ubica en la franja costera de los Estados de Sinaloa y Nayarit, con una superficie de 220,000 ha (24 °10' N, 107 °20' O; 23 °54' N, 106 °57' O) (Valdez-Hernández et al., 2009; Fig. 10).

El clima es subhúmedo, con un intervalo anual de temperatura entre 26 y 28 °C (media máxima de 30 a 34 °C), una precipitación entre los 800 y 1,200 mm anual⁻¹ y evaporación de 1,800 a 2,000 mm anual⁻¹ (CONANP, 2013). El ANP es un sitio RAMSAR (Núm. 732) desde 1995 y área de importancia para la conservación de las aves (Cervantes-Abrego, 2000), que incluye una red de lagunas costeras salobres, llanuras de inundación, esteros, estuarios, antiguas barreras arenosas, lagunas semiparalelas, deltas, pantanos, marismas y manglares (Rodríguez-Zuñiga, 2013; Valderrama-Landeros et al., 2017).

De las especies de fauna más representativas sobresalen los felinos, estando presentes el jaguar (*Panthera onca*), Ocelote (*Leopardus pardalis*), Lince (*Linx rufus*), Onza (*Herpailurus yaguarondi*), Tigrillo (*Leopardus wiedii*) y Puma (*Puma concolor*). La vegetación consiste en parches dominados por *Avicennia germinans* (mangle negro) en el norte, *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Rhizophora mangle* (mangle rojo) en el sur, y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) en todo el sistema (De la Lanza et al., 1996; De la Lanza & Hernández, 2017).

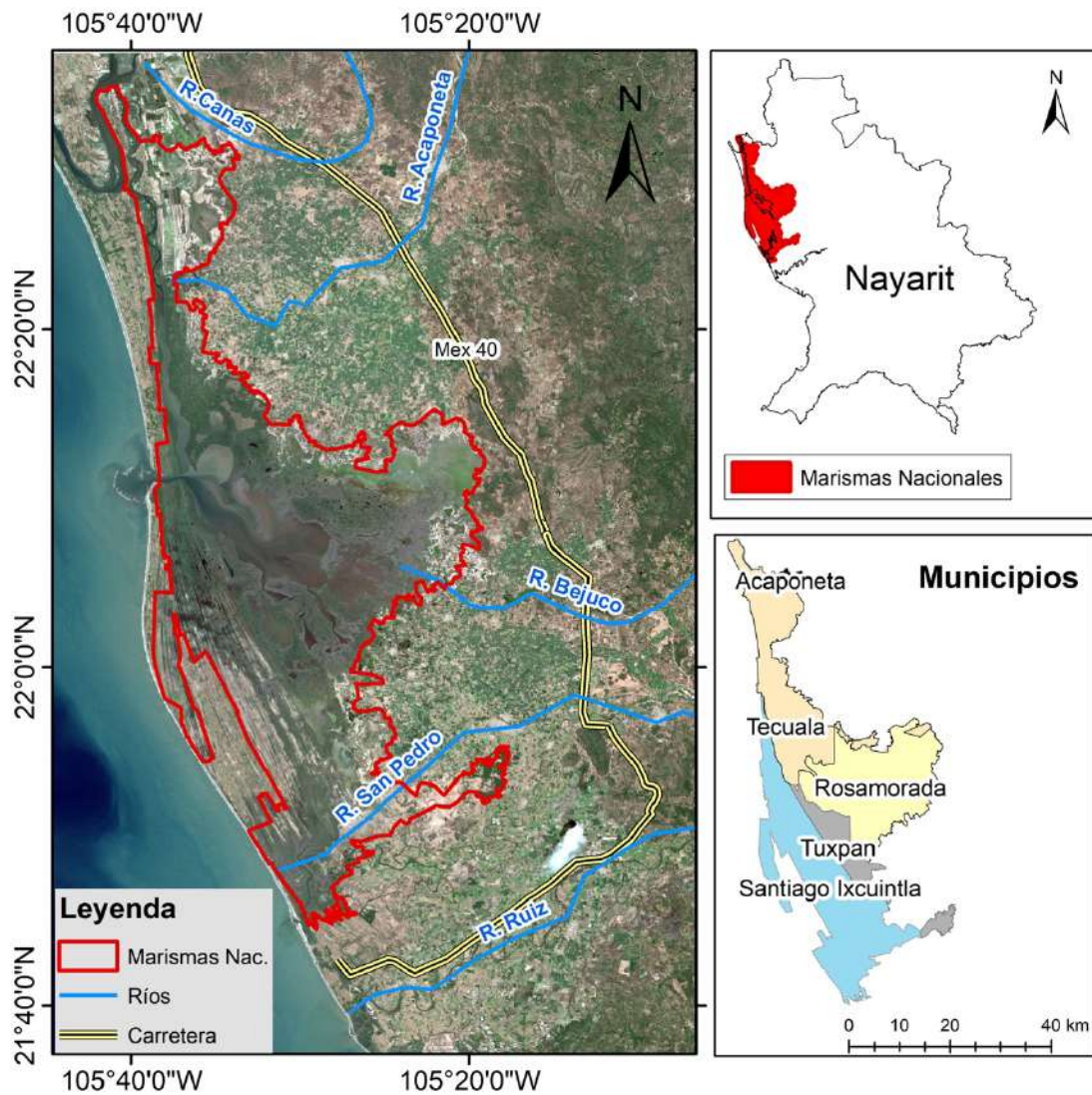


Figura 10. Área de estudio. Polígono de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales obtenido de la CONABIO, Sección Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020.

6.2. Obtención de imágenes de satélite

Las imágenes se descargaron de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se descargaron todas las imágenes desde los años 1980 hasta 2023, por lo que los satélites y sensores usados fueron: Landsat 5-TM (1980-2011) y Landsat 8-OLI (2012-2023). Posteriormente se descartaron todas las imágenes que contenían nubosidad en el polígono del área de estudio para que no interfiriera en los resultados (Jiménez-Jiménez, 2023). Para cubrir el área de estudio se requirieron tres imágenes de los satélites Landsat 5-TM (1984-2012), con Path: 030, 031 y Row: 044, 045, para cubrir el área con el satélite Landsat 8-OLI (2013-actualidad) (Fig. 11).

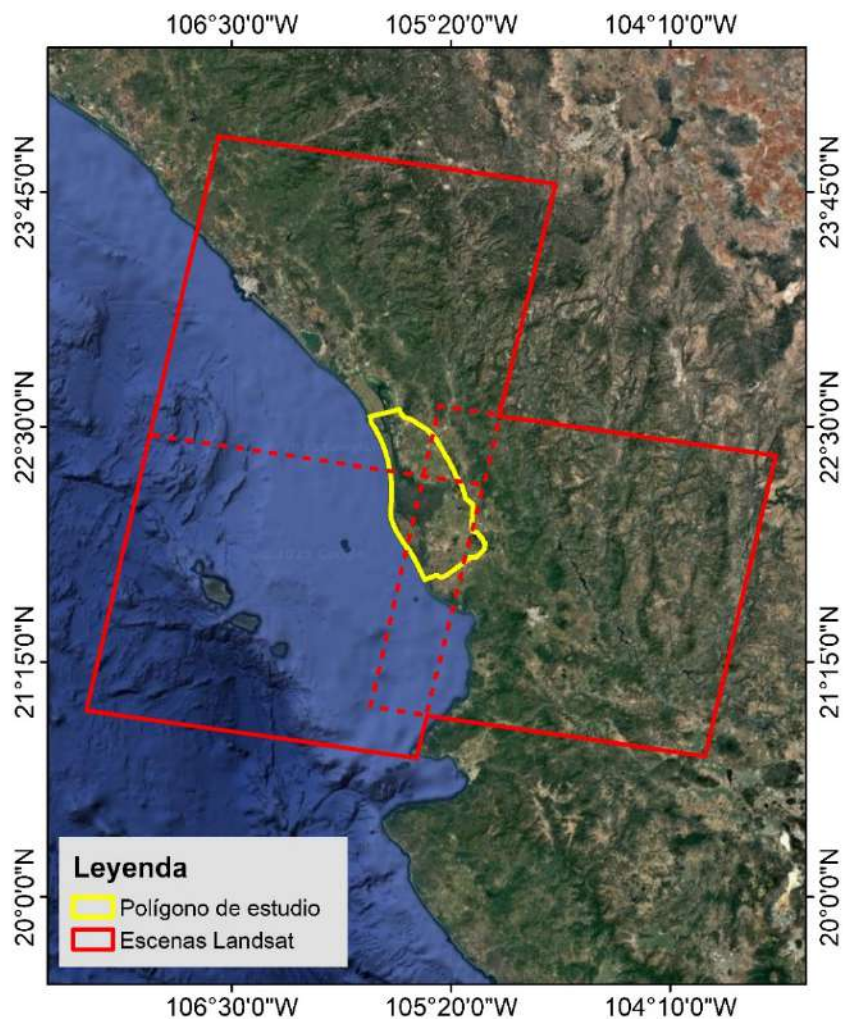


Figura 11. Escenas del área de estudio: Path: 30 Row: 44, Path: 31 Row: 44 y Path: 31 Row: 45.

6.3. Variables espectrales

Se obtuvieron índices espectrales del área de estudio como: índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y la temperatura superficial de la tierra (LST) por sus siglas en inglés.

6.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el índice más popular utilizado para la evaluación de la vegetación. Los estudios han demostrado que el NDVI es eficaz para diferenciar sabanas, bosques densos, campos no forestales y agrícolas, para determinar los tipos de bosques siempreverdes versus bosques estacionales (Tuker, 1979; Pettorelli et al., 2005), y para estimar diversas propiedades de la vegetación como la concentración de clorofila en las hojas (Pastor-Guzmán et al., 2015), productividad de las plantas (por ejemplo, Vicente-Serrano et al., 2016), cobertura vegetal fraccionada (Dutrieux et al., 2015) y estrés de las plantas (Chávez et al., 2016).

Matemáticamente, el NDVI se expresa de la siguiente manera (Ec. 2), donde R_{ed} y N_{IR} son las mediciones de la radiancia espectral (o reflectancia) registradas con sensores en la región roja (visible) y regiones del NIR respectivamente. La radiancia ($\text{watts estereorradian}^{-1}\text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) es la medida del flujo de energía registrada por un sensor. Los valores de la radiancia a menudo se reescalan a números digitales (DN) como 6 o 7 bits (MSS), 8 bits (TM, ETM+) o 12 bits (Landsat 8) (Tuker, 1979).

La reflectancia es una medida sin unidades de la relación entre la radiación reflejada por un objeto y la radiación incidente sobre el objeto. Los valores de NDVI varían de -1 a 1 independientemente del uso de radiancia, reflectancia o DN como entrada. En general, sus valores son negativos para cuerpos de agua, cercanos a cero para rocas, arenas o superficies de concreto, y positivos para la vegetación, incluidos cultivos,

arbustos, pastos y bosques (Jones y Vaughan, 2010). En otras palabras, valores más altos de NDVI significan implicaciones más fuertes para una vegetación vigorosa.

$$NDVI = \frac{N_{IR}NIR - E_DRED}{N_{IR}NIR + R_{ed}RED} \quad \text{Ec. 1}$$

El uso de reflectancia es útil para reducir el efecto de la radiación dispersa en la atmósfera (Jones y Vaughan, 2010). En días despejados, la cantidad de dispersión de la radiación solar es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda ($\sim\lambda^{-4}$, donde, λ es la longitud de onda) (Fig. 12).

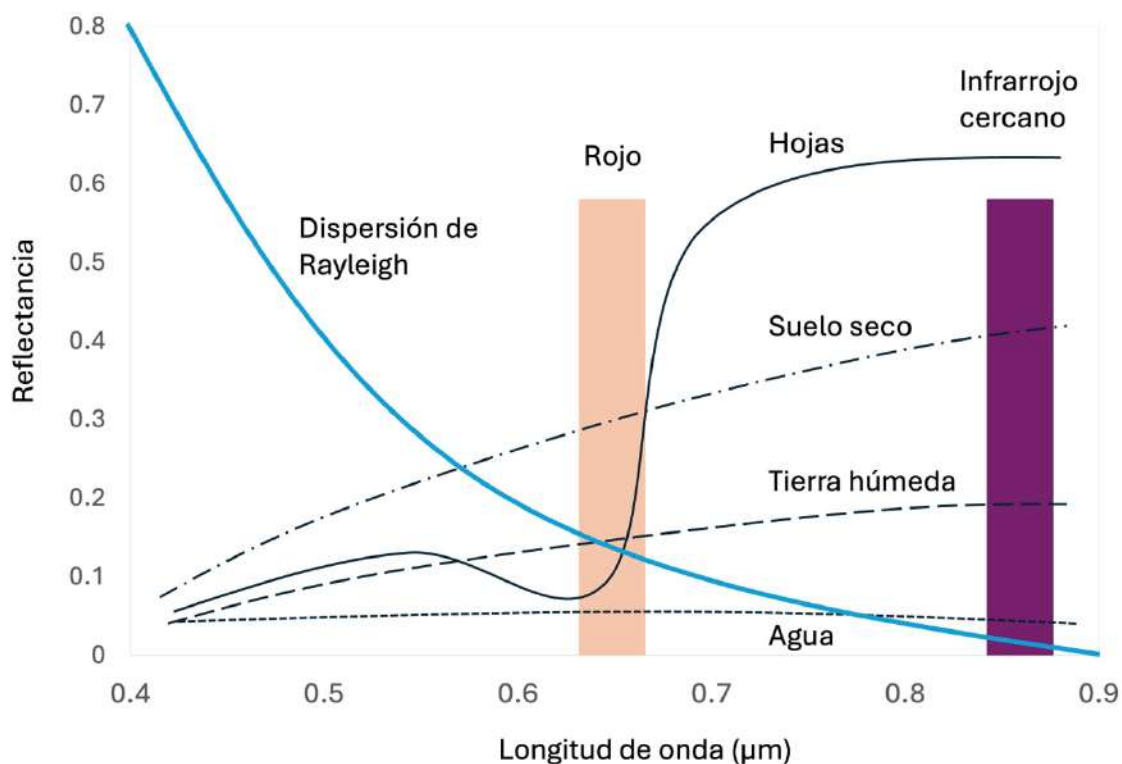


Figura 12. Ilustración de las curvas de respuesta espectral y sus intersecciones con la banda roja (Landsat 8, banda 4) e infrarroja cercana (Landsat 8, banda 5), así como la dispersión dependiente de la longitud de onda.

Debido a la cantidad de imágenes a procesar a lo largo de los años de estudio se automatizó el cálculo del índice NDVI en el lenguaje de programación *Model builder* en el software ArcGIS 10.8.2, primeramente el *toolbox* solicita las bandas necesarias

de la imagen de satélite (los óvalos azules), posteriormente realiza los cálculos (rectángulos naranjas y amarillos), la herramienta “*Mosaic to New Raster*” hace un mosaico de las escenas necesarias para cubrir la totalidad del polígono de estudio, posteriormente la herramienta “*Extract by Mask*” recorta el mosaico con base al polígono de estudio y finalmente la herramienta “*Raster to Point*” extrae el valor de cada pixel que compone la imagen para sus posteriores análisis estadísticos o gráficas (Fig. 13).

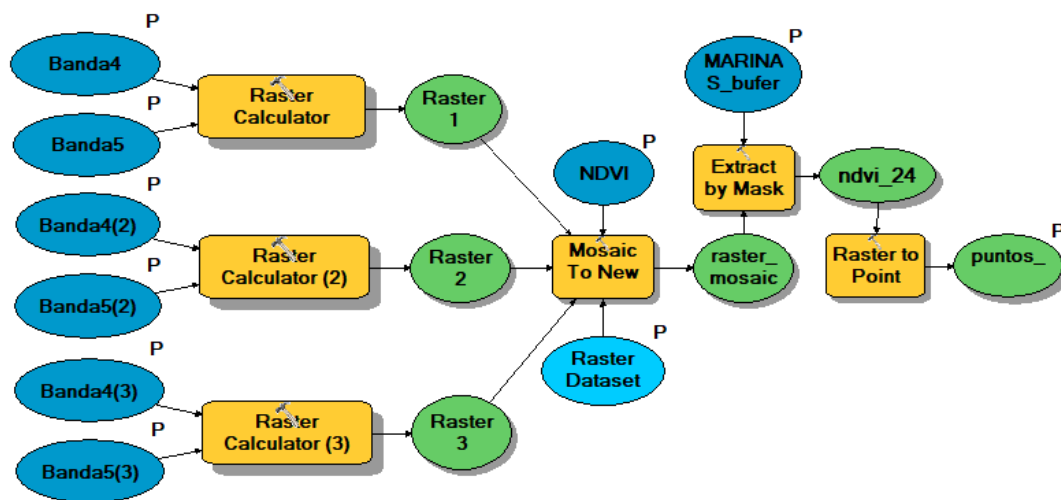


Figura 13. Diagrama de flujo para estimar NDVI con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual *Model Builder*.

6.5. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

El NDWI fue propuesto por McFeeters (1996), es uno de los índices de agua más comúnmente utilizados para detectar cuerpos de agua superficiales abiertos y fue diseñado por primera vez por las bandas espectrales verde e infrarrojo cercano (NIR) de Landsat TM. La característica común en el diseño de los índices de agua generados es la absorción de agua en la región infrarroja. Mientras que la NDWI se beneficia de la alta reflectancia en NIR de la vegetación y las características del suelo.

Los valores del NDWI están relacionados con el contenido de agua en la vegetación y es una buena representación para la medición del estrés hídrico de las plantas. Estos

valores son útiles en los cálculos de teledetección del estado del agua líquida de la vegetación desde el espacio. Este estado se centra en las propiedades de reflectancia de la vegetación verde y seca. El índice de reflectancia varía de -1 a $+1$ y se utiliza en la extracción de cuerpos de agua de las imágenes de satélite (Ec. 2).

$$NDWI = \frac{Verde-NIR}{Verde+NIR} \quad \text{Ec. 2}$$

También se automatizó el cálculo del índice NDWI en el lenguaje de programación *Model builder* en el software ArcGIS 10.8.2, primeramente el *toolbox* solicita las bandas necesarias de la imagen de satélite (los óvalos azules), posteriormente realiza los cálculos (rectángulos naranjas y amarillos), la herramienta “*Mosaic to New Raster*” hace un mosaico de las escenas necesarias para cubrir la totalidad del polígono de estudio, posteriormente la herramienta “*Extract by Mask*” recorta el mosaico con base al polígono de estudio y finalmente la herramienta “*Raster to Point*” extrae el valor de cada pixel que compone la imagen para sus posteriores análisis estadísticos o graficas (Fig. 14).

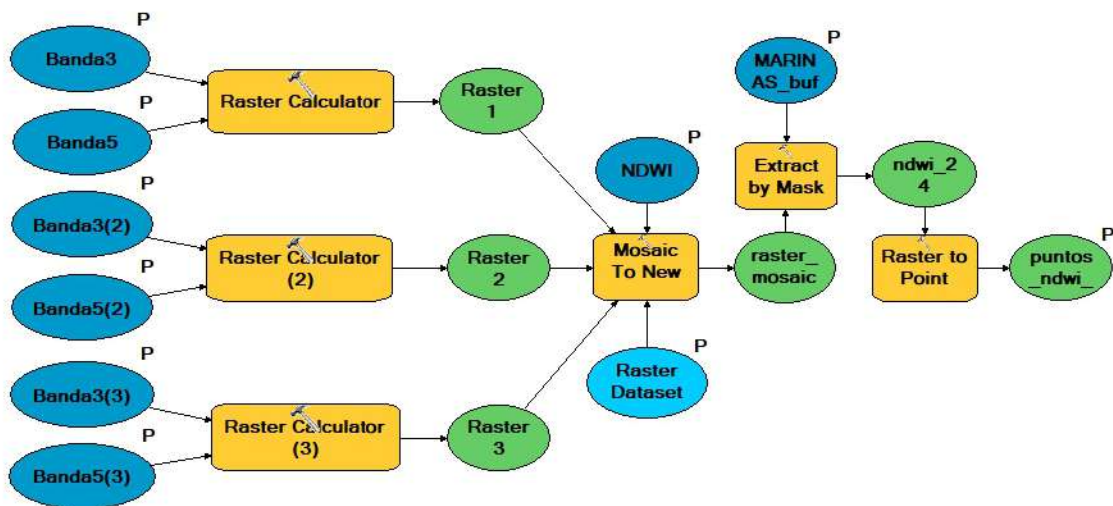


Figura 14. Diagrama de flujo para estimar NDWI con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual *Model Builder*.

6.6. Temperatura superficial de la tierra (LST)

La temperatura de la superficie terrestre (LST por sus siglas en inglés) se derivó de la cobertura global de imágenes Landsat 5 y Landsat 8. La emisividad espectral de la superficie necesaria para derivar la LST es de 11,3 μm para Landsat 4-7 y de 10,7 μm para Landsat 8-9, obtenida de la Base de datos de emisividad global (GEDv3) (Malakar et al. 2018). Las bandas espectrales que se utilizaron para calcular LST son la banda 5 TM y la banda 10 en OLI 1 y 2, y la obtención de los valores en grados Celsius (Ec. 4), siguiendo la metodología propuesta por Chander (2009) que considera la cobertura vegetal y el tipo de superficie.

Primeramente, se calculó la temperatura de brillo a partir de valores de radiancia de las bandas térmicas, utilizando la ecuación de Planck invertida (Ec. 4), donde BT es la temperatura de brillo en grados Kelvin, K1 y K2 son constantes de calibración específicas de cada sensor, L λ es la radiancia espectral de las bandas térmicas.

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda+1}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

Se cálculo la emisividad (ϵ), que es un parámetro que describe la eficiencia de un objeto de emitir energía térmica. Finalmente, se calculó la temperatura superficial de la tierra (LST) a partir de la temperatura de brillo y la emisividad utilizando la siguiente ecuación (Ec. 5), donde Tb: Temperatura de brillo en grados Kelvin, λ : Longitud de onda media de la banda de radiancia emitida, ϵ : Emisividad de la superficie terrestre, ρ : Constante calculada a partir de otras constantes físicas. $\rho = (h \times c) / \sigma$, y la h: Constante de Planck (6.626×10^{-34} J *s), c: Velocidad de la luz (2.998×10^8 m/s), σ : Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

$$LST = \frac{BT}{1 + \frac{(\lambda BT)}{\rho} \ln(\epsilon)} \quad \text{Ec. 4}$$

Se automatizó el cálculo de la temperatura superficial (Fig.15) donde el flujo de trabajo parte de solicitar la banda térmica, así como el NDVI correspondiente a la escena a calcular (óvalos azules). Los rectángulos cafés representan el cálculo de cada una de las ecuaciones, mientras que el rectángulo amarillo representa la herramienta “*Mosaic to New Raster*” usada para la unión de cada una de las escenas y la herramienta “*Extract by Mask*” con la cual se realizó el recorte del raster resultante con base al polígono de estudio.

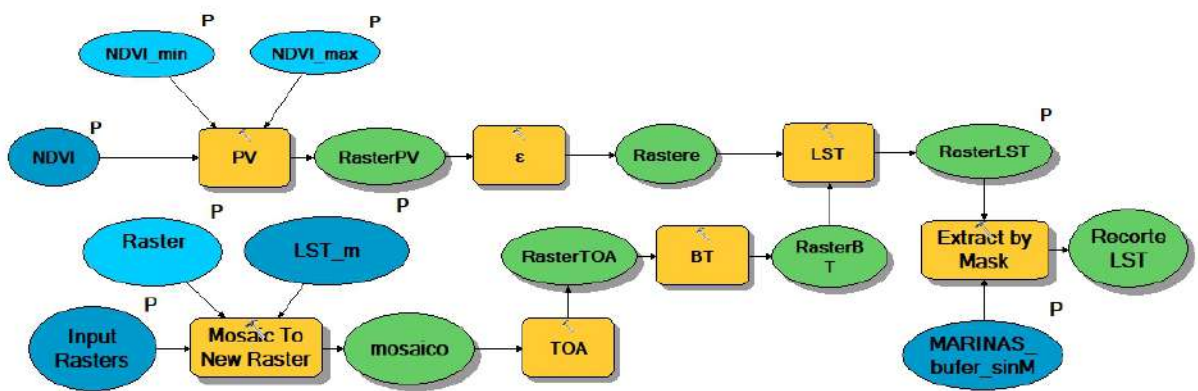


Figura 15. Diagrama de flujo para estimar LST con imágenes Landsat 5-TM y 8-OLI en el lenguaje de programación visual *Model Builder*.

6.7. Hidrología

Para obtener la hidrología del área de estudio, se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (MDE) con una resolución de 30 metros, obtenidos del satélite Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour y también MDE de alta resolución (12 metros) obtenidos por el RADAR-ALOS descargados de la página del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (Fig.16).

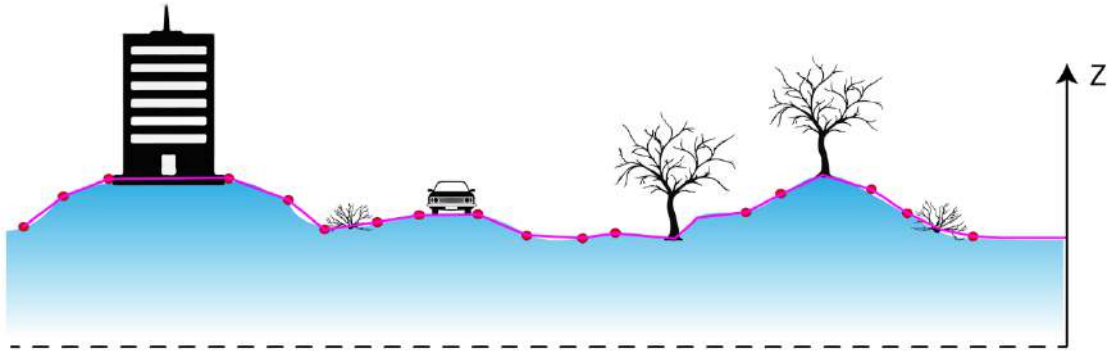


Figura 16. Representación de un modelo digital de elevación (adaptado de CIDHMA, 2021).

Posteriormente en el programa ArcGIS 10.8.1. se utilizaron las herramientas de Hidrología que modelan el flujo de agua a través de una superficie, siguiendo el propuesto por Strahler (1957) y Shreve (1966) es un método para asignar un orden numérico a enlaces en una red de arroyos y es el método de ordenación de flujos más común. Primeramente, se rellenan los pixeles vacíos del MDE, luego se obtiene la acumulación de flujo, el cual sirve para identificar los flujos en una pendiente descendente; y la dirección de flujo, el cual es muy útil para identificar los cambios de direcciones de una corriente hidrológica. A partir de estos dos parámetros se identificaron los principales arroyos presentes en el área de estudio.

En el método Strahler, se asigna un orden de 1 a todos los vínculos sin afluentes, que se conocen como de primer orden. El número de orden de los cursos de agua aumenta cuando los cursos de agua del mismo orden se intersecan. Por lo tanto, la intersección de dos vínculos de primer orden creará un vínculo de segundo orden; la intersección de dos vínculos de segundo orden, un vínculo de tercer orden; etc (Fig. 17).

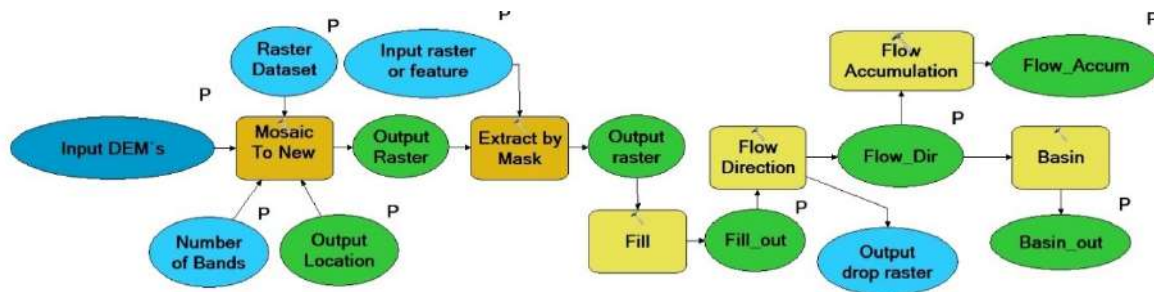


Figura 17. Diagrama de flujo para estimar la hidrología del área de estudio en el lenguaje de programación visual *Model Builder*.

6.8. Cambio y uso de suelo

Se realizó el cambio y uso de suelo para los años 1986, 1995, 2000, 2008, 2016 y 2024 utilizando las imágenes de satélite de Landsat *level 2*. El método que se utilizó para la clasificación fue el de máxima probabilidad o verosimilitud, este método asume que las estadísticas para cada clase en cada banda presentan una distribución normal y se calcula la probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase específica. Cada píxel es asignado a la clase que tiene la mayor probabilidad. Finalmente, las clases fueron: 1) cuerpo de agua, 2) manglar, 3) agricultura activa, 4) agricultura inactiva, 5) pastizal, 6) Selva baja caducifolia. El primer paso fue realizar una clasificación basada en píxeles para predecir seis tipos diferentes de cobertura (Fig. 19). Una vez definidas las clases de interés se muestrearon al menos 200 polígonos de entrenamiento de forma aleatoria (Fig. 18).

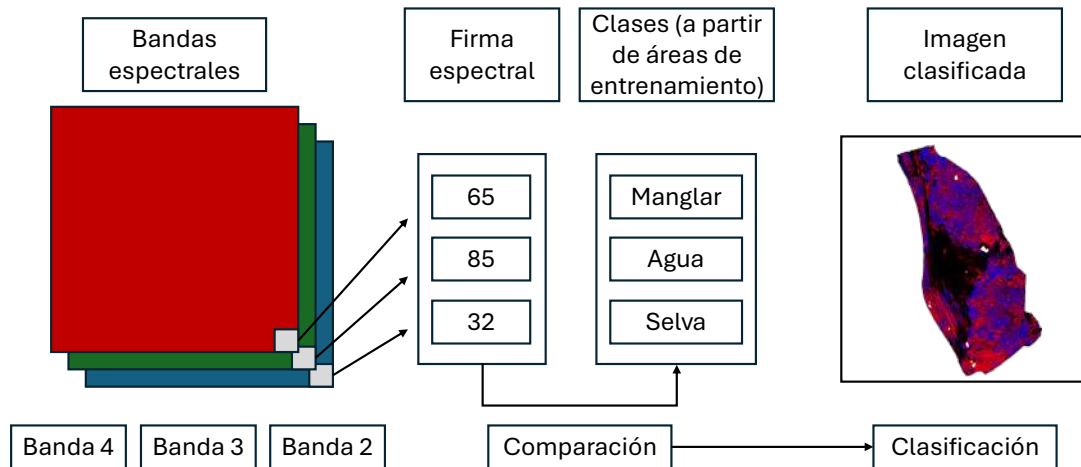


Figura 18. Secuencia de clasificación supervisada por algoritmo de máxima verosimilitud.

Las clasificaciones se realizaron en el software ArcGIS 10.8 con los módulos de análisis espacial, la clasificación comienza primero con la obtención de las firmas espectrales de cada clase a partir de los polígonos de entrenamiento y los píxeles contenidos de 7 bandas espectrales (visibles, infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda media). El siguiente paso es la generación de la clasificación a partir de estas firmas espectrales que también resulta en una matriz de covarianza (Fig. 19; 20).

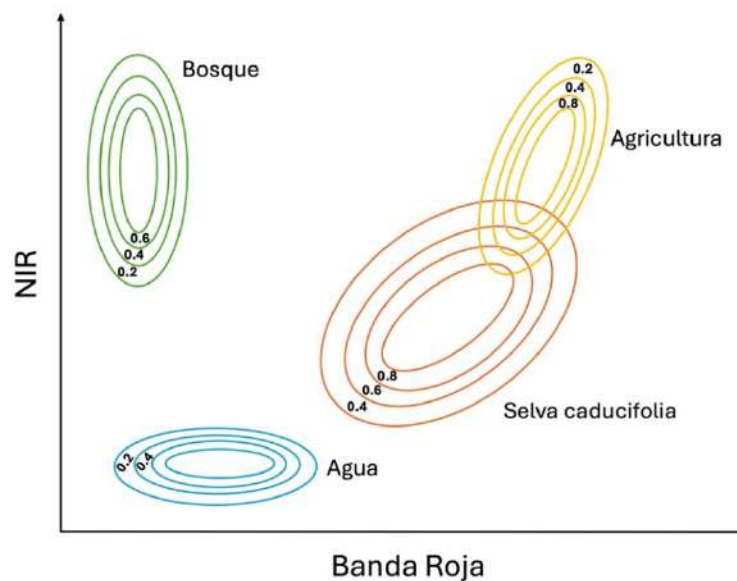


Figura 19. Ejemplo grafico del proceso de clasificación de máxima verosimilitud, se observa para cada clase la formación de una distribución gaussiana para dos bandas espectrales sin embargo en esta investigación se usaron 7 bandas.

Se obtuvieron los archivos vectoriales con escala 1:250,000 de la serie I de uso de suelo y cobertura vegetal de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) correspondiente al año de 1997, y la serie VI que se realizó en el año 2016. Los archivos vectoriales fueron importados al programa QGIS y mediante la función de tabulación cruzada se obtuvieron los cambios positivos (aumento de superficie en hectáreas) y cambios negativos (reducción de la superficie en hectáreas) de las superficies de uso de suelo y vegetación que se distribuyen en el área de estudio (Tabla A1.1).

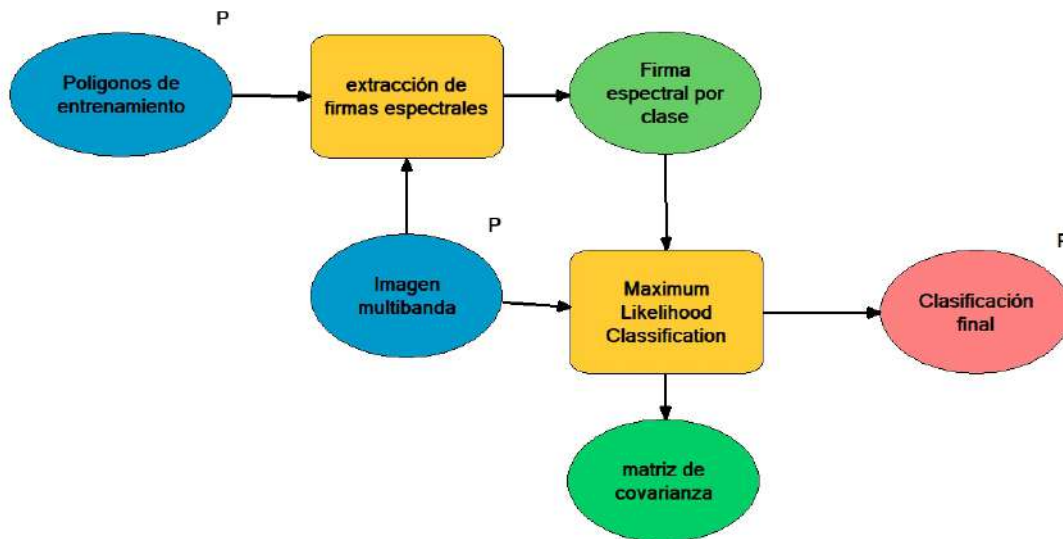


Figura 20. Los óvalos en color azul indican insumos para la clasificación, los cuadros amarillos son herramientas geoespaciales dentro de ArcGIS. Los óvalos en color verde son los resultados de los geoprocursos y el ovalo en color rojo es el resultado final. El superíndice P indica un parámetro que se puede cambiar es decir polígonos de entrenamiento e imágenes de otro periodo e inicia con una nueva clasificación.

6.9. Propuesta de zonificación

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó el 3 de abril en el Diario Oficial de la Nación el Programa de Manejo del Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales Nayarit. Este programa contiene una zonificación en tres áreas principales: zona núcleo, amortiguamiento y zona de influencia (Fig. 21).

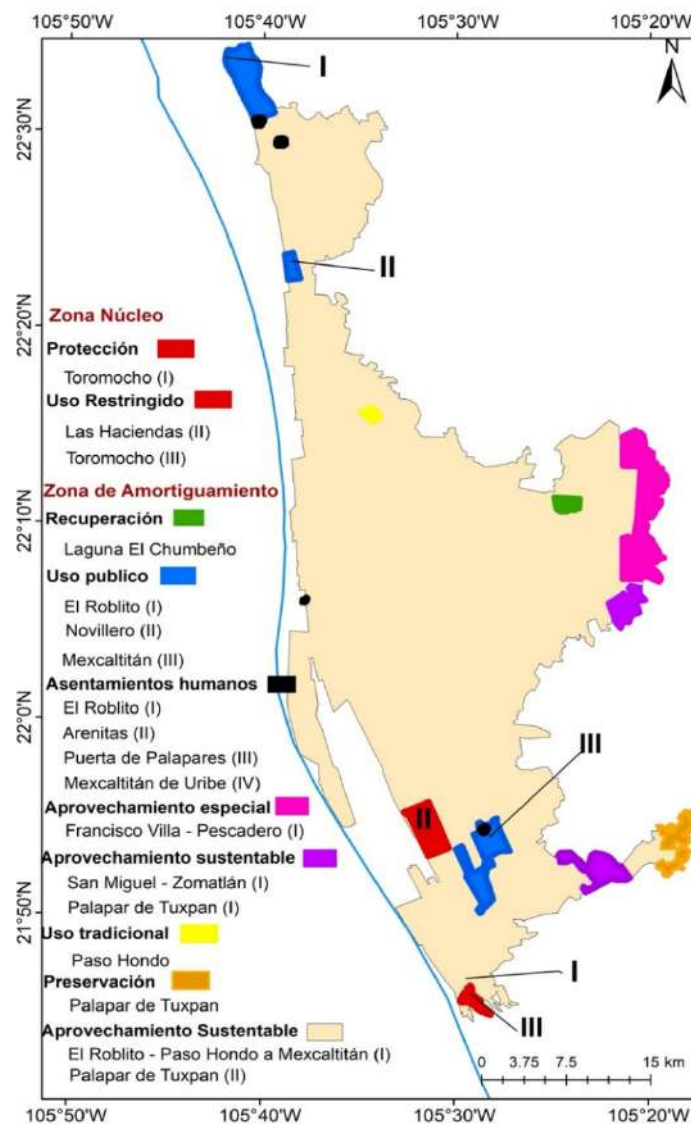


Figura 21. Zonificación de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales y sus políticas de uso (Diario Oficial de la Nación, Programa de Manejo del Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit, 2017).

Estas zonificaciones se utilizaron como referencia para determinar **cambios positivos** (aumento en la cobertura de manglar) y **cambios negativos** (disminución de la cobertura de manglar y selva baja caducifolia), a partir de dos clasificaciones, la primera que se nombró inicial y corresponde a la clasificación de 1986 realizada en este estudio y la segunda denominada final la cual es la clasificación de la cobertura vegetal del 2024 (Jensen, 2005).

Para lo anterior se realizó la técnica de detección de cambios siguiendo el método de Jensen (2005), que se define como el procedimiento utilizado para identificar diferencias en el estado de un objeto o fenómeno observándolo en diferentes momentos con la siguiente ecuación (5), donde $Dx(k,i,j)$ es la diferencia resultante, $X(k,i,j,T1)$ es el valor del píxel en la fila i , columna j , banda k , en el tiempo $T1$, $X(k,i,j,T2)$ es el valor del mismo píxel en el tiempo $T2$.

$$Dx_{kij} = X_{ijk}(T2) - X_{ijk}(T1) \quad \text{Ec. 5}$$

Si la diferencia es 0, indica que no ha habido cambio, mientras que, si la diferencia es positiva o negativa, indica que ha ocurrido un cambio (Fig. 22).

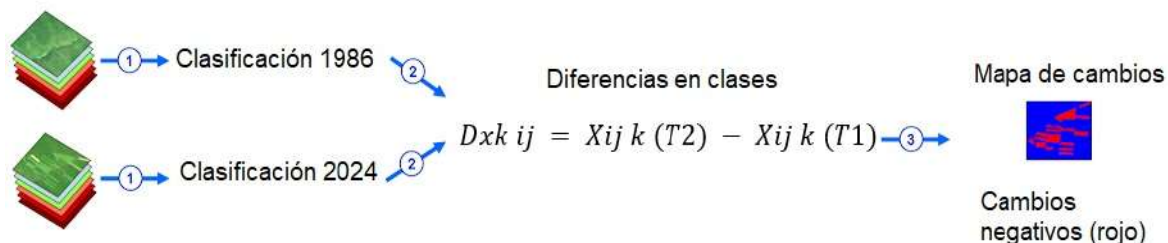


Figura 22. Diagrama de procesos de la técnica de detección de cambio que muestra como resultado un raster con cambios positivos y negativos.

Para realizar la nueva propuesta de zonificación el primer criterio que se definió fue la selección de áreas en donde aumento el manglar (diferencias positivas), aunque no existe un área mínima para conservar los manglares, debido a que depende de las condiciones de cada lugar, se partió la selección de polígonos que incrementaron en más de 100 hectáreas de manglar debido a que algunos autores mencionan que esta

superficie mantiene la conectividad del mismo (Rudianto et al. 2019). La selección de las superficies >100 hectárea se realizó con la función algebra de mapas en ArcGIS).

Para el caso del polígono de preservación que está directamente relacionado con la selva baja caducifolia y la presencia de felinos silvestres, se seleccionaron las áreas que tuvieran menor impacto antropogénico (cultivos, ganadería, caminos) y lo más cercano a la región de manglares con la finalidad de digitalizar un corredor que permita la conectividad entre estos dos ecosistemas en donde se sabe que los felinos los utilizan como corredor biológico.

En cada una de las nuevas zonificaciones se identificaron los actores (ejidatarios, pequeños propietarios, presencia de áreas naturales protegidas, etc) mediante entrevistas directas al personal de la secretaria de medio ambiente del estado de Nayarit y también con los responsables de inspección y vigilancia de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) del mismo estado.

Para la zonificación se realizó una propuesta de portafolios de proyectos en donde se identifican las principales fuentes de financiamiento tanto nacionales y extranjeros y las organizaciones del sector civil que pueden estar interesadas en los proyectos (Tabla A1.2).

6.10. Estadísticos

Para analizar las variaciones entre los valores de los índices espectrales y determinar si los valores de LST, NDVI y NDWI variaron significativamente entre los años de 1986 al 2024, el primer paso que se realizó fue una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov en el software Matlab. Este software tiene una función denominada *kstest* en donde se pone a prueba la hipótesis nula referente a que los datos de entrada e.g. valores de LST provienen de una distribución normal estándar versus la hipótesis alternativa que predice que los datos no provienen de una distribución normal. El resultado que arroja esta función es mediante una variable llamada *h*, si muestra un valor de 1 se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significancia de 5 % y en caso de que el valor sea 0 se acepta la hipótesis nula.

Para calcular la significancia de la prueba y el parámetro *K* (el cual mide la distancia entre la distribución observada y la hipotética) se utilizó el siguiente algoritmo $[h,p,k]$, donde *h* = resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov, *P* = Valor de probabilidad de la prueba, *K* = Parámetro que mide las distancias entre los valores observados y los valores esperados.

Las pruebas de normalidad se realizaron de forma independiente de las variables espectrales y el resultado de las pruebas se muestran en graficas que representan los valores de la distribución continua observada versus la esperada para observar las diferencias visualmente.

En el caso de las variables que resulten normales se realizara un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con una significancia de 0.05 asumiendo que los datos fueron obtenidos de forma aleatoria. El objetivo es determinar si los promedios de LST, NDVI o NDWI variaban entre los años. Este análisis también se realizó en Matlab con la función *anova1*, la cual además de realizar la prueba genera un reporte del resultado de las diferencias intra e intergrupos, valor de significancia y un gráfico de cajas y bigotes. Las pruebas de ANOVA que resulten significativas se les realizó una prueba

a posteriori de Tukey con un nivel de significancia de 0.5. Esta prueba compara los promedios individuales de cada variable espectral y determinar su valor de probabilidad. Este procedimiento también se realizó en Matlab con la función *multcompare* que tiene la característica de graficar las diferencias entre grupos.

Para la validación de cada una de las clasificaciones supervisadas se realizó una matriz de confusión. La matriz de confusión se define como una tabla que compara registros de referencia, en este caso los reportados por el INEGI y los identificados por foto interpretación y registros de imágenes obtenidas por drones. A partir de la matriz de confusión se estimó la exactitud de la clasificación (\hat{O}), errores de comision (\hat{U}_i) y exactitud del productor o errores de omision (\hat{P}_j) (Congalton, 1991). Se calcularon tres parámetros de acuerdo con Olofsson et al. (2013) en el programa Matlab 2024a:

Precisión global del mapa (O). Consiste en sumar los elementos de la diagonal (aciertos entre datos de referencia y clasificaciones) con el total de puntos muestreados, que representa el porcentaje de predicciones correctas frente al total (Ec. 6), donde \hat{p}_{jj} = proporción del área que es una categoría particular en el terreno que también está mapeada como esa categoría.

$$O = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{jj} \quad \text{Ec. 6}$$

Error de omisión (E). Se refiere al número de píxeles, puntos o áreas que pertenecen a una determinada categoría, e.g. manglar pero que no fueron incluidos en ella (Ec. 7), donde X_{+i} indica el marginal de la columna i, y X_{ii} la diagonal de dicha columna.

$$E = \frac{x_{+1} - X_{ii}}{x_{+1}} \quad \text{Ec. 7}$$

Error de comisión (Ce). Se refiere a los elementos (píxeles o áreas) que no perteneciendo a una clase pero aparecen en ella (datos fuera de la diagonal principal de la matriz de confusión) (Ec. 8).

$$E = \frac{x_{i+} - X_{ii}}{x_{i+}} \quad \text{Ec. 8}$$

Estos tres parámetros fueron graficados en Matlab para comparar las precisiones y errores de todas las clasificaciones supervisadas correspondientes a los años de 1986 al 2024.

VII. RESULTADOS

Se descargaron un total de 426 imágenes de satélite Landsat. Después de analizar cada una de las imágenes desde los años 80's hasta el 2024, se decidió trabajar durante los meses de marzo o abril, debido a la repetitividad de las imágenes de satélite sin nubes durante los años 1986, 1995, 2000, 2008, 2016 y 2024.

7.1. Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El promedio del NDVI fluctuó entre los 0.2 y 0.4 para el exterior del Área Natural Protegida (ANP). Para todos los años con excepción de 1986 el valor de NDVI estuvo por debajo de 0.4 y un patrón similar se encontró al interior del ANP. Sin embargo, dentro de la ANP algunos píxeles superaron el valor de NDVI de 0.5, estos sitios corresponden a superficies de manglar y de selva baja caducifolia. Los valores del NDVI indican que conforme se avanza del año 1986 al 2024 los valores se concentran en la media y a partir del año 2016 ningún píxel supero el valor del índice de 0.6 dentro y fuera del ANP (Fig. 23 y 24).

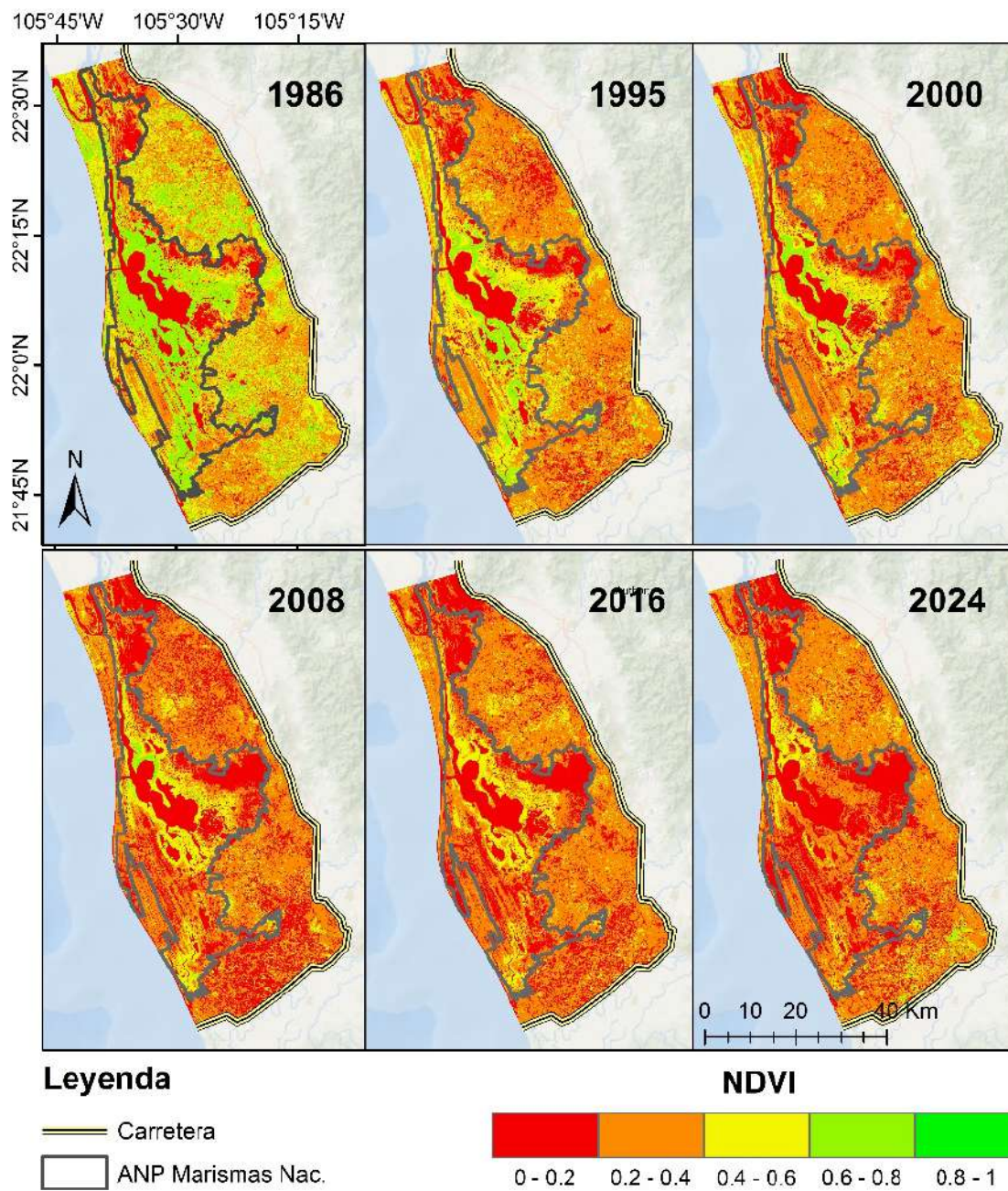


Figura 23. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada desde el año 1986 hasta 2024 del área de estudio.

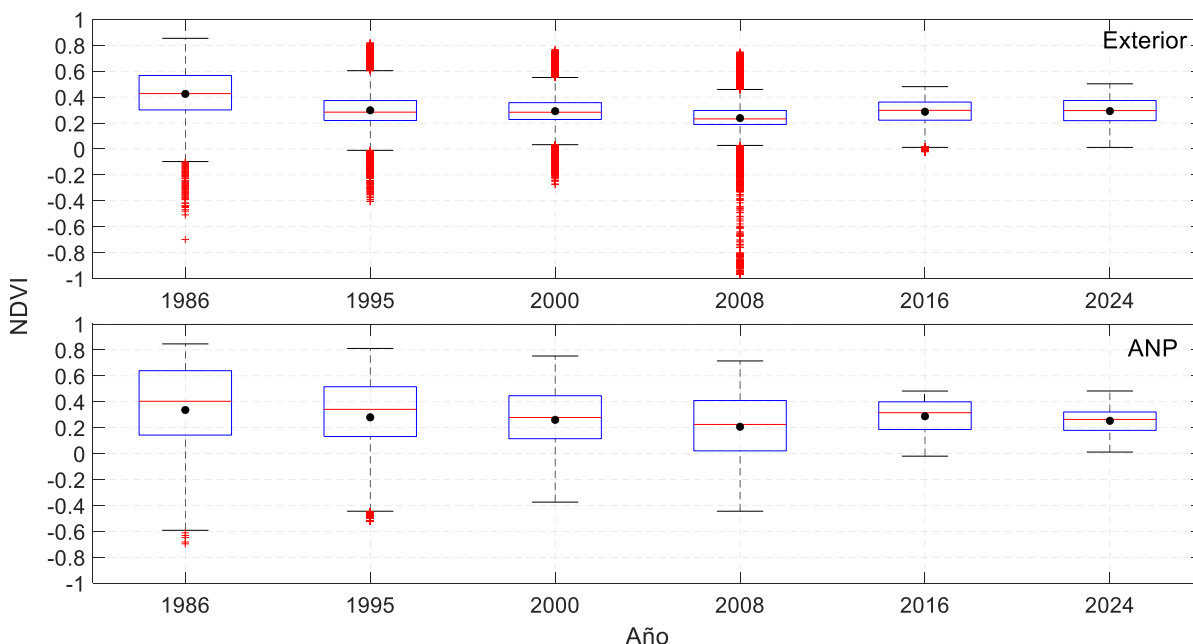
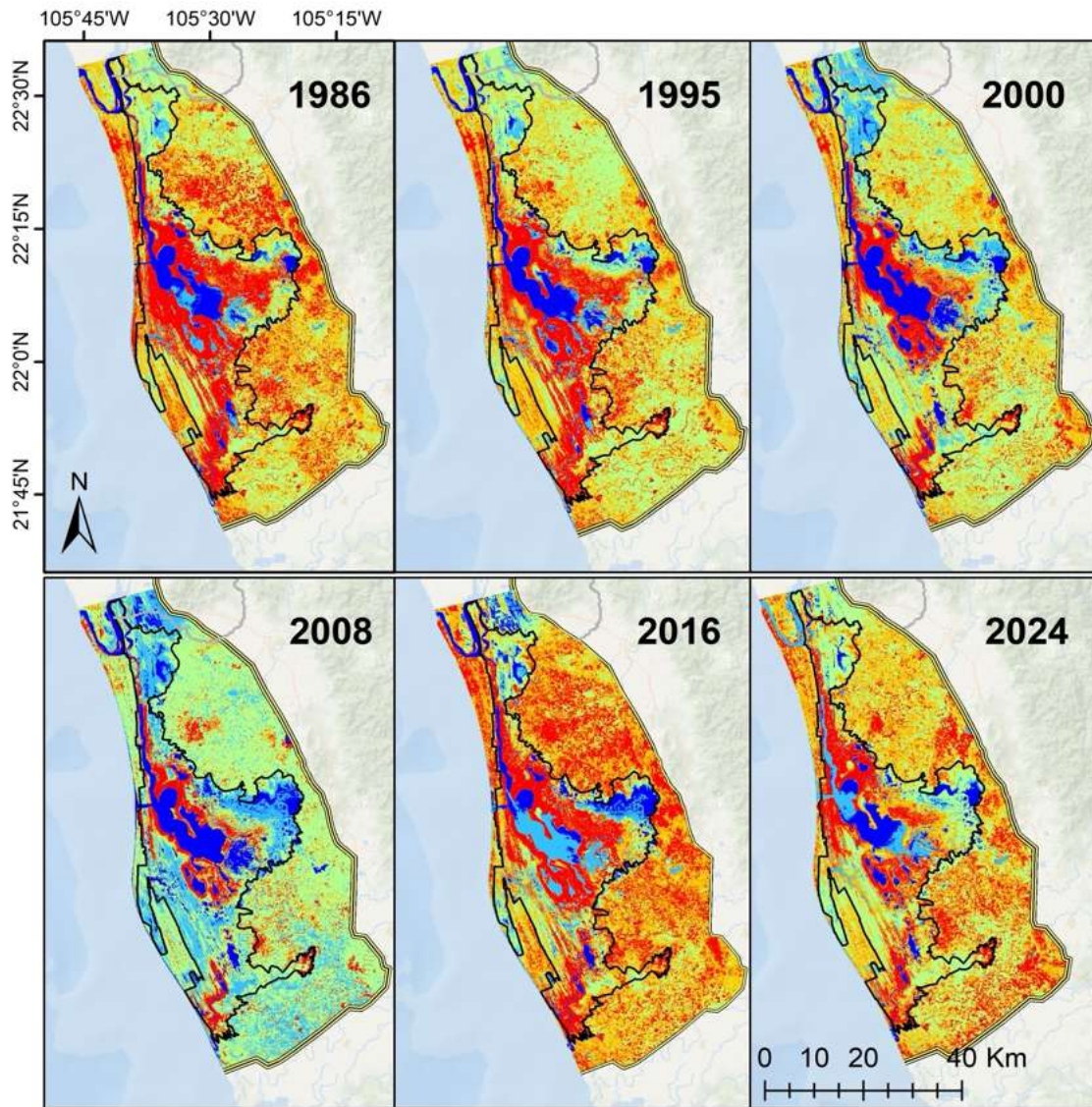




Figura 24. Diagrama de Cajas y Bigotes del Índice Vegetación de Diferencia Normalizada, dentro y fuera del ANP.

7.2. Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

Los valores de NDWI tuvieron promedios similares dentro y fuera del ANP, así como valores que indican la ausencia del agua superficial ($NDWI = -0.30$), algunos pixeles tuvieron un valor de 0.25 en donde existen cuerpos de agua superficial, por ejemplo, los ríos y marismas. En la figura 25 se puede observar que los únicos cuerpos de agua que existen en el polígono exterior corresponden a la parte norte en el municipio de Escuinapa, Sinaloa, mientras que en el interior de la ANP se puede observar una distribución a la parte central de valores de $NDWI > 0$ que indican la presencia de agua y estos corresponden a la zona de canales y esteros en donde se distribuye el manglar.



Leyenda

-  Carretera
-  ANP Marismas Nac.

NDWI



Figura 25. Histograma de frecuencias del Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

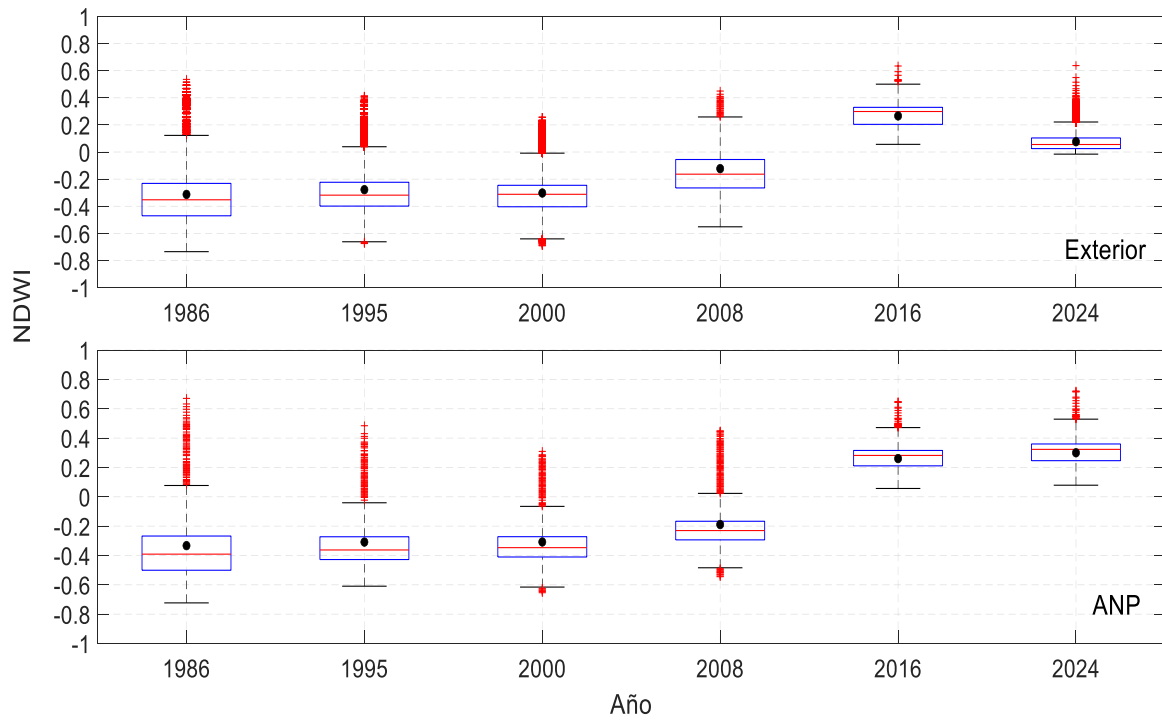


Figura 26. Diagrama de Cajas y Bigotes del índice de agua de diferencia normalizado, dentro y fuera del ANP.

7.3. Temperatura Superficial de la Tierra (LST)

En la temperatura superficial de la tierra (LST) se observó un incremento a lo largo del periodo de estudio. Los valores más bajos se registraron en el año 1986, con un aumento gradual hasta los años 2024. Para exterior de la ANP, la LST fluctuó entre los 14 y 52 °C, la mediana fluctuó entre los 28 °C para el 1986 hasta 37 °C para el año 2024. En el ANP la LST fluctuó entre los 19 a los 48 °C, y una mediana entre los 24 hasta los 30 °C. En el ANP los incrementos de temperatura son notorios en la región de los canales y la parte central del polígono. En general el ANP es más fría que su periferia, hasta por ~7 °C (Fig. 27 y 28).

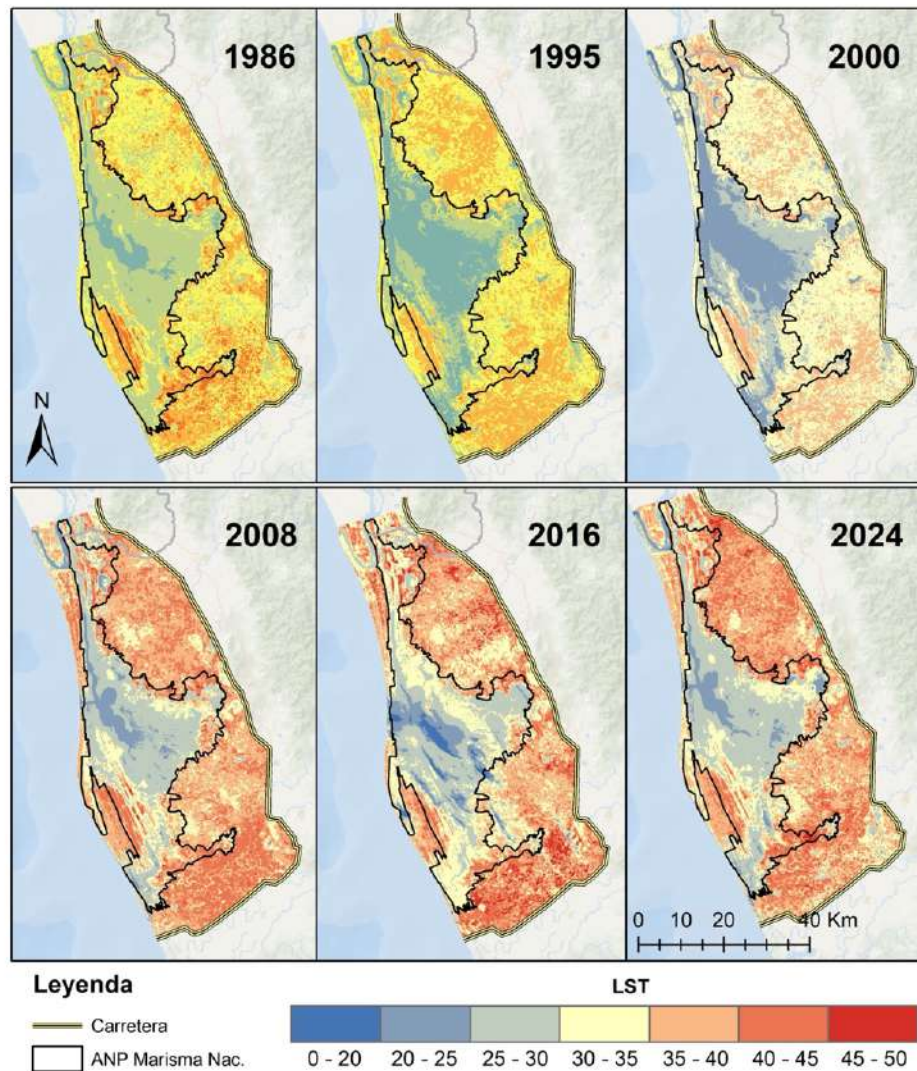


Figura 27. Temperatura superficial de la tierra (LST) desde 1986 hasta 202 del área de estudio.

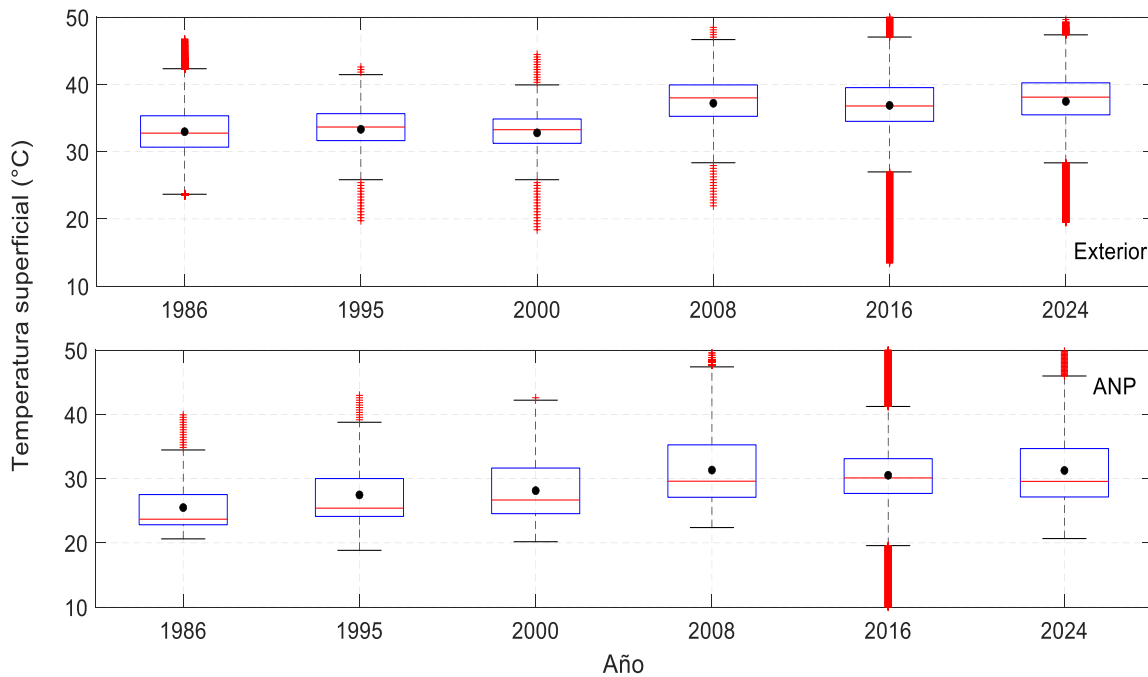


Figura 28. Diagrama de Cajas y Bigotes del Índice de Agua de diferencia normalizado, dentro y fuera del ANP.

7.4. Comparativo de zona (ANP y exterior) por índice espectral

Para tener una visión en general de los índices calculados dentro y fuera del ANP se procedió a realizar la Figura 29. El NDVI mostró una tendencia similar entre las dos áreas, encontrándose una disminución desde el año 1986 hasta el 2024. Para el NDWI, se registró un incremento de la humedad y/o los cuerpos de agua hasta el año 2024 para el ANP, y un descenso para el área exterior de la ANP en el año 2024. La temperatura superficial de la tierra si hubo diferencias notables entre las áreas, el ANP se mantuvo entre los 26 a 31 °C y el área exterior entre los de 34 °C y 38 °C. En general hubo una diferencia de alrededor de ~7 °C entre el interior y exterior del ANP.

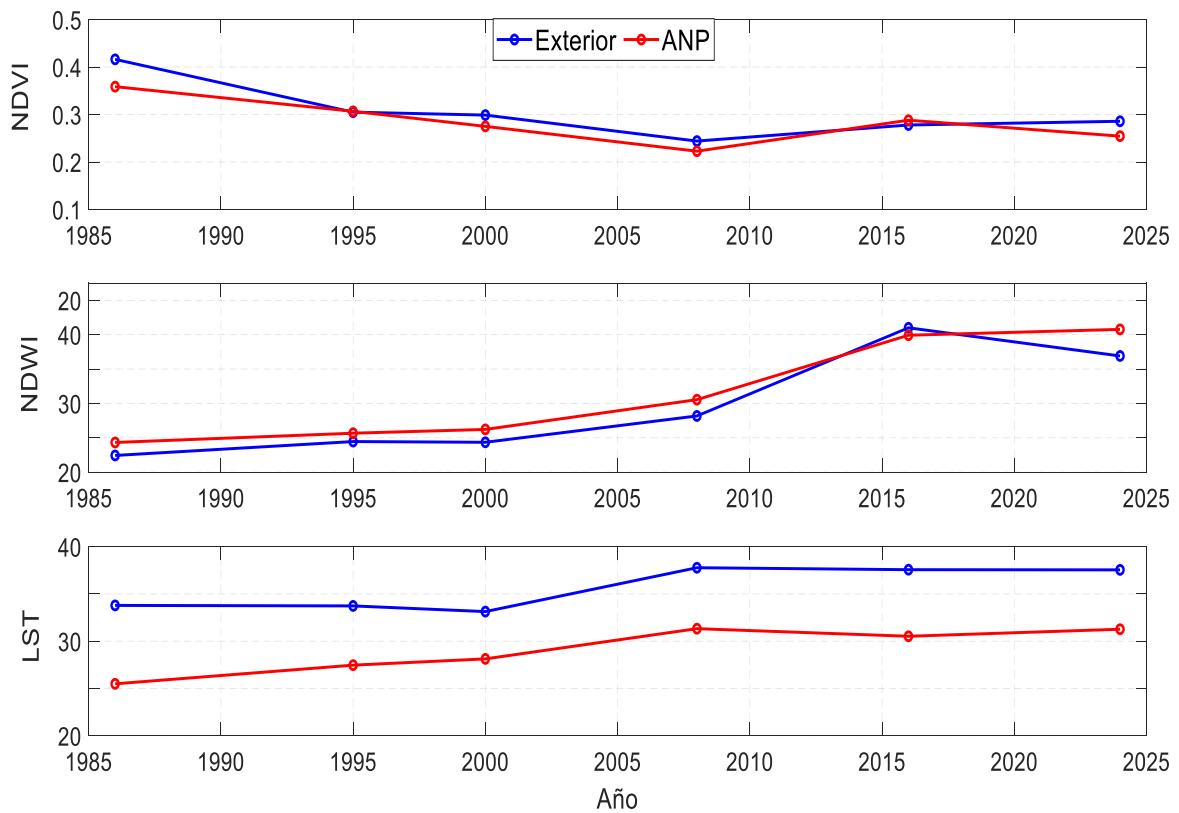


Figura 29. Comparativo entre zona exterior e interior del ANP para cada índice y variable espectral.

7.5. Hidrología

De acuerdo con la información de los Modelos Digitales de Elevación obtenidos del Radar (SRTM) con resolución de 30 metros, se obtuvieron seis diferentes órdenes de ríos (Fig. 26). Los ríos de primer orden no cuentan con afluentes y tuvieron una longitud de 1560 km, los del segundo orden se definen como la intersección de dos vínculos de primer orden, y tuvieron una longitud de 793 km, los de tercer orden tuvieron una longitud de 365 km. Mientras que la longitud de los ríos obtenidos con el DEM de RADAR-ALOS con una resolución de 12 metros, los ríos de primer orden fueron de 3644 km, los del segundo orden 1760 km, y los del tercer orden de 890 km (Fig. 30, 31).

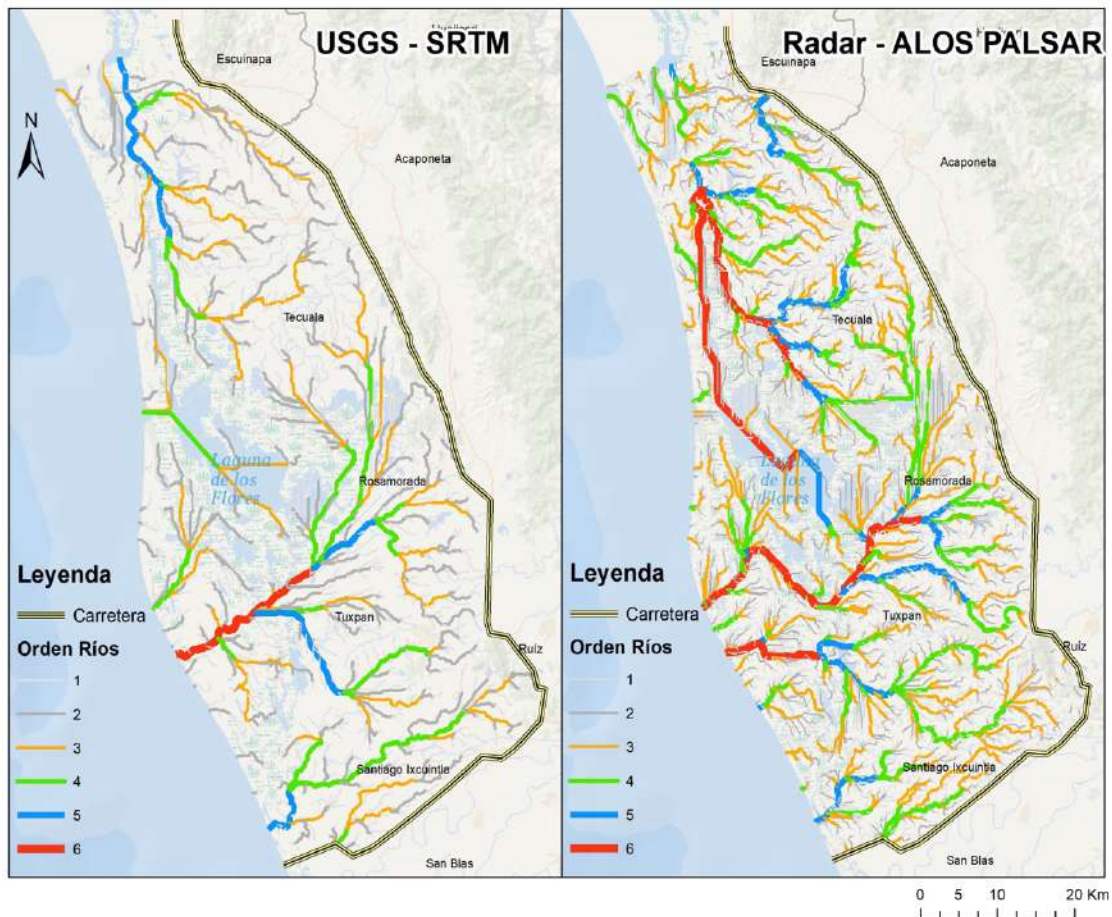


Figura 30. Orden de los arroyos del área de estudio con el Modelo digital de Elevación STRM y ALOS PALSAR.

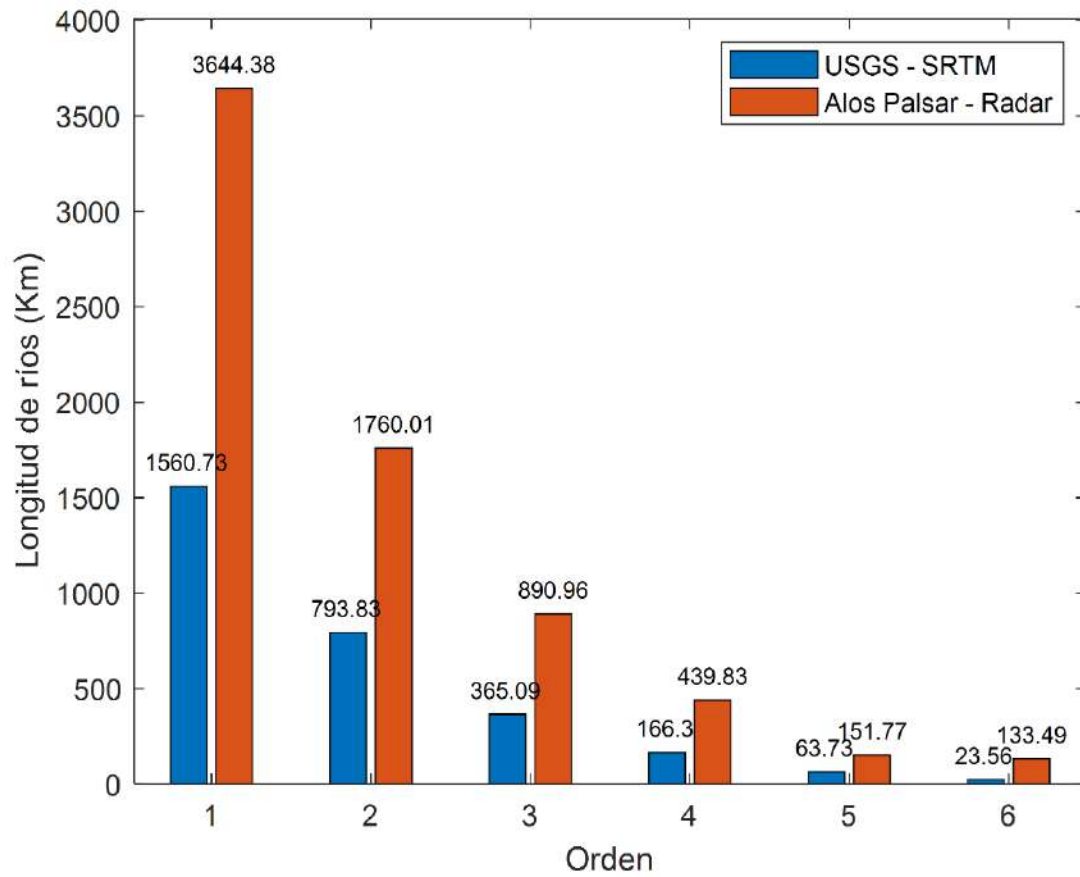


Figura 31. Longitud de Ríos obtenida para cada DEM trabajado.

7.6. Clasificación supervisada

La precisión global de todas las clasificaciones supervisadas fue mayor al 80% y los errores de omisión y comisión siempre se mantuvieron por debajo del 25% para todas las clases y años, con excepción de la clase agricultura para el año 2016 en donde el error de comisión supero el 25 % (Fig. 32, Tabla 1). Los resultados mostraron que la cobertura de manglar ha ido disminuyendo hasta un 52 %, mientras que los cuerpos de agua superficiales aumentaron un 42 %, la selva baja caducifolia incremento un 200 %, la agricultura inactiva fue en aumento, el pastizal fue disminuyendo y la agricultura activa fue aumentando a lo largo de los años, excepto para el año 2024 (Fig. 32, 33).

Para el polígono de la ANP los cuerpos de agua fueron aumentando conforme los años de estudio, pero en la década del 2000 al 2008 se duplicaron, y aumentaron en los últimos 38 años un total de 238 %. Para la clase manglar de 1986 al 2000 se perdió un 42 %, pero para el año 2008 aumentó 441 km², sin embargo, para el 2016 se volvieron a perder 146 km², en general durante los últimos 38 años se perdieron 47 % de manglares, es decir 333 km². La agricultura activa fue disminuyendo a lo largo de los años, mientras que la inactiva aumento un 370 % entre la década del 1986 al 1995, pero en años posteriores fue disminuyendo. El pastizal fue en aumento en la década de los 2000 y 2010, finalmente la selva baja caducifolia aumento desde la década de los 80's hasta el 2010 y posteriormente disminuyo para el año 2016 (Fig. 32, 33).

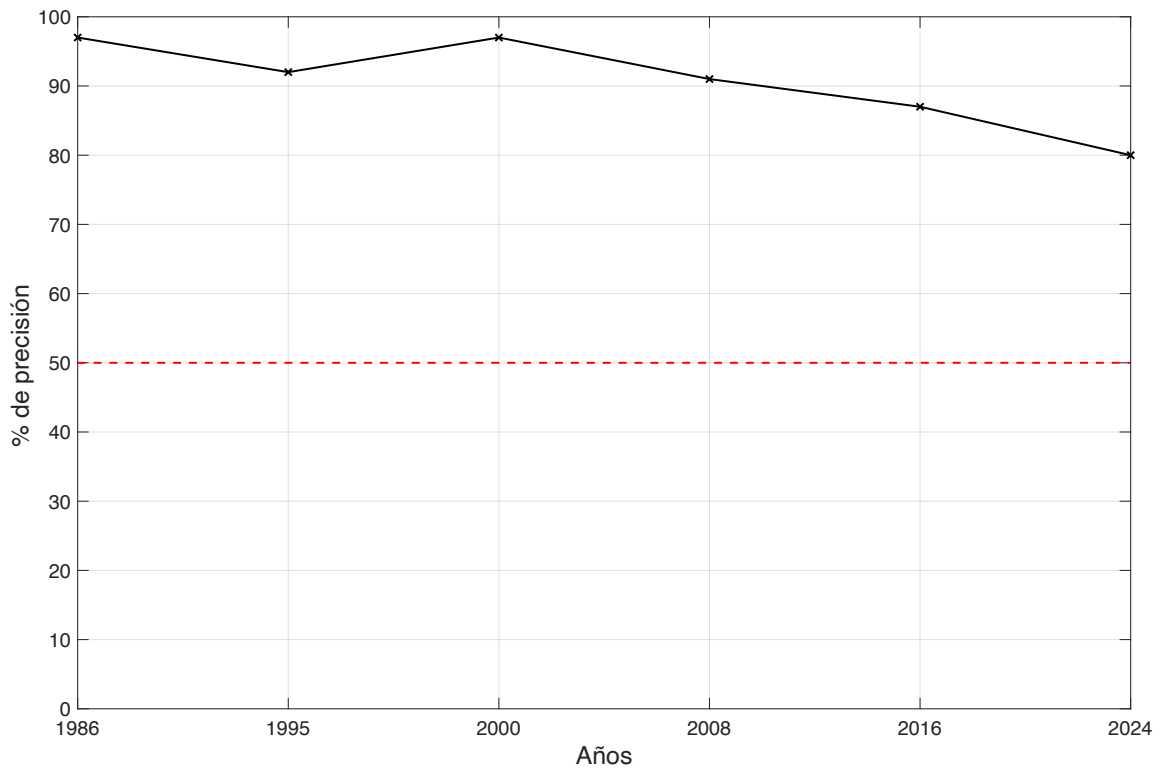


Figura 32. Porcentaje de precisión de cada una de las matrices de confusión de las clasificaciones.

Tabla 1. Errores de omisión (E) y comisión (Ce) para las clasificaciones supervisadas.

Año	1986		1995		2000		2008		2016		2024	
	E	Ce	E	Ce	E	Ce	E	Ce	E	Ce	E	Ce
Cuerpos de agua	19	0.06	6.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0
Manglar	0.4	0.13	23.9	0.98	0.5	2.5	0.0	0.0	0.28	0.14	1.0	0.2
Agricultura activa	13.2	1.47	11.8	0.43	3.3	4.0	22.4	54.9	3.69	2.38	1.4	12
Agricultura inactiva	2.95	6.71	0	5.28	4.7	0.9	0.57	0.95	24.8	59.5	3.4	0.1
Pastizal	7.62	10.1	24.4	0	1.6	3.9	0.39	0	57.3	22.0	0	0
Selva Baja Caducifolia	0.12	5.51	0.51	18.6	5.8	2.5	36.7	11.7	2.86	9.02	0.1	0.3

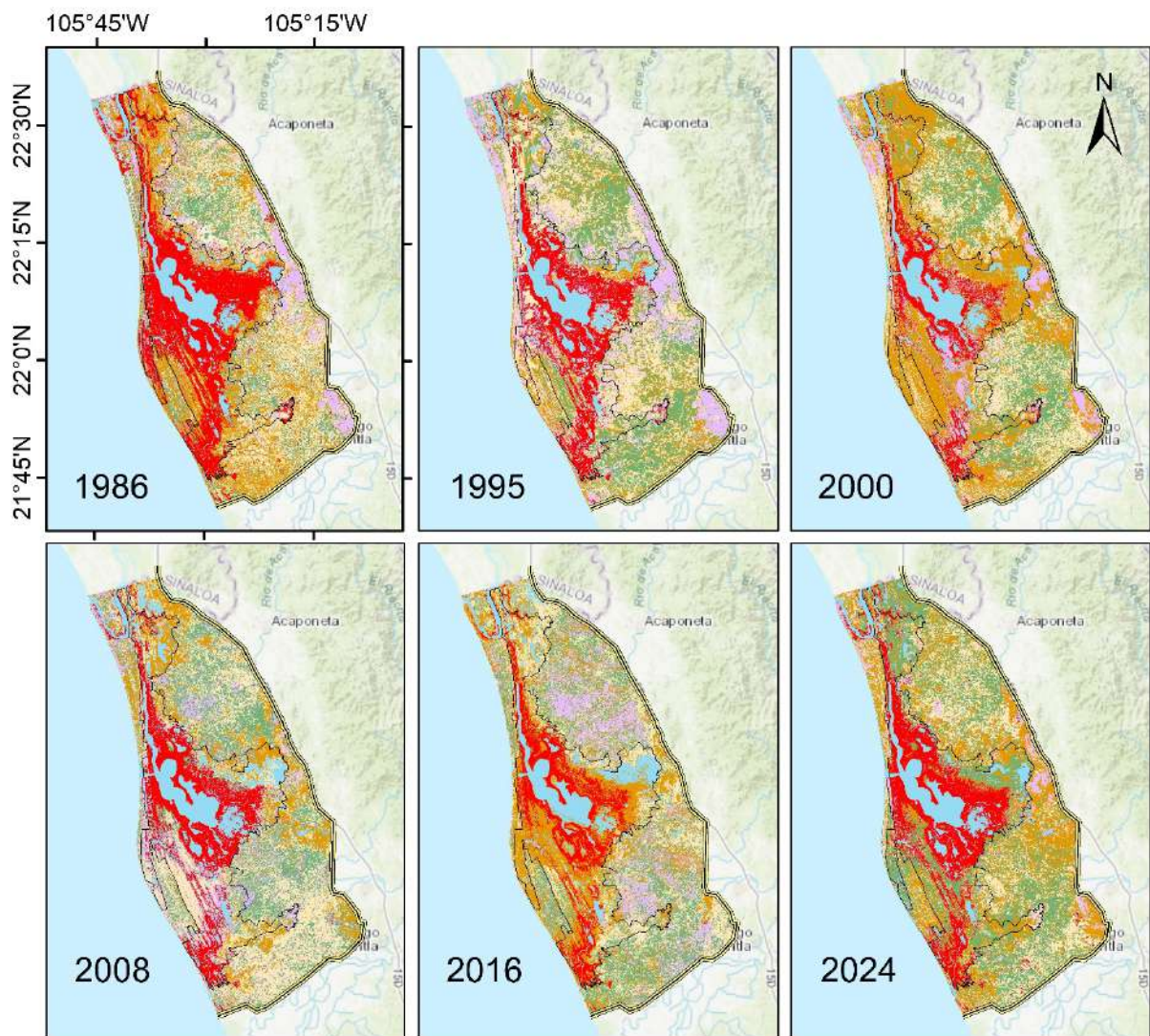


Figura 33. Clasificación supervisada del área de estudio desde los años 1986 hasta el año 2024.

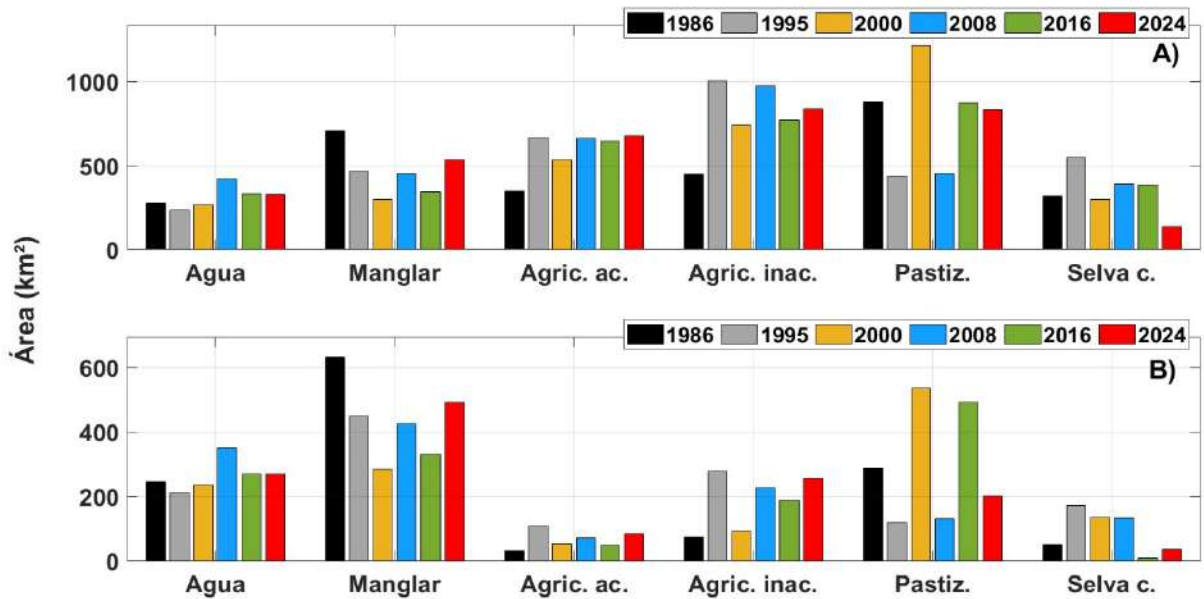


Figura 34. Áreas por clase de las diferentes clasificaciones supervisadas. a) exterior de la ANP, b) Interior de la ANP.

7.7. Validación en campo

En el trabajo de campo se obtuvieron más de 500 puntos para las validaciones de las clasificaciones supervisadas que se reportan en la sección 7.5. En donde se muestran los canales, la costa, los tapos, los manglares y el canal de Cuautla (Tabla 2).

Tabla 2. Visita al Área Natural Protegida durante el mes de abril 2024.



Canal de Cuautla



Costa



Canales



Tapos



Manglar



Manglar



Raíces de los manglares



Canales



Manglares

7.8. Propuesta de zonificación

A partir de los resultados obtenidos del análisis de detección de cambios observado en la figura 30, se calculó cada una de las áreas obtenidas referente a los polígonos que representaron un cambio positivo (aumento) en la cobertura de manglar. Bajo el primer criterio (aumento en la cobertura de manglar) se discriminaron los que no representaron un aumento igual o superior a 1km^2 desde el año 1986 (Fig. 35).

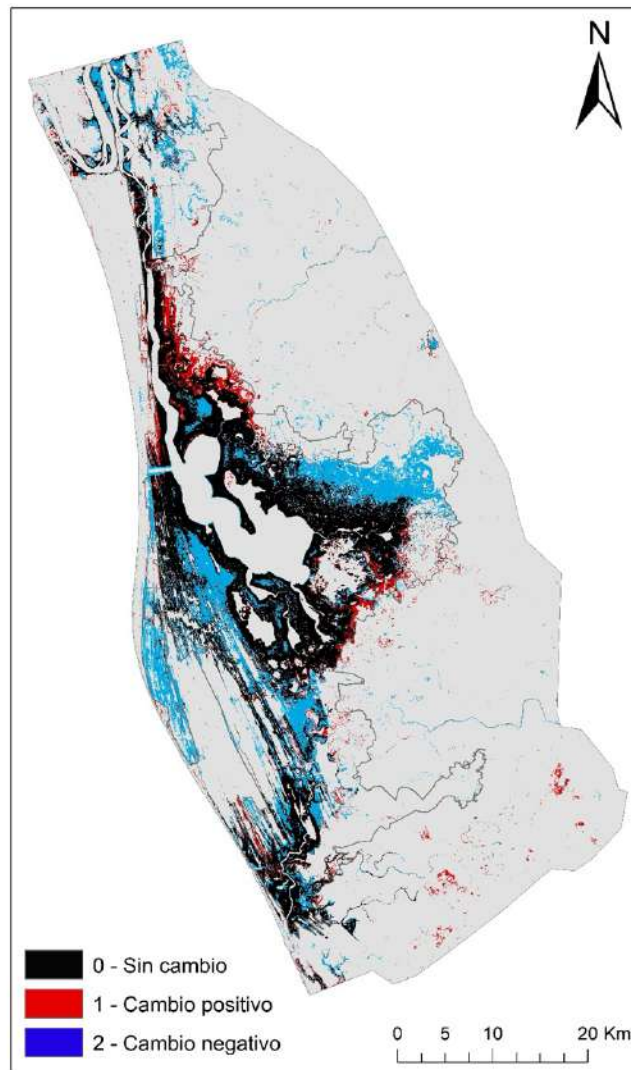
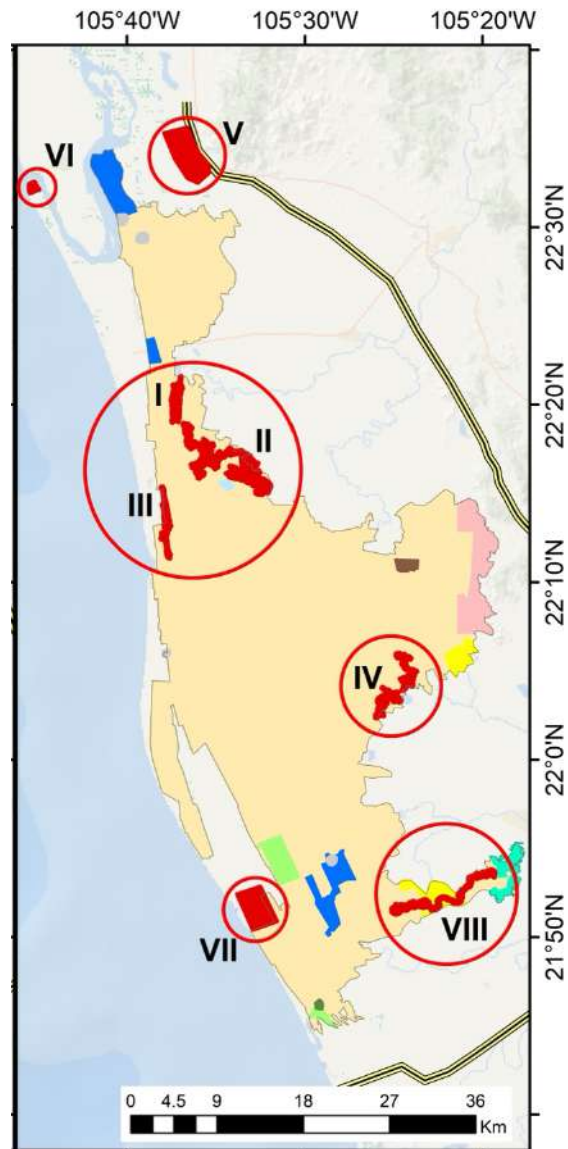


Figura 35. Áreas de cambio a partir de la clasificación supervisada 1986 vs 2024.

En total se definieron cuatro nuevos polígonos (Tabla 3) correspondientes a zona núcleo bajo el criterio de uso restringido mismos que destacaron por su incremento de

la cobertura de manglar, representando un incremento de 15.31 km². El segundo criterio, referente a especies amenazadas o en peligro de extinción, se encontraron tres nuevos polígonos dentro de zona núcleo bajo el criterio de uso restringido, que representan un incremento de 24.14 km² (Tabla 4), estos se caracterizan por ser zona de anidación de especies amenazadas o en peligro de extinción, el primero de ellos ubicado en la zona norte identificado como zona de anidación del chorlo de collar (*Charadrius collaris*), el segundo en el área costera, en la cual se ubica un campamento de anidación de tortuga marina (*Lepidochelys olivacea*) y el tercero en la zona sur en la región de canales se detectaron zonas de anidación de cocodrilo americano (*Crocodylus acutus*) (Fig. 36).



Zona Núcleo				
Subzona de:				
Proteccion SPT(I)			Uso Restringido SURH(I)T(II)	
Uso Restringido SURL(I)		I	Uso Restringido SURU(I)	
Uso Restringido SURM(I)		II	Uso Restringido SURT(I)	
Uso Restringido SURC(I)		III	Uso Restringido SURC(II)	
Uso Restringido SURB(I)		IV		
Zona de Amortiguamiento				
Subzona de:				
Preservación SPPT		VIII	Aprovechamiento Especial SAEFVP(I)	
Uso Tradicional SUTPH			Uso Público SUPR(I)N(II)M(III)	
Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales SASRNRPH(I)PT(II)			Asentamientos Humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV)	
Aprovechamiento Sustentable de los Ecosistemas SASESMZ(I)PT(I)			Recuperación SRLCH	

Figura 36. Polígonos propuestos como actualización ala zonificación actual

Tabla 3. Áreas obtenidas para cada polígono propuesto como zona núcleo con base al incremento de manglar.

Polígono	Latitud (N)	Longitud (O)	Área (km ²)
1. Manglar en expansión (SURL-I)	22.3366°	-105.6202°	2.14
2. Manglar en expansión (SURM-1)	22.2784°	-105.5734°	8.39
3. Manglar en expansión (SURC-I)	22.2223°	-105.6300°	1.59
4. Manglar en expansión (SURB-I)	22.0680°	-105.4144°	3.18

Tabla 4. Áreas obtenidas para cada polígono propuesto como zona núcleo con base a las especies amenazadas o en peligro de extinción.

Polígono	Latitud (N)	Longitud (O)	Área km ²
5. Especies amenazadas (SURU-I)	21.8721°	-105.3720°	13.23
6. Especies amenazadas (SURT-I)	22.5680°	-105.6099°	0.89
7. Especies amenazadas (SURC-II)	21.8605°	-105.5447°	10.01
8. Corredor natural (SPPT)	22.5374°	-105.7547°	4.42

Además, se definió un corredor natural con la intención de conectar el polígono de preservación con la zona de manglar, ya que dentro del mismo se ubican cinco de las seis especies de felinos presentes en marismas nacionales siendo estos, el lince americano (*Lynx Rufus*), yaguarundí (*Herpailurus yagouaroundi*) y ocelote o tigrillo (*Leopardus pardalis*), jaguar (*Panthera onca*) y puma (*Puma concolor*) (Fig. 37).

En total se definieron ocho nuevos polígonos, de los cuales siete se ubican como zona núcleo bajo el criterio de uso restringido, así como un corredor biológico que expande la zona de preservación (Fig. 37, Tabla A1.3).

* Bajo alguna categoría dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010

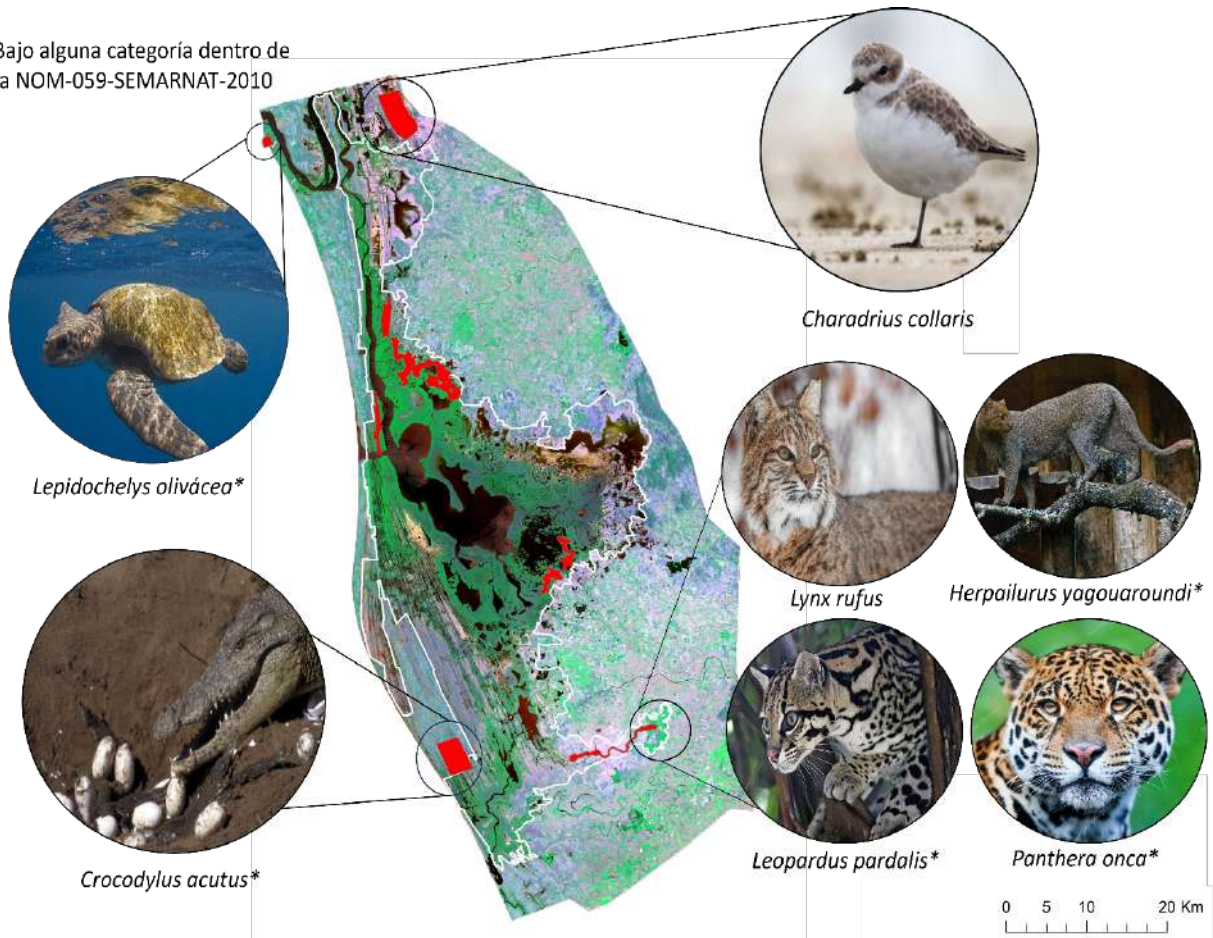


Figura 37. Propuesta de zonificación del ANP Marismas Nacionales.

7.9. Análisis estadístico

Todos los valores obtenidos del cálculo de los índices espectrales (NDVI y NDWI) así como la temperatura superficial de la tierra (LST) fueron normales ($p < 0.05$) (Fig. 38). Para el caso del índice de vegetación (NDVI) se encontró en la prueba de varianza de una vía (ANOVA) que hay diferencias significativas entre los años de estudio, por lo cual se rechazó la hipótesis nula y se concluyó que hay diferencias significativas entre las medias comparadas, con lo cual se puede determinar que existen diferencias en el vigor o concentración de clorofila en la vegetación a lo largo del periodo de estudio (Tabla 5). En cuanto al NDWI y LST, también se encontraron diferencias significativas en la prueba de ANOVA (Tabla 6 y 7).

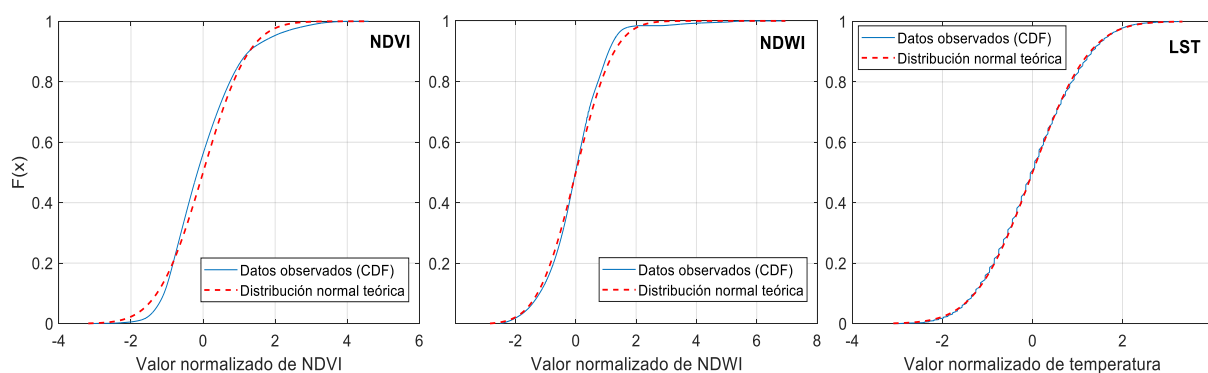


Figura 38. Ajuste de los datos para cada uno de los índices a una distribución normal empírica.

Tabla 5. Prueba de varianza para el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Fuente	SS	G.L.	MS	Fcal	P-valor	F critico
Grupos	132796.5407	5	26559.3081	855830.1908	0.0000	2.2088
Error	644691.2409	20774119	0.0310			

*SS = Suma de cuadrados, G.L. = Grados de libertad, MS = Media cuadrática, Fcal= F calculada

Tabla 6. Prueba de varianza para el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

Fuente	SS	G.L.	MS	Fcal	P-valor	F critico
Grupos	171230.5032	5	34246.1006	1984051.7604	0.0000	2.2088
Error	349453.1630	20245609	0.0173			

*SS = Suma de cuadrados, G.L. = Grados de libertad, MS = Media cuadrática, Fcal= F calculada

Tabla 7. Prueba de varianza para índice de temperatura superficial de la tierra (LST).

Fuente	SS	G.L.	MS	Fcal	P-valor	F critico
Grupos	207729549.5790	5	41545909.9158	1864539.3694	0.0000	2.2088
Error	497497811.2934	22327210	22.2821			

*SS = Suma de cuadrados, G.L. = Grados de libertad, MS = Media cuadrática, Fcal= F calculada

La prueba post hoc de Tukey confirmó que existen diferencias significativas entre los años analizados en cada índice (tabla 8). Esto indica que la variación promedio en el NDVI, NDWI y LST es significativa a lo largo del periodo de estudio. En particular, para el NDVI, los años de 1986 y 2008 presentan la mayor diferencia, evidenciando una disminución en el vigor vegetal. Para el caso del NDWI, la diferencia más pronunciada ocurre entre 1986 y 2024, con un aumento gradual en los cuerpos de agua. Finalmente, para la LST también los mayores cambios ocurren entre 1986 y 2024, reflejando un incremento considerable en la temperatura superficial (Tabla 8).

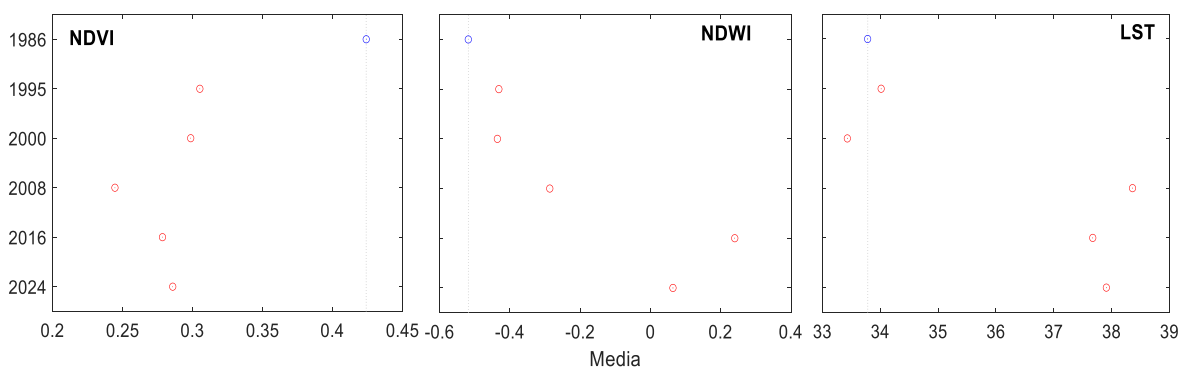


Figura 39. Prueba post-hoc de Tukey entre cada año de estudio para cada uno de los índices.

VIII. DISCUSIÓN

La teledetección se define como la ciencia que permite obtener información sobre la superficie de la tierra sin estar en contacto físico directo con ella. Esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en el estudio de los cambios en la cobertura del suelo (Ozesmi & Bauer, 2002; Kuenzer et al., 2011). Klemas (1973a) fue el pionero en estudiar las Marismas de Delaware, USA, mediante teledetección. Este autor utilizó fotografías aéreas obtenidas con un avión NASA RB-57, con las imágenes capturadas analizó la distribución de la vegetación en los humedales y evaluó su estado de conservación. Sin embargo, este método presentaba limitaciones en términos de cobertura geográfica y frecuencia de adquisición de datos, lo que dificultaba su aplicación para estudios de monitoreo a largo plazo.

En la actualidad se han superado estas limitaciones gracias al uso de los sensores satelitales que en el estudio de humedales los que más destacan son los satélites Landsat (Gup et al., 2017; Mupepi et al., 2024), los cuales se caracterizan por tener un archivo histórico desde la década de los 70's y una resolución espacial de 30 m, lo que ha favorecido su aplicación en estudios de cambio de cobertura vegetal y monitoreo de cuerpos de agua (Avilés-Sacoto & León-Paredes, 2024).

La suma de estas nuevas tecnologías, así como el desarrollo de índices espectrales como el NDVI han fortalecido los estudios en humedales. El NDVI es el principal índice utilizado como indicador de la calidad y densidad de la cobertura vegetal de los manglares (Shrestha et al., 2019). Los valores de NDVI para este tipo de vegetación que se reportan oscilan entre 0.06 a 0.81, valores menores a 0.2 son indicadores de un manglar deteriorado mientras que valores mayores de 0.6 indican un manglar sano y con alta densidad (Tran et al. 2022). En este estudio los valores promedio de NDVI oscilaron entre los 0.23 y 0.42 tanto para el polígono de la ANP como para el polígono exterior. De acuerdo con la clasificación de Chellamani et al. (2014) los manglares con estado de salud óptimo tienen valores de NDVI > 0.6, mientras que manglares con un estado de salud pobre tienen valores menores a 0.4. En Marismas Nacionales los

valores de NDVI en promedio no superaron valores de 0.4, e incluso es menor para algunas regiones e.g. los canales y las zonas donde se practica la acuicultura el estado de salud de los manglares es pobre (Fig. 23 y 24).

Una de las razones del porque el manglar en Marismas Nacionales tiene condición pobre se relaciona posiblemente con las modificaciones hidrológicas, entre las cuales se destaca la boca artificial del canal de Cuautla que en su inicio (1974) tenía un ancho de 100 metros y en la actualidad es más de 1 km (Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit, 2013), este impacto antropogénico ha disminuido los flujos y aporte de agua dulce a las zonas de inundación (canales) lo cual ha tenido un efecto en el reclutamiento de los manglares (Valderrama-Landeros et al., 2020; López-Caloca et al., 2022). Los valores de NDVI son cada vez menores dentro del polígono de la ANP lo cual coincide con Villarreal-Rosas et al. (2022) quienes concluyen que los valores bajos de NDVI en Marismas Nacionales se asocia a sitios con parches de manglar prácticamente muertos.

Si bien el NDVI ha sido ampliamente utilizado para evaluar la condición y dinámica de los manglares, la caracterización de los humedales requiere también del análisis de la disponibilidad hídrica (Aponte-Saravia & Ospina-Noreña, 2019). Un índice que nos aproxima a entender la disponibilidad de agua en las plantas y la disponible superficialmente es el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), el cual es clave para el estudio de los humedales porque permite monitorear la dinámica hidrológica e identificar las áreas de inundación las cuales son importantes para la germinación y reclutamiento de los manglares (Hernández-Guzmán & Ruiz-Luna, 2024). En este estudio, el NDWI indicó que el agua superficial y la humedad en plantas disminuye en los años 1986 y 2008. Sin embargo, en años posteriores (2016 y 2024) aparentemente las áreas con disponibilidad de agua superficial aumentan lo cual estuvo relacionado con el incremento de granjas acuícolas principalmente en la región norte del área de estudio donde existen más de 136 granjas camaronícolas (Villarreal-Rosas et al., 2022). Los resultados obtenidos coinciden con Vázquez (2023) en donde este autor también observo un incremento de los cuerpos de agua durante el periodo

de 2000 a 2017, y concluye que estos aumentos se deben a la degradación del manglar y el cambio de uso de suelo de vegetación natural a la acuicultura. Sin embargo, en el interior del ANP, el NDWI fue estable en valores de 0.25 a 0.30 y alcanzando su valor más alto en 2024 (NDWI = 0.60), lo que indica que las áreas bajo protección han mantenido mejores condiciones de humedad en comparación con el exterior.

El patrón del NDWI que se encontró en este estudio posiblemente esté relacionado con una mayor precipitación pluvial, como se observa en la figura 40, en los años 2000 y 2008 hubo eventos de precipitación que superaron los 50 mm en un mes. Para el caso del año 2024 se observa una disminución significativa, pero esto puede deberse a la falta de datos para este año, mientras que años intermedios, caracterizados por precipitaciones más bajas, coinciden con los valores más bajos observados en los resultados obtenidos de este índice (Fig. 39).

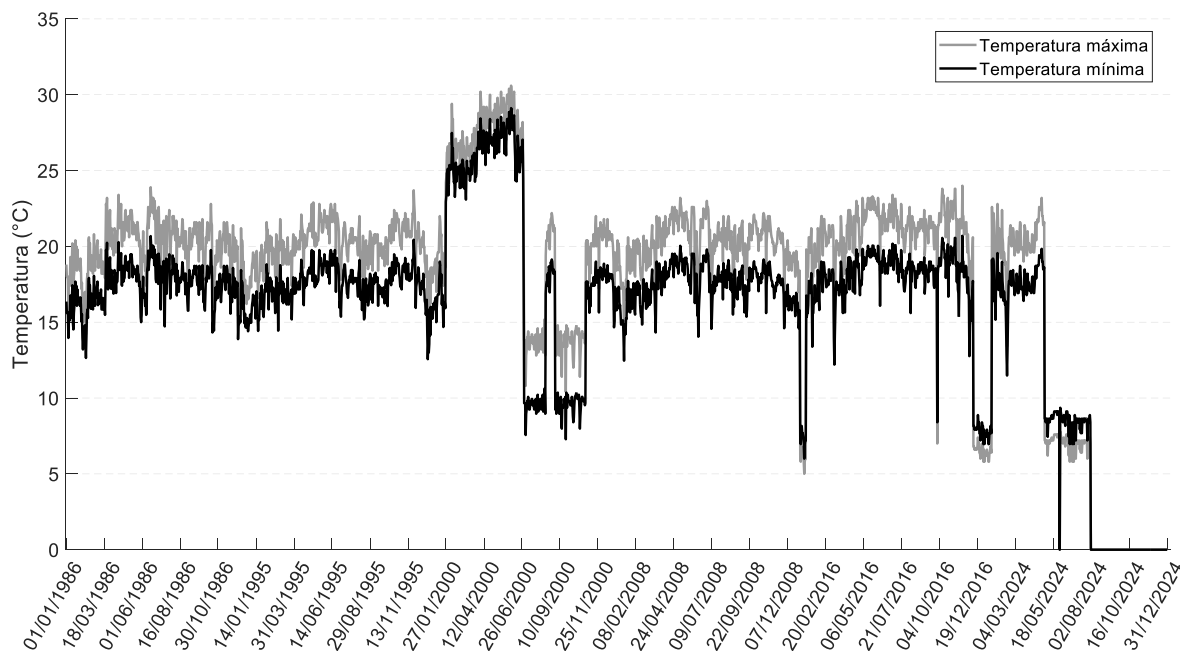


Figura 40. Datos de precipitación en mm obtenidos de estaciones meteorológicas en la región para cada año del periodo de estudio.

Por otro lado, los cambios en la disponibilidad hídrica detectados a través del NDWI están relacionados con la temperatura superficial del suelo (LST). En humedales es fundamental el análisis de LST porque nos permite inferir como el calor influye directamente en procesos biológicos de los organismos acuáticos, e.g, áreas de anidación de aves, crecimiento de peces, etc. Las imágenes de satélite en la región espectral del infrarrojo térmico nos permiten medir la temperatura de la superficie (Horning et al. 2010). La temperatura en los humedales no solo se debe a la cantidad de energía del sol que recibe, sino que está en función de la morfología de la red hidrológica, como lo reportan Torgensen et al., (2001) en su investigación de diferentes humedales en Oregón, ellos utilizaron imágenes térmicas aerotransportadas y encuentran que los factores que más influyen en la temperatura es la topografía, el dosel de los manglares, la velocidad del agua, volumen del agua y profundidad.

En este estudio se encontró que los valores más bajos de LST se localizan en donde el manglar tiene un mayor dosel, por ejemplo, en la parte central de la ANP donde predominan los manglares, los valores de LST se encuentran entre los 20 °C y 30 °C (Fig. 23), lo cual posiblemente produce efectos de enfriamiento local, mientras que las áreas sin manglar se encontraron valores de LST mayores a 40°C. Un patrón similar lo reportan Al-huqail et al. (2024) en Manglares en Arabia Saudita encuentran una correlación inversa significativa entre la densidad de manglares y la temperatura superficial, las áreas con mayor densidad de manglar presentaban temperaturas menores a 20 °C en la laguna Al-Wajh. Sin embargo, en el caso de Marismas Nacionales en la región de los canales los valores de LST que se encontraron para los años 2016 y 2024 siempre fueron por encima de los 40 °C (Fig. 23). Lo anterior puede afectar seriamente a las tasas de reclutamiento de manglar, como lo describe Cobacho et al. (2024), donde las temperaturas mayores a 30 °C impactan directamente a las plántulas de manglar negro (*Avicennia germinans*), al reducir el crecimiento de la raíz. Este tipo de estudios en donde se determine el efecto de la temperatura en el desarrollo de las plántulas no se ha realizado hasta al momento para ninguna especie de manglar en Marismas Nacionales.

Al comparar los valores de LST con los datos de temperatura ambiental registrados en las estaciones meteorológicas locales, no se observó una tendencia clara de incremento en la temperatura máxima reportada por CONAGUA a lo largo del periodo de estudio (Fig. 41). Si bien estudios previos han demostrado una correlación entre la temperatura superficial y la del aire en ecosistemas expuestos a cambios en la humedad del suelo y la cobertura vegetal (Sobrino et al., 2011). En contraste, los valores de LST que se obtuvieron para Marismas Nacionales muestra que se ha incrementado hasta 8 °C en algunos sitios lo que sugiere que este cambio podría estar influenciado por otros factores, como la reducción de cobertura vegetal observada en el NDVI así como alteraciones en la humedad del suelo. Por lo tanto, la variabilidad espacial del LST también puede estar influenciada por factores como la proximidad a cuerpos de agua, la densidad de vegetación y la intensidad de las actividades humanas.

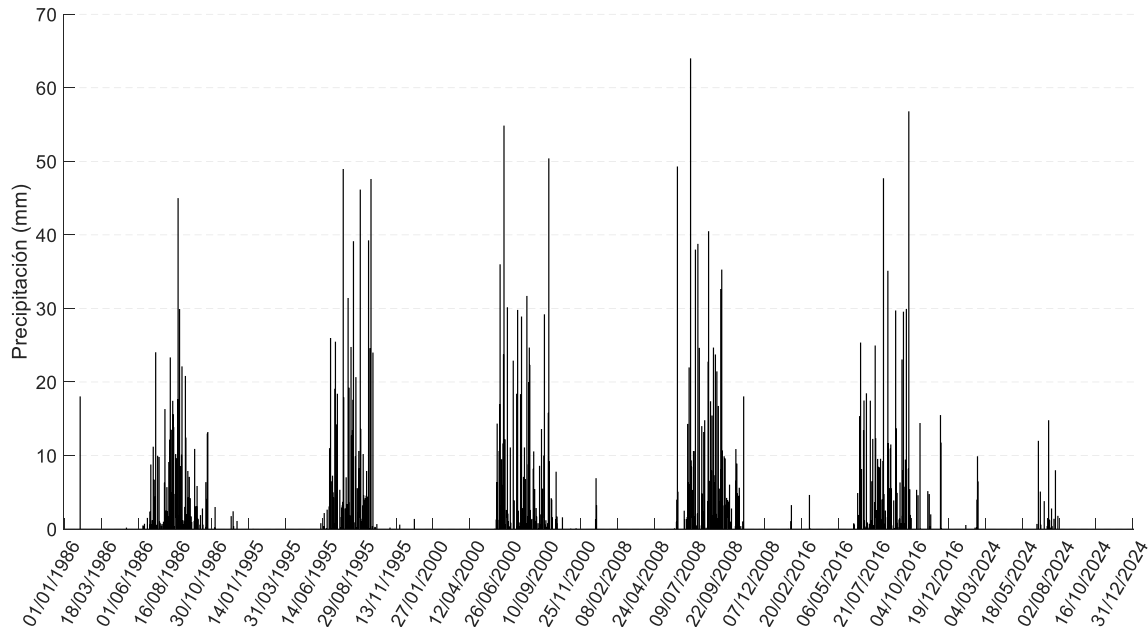


Figura 41. Comportamiento de la temperatura ambiental reportado por CONAGUA para cada año que compone el periodo de estudio.

En los análisis de los cambios de uso de suelo para Marismas Nacionales también se encontraron variaciones temporales que indican la disminución de la cobertura del

manglar en donde además se encontró una fragmentación de este como también lo reportan Ramírez-García et al. (1998), Valderrama-Landeros, (2020), Quintero-Morales et al. (2021) en donde las actividades de camaronicultura y cultivo de ostión son las que más están modificando tanto la hidrología como la cobertura del manglar.

A nivel mundial se ha perdido el 35 % de la cobertura de manglar desde 1980 (Curnick et al. 2019). En este estudio se encontró una pérdida del 22.30 % en los últimos 38 años, mientras Quintero-Morales et al. (2021) reportan una pérdida para el año 2015 de 23.86 %. Ramírez-García et al. (1998) hasta el año de 1993 mencionan una reducción del 32 % del manglar únicamente para la desembocadura del río Santiago. Los reportes anteriores contrastan con las series de INEGI que de acuerdo con los archivos vectoriales el manglar aumento de 656 km² en la serie I (1980) a 629 km² en la serie VII (2018). Para el año 2024 la parte este del polígono de Marismas Nacionales se puede observar zonas en donde aparentemente el manglar se recupera, estas áreas coinciden con programas de reforestación y recuperación del manglar promovidos por la CONANP y la CONAFOR a partir del año 2015.

De acuerdo con Quintero-Morales et al. (2021) en Marismas Nacionales existían 800 km² de manglar en 1981, una superficie similar se reporta en la serie I uso de suelo y vegetación de INEGI con 656 km² para el año 1986, mientras que en este estudio se encontraron 631 km² para el mismo año. Las diferencias se deben a los métodos para el mapeo de manglar, por ejemplo, INEGI utiliza cartas impresas digitalizadas escala 1:250,000 y fotointerpretación aérea, mientras que en esta tesis se utilizan algoritmos de clasificación supervisada y escalas de representación menores 1:50,000 lo cual permite una mayor detección de manglar.

Para los cuerpos de agua paso algo similar al manglar, los resultados indican un aumento de esta clase como lo reportan Quintero-Morales et al. (2021) en donde se observa un aumento en la superficie, los autores mencionados reportan 461 km² para 1981 y para el 2015 ya habían subido un 16.09% más. En este estudio el aumento de los cuerpos de agua fue del 4.8% para el 2024. En las series de INEGI también se

encuentran aumentos, pero la detección de cuerpos de agua es muy baja (194 km²) y una vez más se observa el efecto de la escala de representación al registrar menos cuerpos de agua.

En cuanto a la agricultura activa se encontró un patrón de aumento de superficie que es semejante entre a serie II de INEGI (1995 = 1140 km²) y lo encontrado en este estudio para el año 1995 con 1267 km². Sin embargo, en este estudio se encontró una mayor superficie de agricultura activa para el año 2015 con 1,133.83 km² en comparación a otros estudios (Quintero-Morales et al., 2021), estas diferencias posiblemente se relacionen con las variaciones en la siembra y cosecha del Sorgo, cultivo que predomina en Marismas Nacionales. Los aumentos tanto de la agricultura activa como no activa entre los años de 1986 y 1995, posiblemente se relacionan con la reforma a la constitución de 1992 en donde el artículo 27 se modifica y se permite la venta de suelo ejidal y comunal a particulares y a partir de ese año varias empresas dedicadas a la producción de sorgo, maíz y frijol comienzan a incrementar la extensión agrícola. Para el caso el pastizal se observan incrementos hasta de un 200% para los años 2000 y 2016. Sin embargo, es posible que varias superficies se estén confundiendo con clases agrícolas, debido a que los cultivos de sorgo espectralmente son muy similares a los pastizales (Chuvienco, 2019) y mediante el algoritmo de máxima verosimilitud que se utilizó en esta tesis no es posible separarlos.

La cobertura de la selva baja caducifolia que se clasificó en este estudio tiene una superficie en 1986 de 433.82 km², lo cual es ligeramente menor a los 458.22 km² reportados por Quintero-Morales et al. (2021) en 1981, esto indica una pérdida en 5 años de 24.42 km². En general la cobertura de la selva va disminuyendo, pero de los años 2008 al 2016 se perdió más de la mitad quedando solo 139.08 km². La causa principal de la pérdida de la selva baja caducifolia se debió a que se localiza fuera del ANP y por lo tanto sus superficies han pasado a ser tierras de cultivo.

A pesar de que el plan de manejo para la reserva de la Biosfera Marismas Nacionales contempla las problemáticas ambientales reportadas en este estudio, desde el año 2013 no se ha actualizado, lo cual contrasta con la política de actualización y modificación cada cinco años que promueve la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. El no actualizar el programa de manejo deja vulnerables áreas que por sus características ecológicas son idóneas y objetos de conservación, por ejemplo, las áreas de anidación de tortugas marinas y cocodrilos en Marismas Nacionales no están incluidas en la política más restringida de manejo que es zona núcleo.

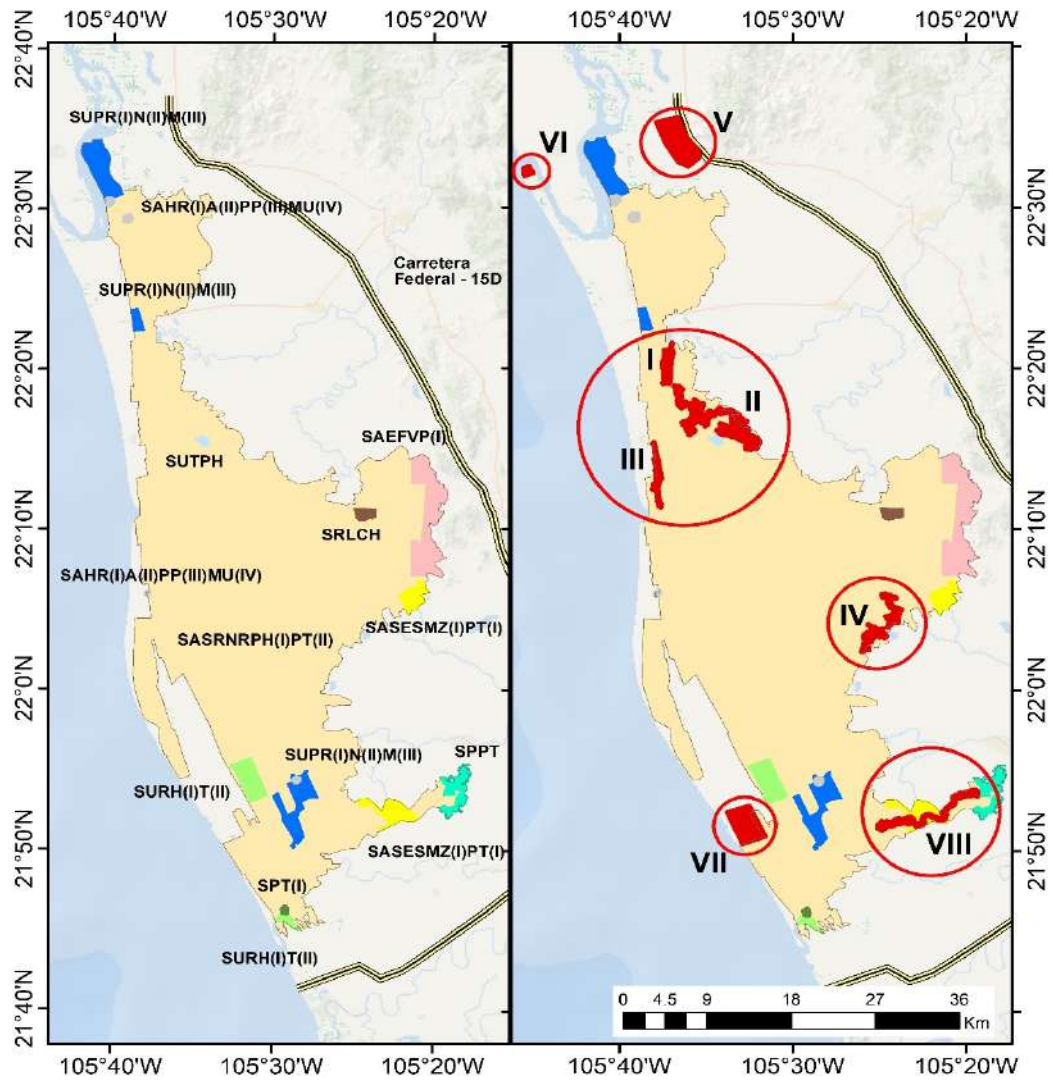
Finalmente, la actualización de la zonificación de Marismas Nacionales resultó en la incorporación de ocho nuevos polígonos, de los cuales siete fueron clasificados como zona núcleo debido a su importancia ecológica, mientras que el octavo corresponde a un corredor natural estratégico para mantener la conectividad ecológica, representado así un incremento de 43.884 km² respecto a la zonificación actual (Fig. 42, Tabla A1.3).

Con la nueva propuesta de zonificación de este estudio se identificaron áreas de mayor vulnerabilidad, las cuales coinciden con las prioridades para la restauración de manglares en Marismas Nacionales propuestas por las fundaciones WWF, The Nature Conservancy, Griffith University y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Villarreal-Rosas et al., 2022). Esto refuerza la validez de los resultados obtenidos y resalta la utilidad de la teledetección como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en materia de manejo ambiental.

Uno de los principales beneficios de esta nueva zonificación es permitir focalizar los esfuerzos de conservación en los polígonos donde el manglar ha mostrado una recuperación notable y zonas que requieren restauración o vigilancia intensiva. La selección de estas áreas con un incremento superior a 100 hectáreas de cobertura de manglar tiene una base técnica, como lo indica Rudianto et al. (2019) quienes señalan que esta superficie mínima favorece la conectividad ecológica, mejora la resiliencia del ecosistema y potencia la provisión de servicios ecosistémicos e.g. la captura de carbono, la protección costera y el mantenimiento de la biodiversidad.

En cuanto a las características ambientales de los polígonos seleccionados como nuevos núcleos de conservación para el manglar, se observaron valores del NDVI > 0.38, lo cual indica una condición de salud del manglar moderada (Chellamani et al., 2014). Asimismo, estos polígonos muestran valores del NDWI > 0.20, lo que sugiere una buena disponibilidad hídrica. En términos de la temperatura superficial de la tierra (LST), estas zonas mantienen valores inferiores a los 28 °C, esto debido a una mayor cobertura vegetal y, por tanto, a una menor exposición al calentamiento por cambio de uso de suelo, permitiendo así el incremento de las tasas de reclutamiento del manglar, especialmente en especies como el manglar negro (*Avicennia germinans*) como lo menciona Al-huqail et al., (2024). Estos tres indicadores permiten inferir que los polígonos seleccionados presentan condiciones favorables para el desarrollo y conservación del ecosistema de manglar.

Otro aspecto relevante es la propuesta de un corredor biológico, la cual no es nueva, ya que desde el año 2022, la CONANP ha realizado esfuerzos para conectar la selva baja caducifolia que actualmente está fuera de los polígonos de conservación con la zona de manglares. La incorporación del corredor natural de 4.42 km² que se propone en esta tesis generaría un gradiente ecológico de alto valor para la fauna silvestre, en particular para especies de felinos. En esta región se han reportado cinco de las seis especies de felinos presentes en México, entre ellas el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*) y el puma (*Puma concolor*), todas clasificadas como amenazadas bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010. Estas áreas también se caracterizan por tener bajo impacto antropogénico, lo que favorece su funcionalidad como corredor ecológico.



Zona Núcleo				
Subzona de:				
Proteccion SPT(I)			Uso Restringido SURH(I)T(II)	
Uso Restringido SURL(I)		I	Uso Restringido SURU(I)	
Uso Restringido SURM(I)		II	Uso Restringido SURT(I)	
Uso Restringido SURC(I)		III	Uso Restringido SURC(II)	
Uso Restringido SURB(I)		IV		
Zona de Amortiguamiento				
Subzona de:				
Preservación SPPT		VIII	Aprovechamiento Especial SAFVP(I)	
Uso Tradicional SUTPH			Uso Público SUPR(I)N(II)M(III)	
Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales SASRNRPH(i)PT(II)			Asentamientos Humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV)	
Aprovechamiento Sustentable de los Ecosistemas SASESMZ(I)PT(I)			Recuperación SRLCH	

Figura 42. Mapa comparativo entre los polígonos dentro de la zonificación actual y los propuestos como actualización.

IX. CONCLUSIONES

- A pesar de la importancia nacional e internacional de la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales y los servicios ecosistémicos que brinda, en los últimos 38 años la cobertura de manglar disminuyó 141 km² (22%), transformándose principalmente en agricultura, tanto activa como inactiva, cuerpos de agua y pastizales. Mientras que comparando la información de las series de INEGI el manglar solo disminuyó 27 km².
- El aumento del 65% en las superficies destinadas a la agricultura activa evidencio la presión antrópica creciente sobre el ANP, siendo esta una de las principales actividades causantes de deterioro ambiental de la zona.
- Se encontró que la temperatura superficial de la tierra, dentro del ANP es más fría que en su periferia, hasta por ~7 °C.
- Los Modelos Digitales de Elevación obtenidos a través del RADAR-ALOS con resolución de 12 metros permitió obtener una red hídrica del área de estudio con seis ordenes de ríos. Los ríos de primer orden fueron de 3644 km, los del segundo orden 1760 km, y los del tercer orden de 890 km, mientras que los de cuarto, quinto y sexto orden fueron inferiores a los 440 km.
- En la visita al área de estudio, se notó un uso intenso de agricultura, principalmente de sorgo, mango y papaya mismas que requieren gran cantidad de agua. De igual manera se observó ganadería semiestabulada en gran parte del ANP.
- A partir de los resultados obtenidos se propuso una nueva zonificación del área, identificando siete nuevos polígonos prioritarios como zonas núcleo por su relevancia ecológica, y su corredor natural para la conectividad entre manglar y selva, contribuyendo a mejorar las estrategias de conservación y manejo adaptativo del ANP.

X. RECOMENDACIONES Y SUGERENCIAS

- Se recomienda que la zonificación propuesta sea considerada como una actualización dentro del Programa de Manejo de la Reserva de la Biósfera Marismas Nacionales, integrando los polígonos identificados como zonas núcleo prioritarias.
- Se sugiere establecer un sistema de monitoreo permanente utilizando imágenes de satélite con alta resolución espacial para la detección temprana de cambios en la cobertura de suelo.
- Es fundamental implementar programas de restauración ecológica en las zonas de manglar afectadas, especialmente en los sitios donde la pérdida fue más severa, involucrando a las comunidades locales fomentando la educación ambiental.
- Finalmente, se recomienda fortalecer la vigilancia y aplicación de la normativa vigente dentro del polígono del ANP, con énfasis en las zonas que muestran mayor presión antropogénica.

XI. BIBLIOGRAFIA CITADA

Abarca, F.J. & M. Cervantes. 1996. Manual para el manejo y conservación de los humedales de México. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Ecología; U.S. Fish and Wildlife Service; Arizona Game and Fish Department; Wetlands International the Americas-Program. México, 20 p.

Adame, M.F., C.J. Brown, M. Bejarano, J.A. Herrera-Silveira, P. Ezcurra, J. Boone-Kauffman & R. Birdsey. 2018. The undervalued contribution of mangrove protection in Mexico to carbon emission targets. *Conservation Letters*, 11(4):e12445.

Adams, J.B. & A. Rajkaran. 2020. Changes in mangroves at their southernmost African distribution limit. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 247:106862.

Al-huqail, A.A., Z. Islam & H.F. Al-Harbi. 2024. Mangroves trend and their impact on surface temperature in Al-Wajh Lagoon: a study aligned with Saudi Arabia's vision 2030. *Frontiers in Environmental Science*, 12:1439425.

Alongi, D.M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3):331-349.

Aponte-Saravia, J. & J.E. Ospina-Noreña. 2019. Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Revista de teledetección*, (53):59-72.

Arifanti, V.B., J.B. Kauffman, D. Hadriyanto, D. Murdiyarso & R. Diana. 2019. Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: The case of the Mahakam Delta, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 432:17-29.

Arellano, M.F. & J.L. Andrade. 2016. Aspiradoras verdes: captura de carbono en bosques tropicales. *Biodiversistas*, 125:1-7.

Aschbacher, J., R. Ofren, J.P. Delsol, T.B. Suselo, S. Vibulsresth & T. Charrupat. 1995. An integrated comparative approach to mangrove vegetation mapping using advanced remote sensing and GIS technologies: preliminary results. *Hydrobiologia*, 295(1):285-294.

Astrálaga, M. 2006. La Convención Ramsar y los ecosistemas de manglar. Secretaría de la Convención Ramsar. Gland, Suiza, 6 p.

Avilés-Sacoto, E. & Z. León-Paredes. 2024. Análisis de la variabilidad en la cobertura de manglares en las islas galápagos a través de un análisis multitemporal con imágenes satelitales landsat 7 y landsat 8. *Investigation*, 1(21).

Barducci, A., D. Guzzi, P. Marcoionni & I. Pippi. 2009. Aerospace wetland monitoring by hyperspectral imaging sensors: A case study in the coastal zone of San Rossore Natural Park. *Journal of Environmental Management*, 90(7):2278-2286.

Berlanga-Robles, C.A. & A. Ruiz-Luna. 2007. Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Universidad y Ciencia*, 23(1):29-46.

Blasco, F., T. Gauquelin, M. Rasolofoharinoro, J. Denis, M. Aizpuru & V. Caldairou. 1998. Recent advances in mangrove studies using remote sensing data. *Marine and Freshwater Research*, 49(4):287-296.

Carabias, J., J. Sarukhán, J. De la Maza & C. Galindo. 2010. Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México, 240 p.

Cervantes-Abrego, M. 2000. Marismas Nacionales: Áreas de importancia para la conservación de aves en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México, 62 p.

Chander, G., B.L. Markham & D.L. Helder. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5):893–903.

Chávez, R.O., J.G.P.W. Clevers, M. Decuyper, S. De Bruin & M. Herold. 2016. 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can *Prosopis tamarugo* trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)?. *Journal of Arid Environments*, 124:292-303.

Chellamani, P., C.P. Singh & S. Panigrahy. 2014. Assessment of the health status of Indian mangrove ecosystems using multi temporal remote sensing data. *Trop. Ecol*, 55(2):245-253.

Chuvieco, E. 2019. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 4th edition. Digital Reasons. España, 16 p.

Cobacho, S.P., S.A. Janssen, M.A. Brekelmans, I.A. van de Leemput, m. Holmgren & M.J. Christianen. 2024. High temperature and eutrophication alter biomass allocation of black mangrove (*Avicennia germinans* L.) seedlings. *Marine Environmental Research*, 193:106291.

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2013. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales. CONANP. Nayarit, 204 p.

Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1):35-46.

Curnick, D.J., N. Pettorelli, A.A. Amir, T. Balke, E.B. Barbier, S. Crooks, ... & S.Y. Lee. 2019. The value of small mangrove patches. *Science*, 363(6424):239-239.

Cowardin, L.M., V. Carter, F.C. Golet & E.T. LaRoe. 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. Washington, D.C. Fish and Wildlife Service; US Department of the Interior, 91 p.

Davidson, N.C. 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10):934-941.

De La Mota-Escobar, A. 1940. Descripción geográfica de los reinos de Nueva Galicia, Nueva Vizcaya y Nuevo León: por Alonso de La Mota y Escobar. 2da edición. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Cabañas, México, 80 p.

De la Lanza Espino, G., N. Sánchez Santillán, V. Sorani & J.L. Bojórquez Tapia. 1996. Características geológicas, hidrológicas y del manglar en la planicie costera de Nayarit, México. *Investigaciones Geográficas*, (32):33-54.

De la Lanza Espino, G. & S. Hernández-Pulido. 2017. Natural and induced space/time environmental changes in the Teacapán-Agua Brava Lagoon System, NW Mexico. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*, 5(6):183-191.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 78 p.

Donato, D.C., J.B. Kauffman, D. Murdiyarso, S. Kurnianto, M. Stidham & M. Kanninen. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5):293-297.

Dutrieux, L.P., J. Verbesselt, L. Kooistra & M. Herold. 2015. Monitoring forest cover loss using multiple data streams, a case study of a tropical dry forest in Bolivia. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107:112-125.

Elachi, C. & J.J. Van Zyl. 2021. Introduction to the physics and techniques of remote sensing. 3rd edition. John Wiley & Sons. Pasadena, California, 534 p.

Ezcurra, E., E. Barrios, P. Ezcurra, A. Ezcurra, S. Vanderplank, O. Vidal & O. Aburto-Oropeza. 2019. A natural experiment reveals the impact of hydroelectric dams on the estuaries of tropical rivers. *Science Advances*, 5(3):eaau9875.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal. FAO. Rome, Italy, 381 p.

Fickas, K.C., W.B. Cohen & Z. Yang. 2016. Landsat-based monitoring of annual wetland change in the Willamette Valley of Oregon, USA from 1972 to 2012. *Wetlands Ecology and Management*, 24:73-92.

Gardner, R.C. & C. Finlayson. 2018. Global wetland outlook: state of the world's wetlands and their services to people. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland, 89 p.

Giri, C., Z. Zhu, L.L. Tieszen, A. Singh, S. Gillette & J.A. Kelmelis. 2008. Mangrove forest distributions and dynamics (1975–2005) of the tsunami-affected region of Asia. *Journal of Biogeography*, 35(3):519-528.

Green, E.P., P.J. Mumby, A.J. Edwards, C.D. Clark & A.C. Ellis. 1998. The assessment of mangrove areas using high resolution multispectral airborne imagery. *Journal of Coastal Research*, 14(2):433-443.

Gup, M., J. Li, C. Sheng, J. Xu & L. Wu. 2017. A review of wetland remote sensing. *Sensors*, 17(4):777.

Hernández-Guzmán, R., & A. Ruiz-Luna. 2024. Combining multisensor images and social network data to assess the area flooded by a hurricane event. *PeerJ*, 12:e17319.

Horning, N., J.A. Robinson, E.J. Sterling, W. Turner & S. Spector. 2010. Remote sensing for ecology and conservation: a handbook of techniques. Oxford University Press. New York, EE.UU., 467 p.

Jensen, J.R. 2005. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 3rd edition, Prentice Hall. Upper Saddle River, EE.UU., 656 p.

Jiménez-Jiménez, M.L. 2023. Temperatura superficial de la arena en áreas de anidación de tortugas marinas mediante teledetección. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC. Baja California Sur, México, 90 p.

Jones, H.G. & R.A. Vaughan. 2010. Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications. University of Oxford. New York, EE.UU., 352 p.

Kauffman, J.B. & D.C. Donato. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. Working Paper 86. CIFOR, Bogor, Indonesia, 50 p.

Klemas, V., F.C. Daiber, D.S. Barlett, O.W. Crichton & A.O. Fornes. 1973a. The Mapping of Delaware's Coastal Marshes. *Coastal Vegetation of Delaware*.

Klemas, V., F.C. Daiber, D.S. Barlett, O.W. Crichton & A.O. Fornes. 1973b. Application of automated multispectral analysis to Delaware's coastal vegetation mapping (No. NASA-CR-130355).

Kuenzer, C., A. Bluemel, S. Gebhardt, T.V. Quoc & S. Dech. 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5):878-928.

Lagomasino, D., T. Fatoyinbo, E. Castañeda-Moya, B.D. Cook, P.M. Montesano, C.S. Neigh, ... & D.C. Morton. 2021. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in southwest Florida following Hurricane Irma. *Nature Communications*, 12(1):4003.

Lithgow, D., G. de la Lanza & R. Silva. 2019. Ecosystem-Based Management strategies to improve aquaculture in developing countries: Case study of Marismas Nacionales. *Ecological Engineering*, 130:296-305.

López-Caloca, A.A., A. Mosivais-Huertero, & J. López-Amaya. 2022. Sentinel-1 observation for shoreline delineation applied to Mexico's Coast. *Geocarto International*, 37(27):16462-16491.

Lovelock, C.E. 2008. Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests. *Ecosystems*, 11:342-354.

Lovelock, C.E., I.C. Feller, R. Reef, S. Hickey & M.C. Ball. 2017. Mangrove dieback during fluctuating sea levels. *Scientific Reports*, 7(1):1680.

Malakar, N.K., G.C. Hulley, S.J. Hook, K. Laraby, M. Cook & J.R. Schott. 2018. An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: Methodology and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10):5717-5735.

Manson, F.J., N.R. Loneragan, G.A. Skilleter & S.R. Phinn. 2005. An evaluation of the evidence for linkages between mangroves and fisheries: a synthesis of the literature and identification of research directions. En: *Oceanography and marine biology*, R.N.

Gibson, R.J.A. Atkinson & J.D. Gordon. Volume 43. CRC press, New York, EE.UU., 493-524 p.

McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7):1425-1432.

Mitsch, W.J. & J.G. Gosselink. 2015. Wetlands. 5th edition. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, p. 37.

Mupepi, O., T. Marambanyika, M. M. Matsa & T. Dube. 2024. A systematic review on remote sensing of wetland environments. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 79(1):67-85.

Nepita-Villanueva, M.R., C.A. Berlanga-Robles, A. Ruiz-Luna & J.H. Morales Barcenas. 2019. Spatio-temporal mangrove canopy variation (2001–2016) assessed using the MODIS enhanced vegetation index (EVI). *Journal of Coastal Conservation*, 23:589-597.

Olofsson, P., G.M. Foody, S.V. Stehman & C.E. Woodcock. 2013. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*, 129:122-131.

Ozesmi, S.L. & M.E. Bauer. 2002. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and management*, 10:381-402.

Pastor-Guzman, J., P.M. Atkinson, J. Dash & R. Rioja-Nieto. 2015. Spatiotemporal variation in mangrove chlorophyll concentration using Landsat 8. *Remote Sensing*, 7(11):14530-14558.

Perea-Ardila, M.A. & P.J. Murillo-Sandoval. 2024. Comparación de índices de vegetación basados en imágenes satelitales para la identificación de bosques de manglar en Colombia. *Madera y bosques*, 30(4): e3042600.

Pettorelli, N., J.O. Vik, A. Mysterud, J.M. Gaillard, C.J. Tucker & N.C. Stenseth. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9):503-510.

Quintero-Morales, A., W. Plata-Rocha, V. Olimón-Andalon, S. Monjardín-Armenta & X. Nemiga-Antonio. 2021. Dynamics of changes in land use and estimation of CO₂ in mangroves in the Marismas Nacionales area, Mexico. *Ciencias marinas*, 47(2):105-125

RAMSAR (Secretariat of the Convention on Wetlands). 2021. Global Wetland Outlook: Special Edition 2021. Secretariat of the Convention on Wetlands, Gland, Switzerland, 56 p.

RAMSAR (Secretaría de la Convención de Ramsar). 2013. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1991). 6ta edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza, 120 p.

Ramírez-García, P., J. López-Blanco & D. Ocaña. 1998. Mangrove vegetation assessment in the Santiago River Mouth, Mexico, by means of supervised classification using Landsat TM imagery. *Forest Ecology and Management*, 105(1-3):217-229.

Ramsey, E.W. & J.R. Jensen. 1996. Remote sensing of mangrove wetlands: Relating canopy spectra to site-specific data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(8):939-948.

Rodríguez-Zúñiga, M.T., C. Troche-Souza, A.D. Vázquez-Lule, J.D. Márquez-Mendoza, B. Vázquez-Balderas & L. Valderrama-Landeros. 2013. Manglares de

México/Extensión, distribución y monitoreo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México, 24 p.

Rubio-Cisneros, N. & O. Aburto-Oropeza. 2013. Marismas Nacionales: su subsistencia en el tiempo. *Biodiversitas*, 108:1-6.

Rudianto, R., N. Nurdiana & A. Isdianto. 2019. Trends and challenges of mangrove restoration management -A lessons from Labuhan Village, Indonesia. *Ecology, Environment and Conservation*. 25:938-946.

Sasmito, S.D., M. Sillanpää, M.A. Hayes, S. Bachri, M.F. Saragi-Sasmito, F. Sidik, ... & D. Murdiyarso. 2020. Mangrove blue carbon stocks and dynamics are controlled by hydrogeomorphic settings and land-use change. *Global Change Biology*, 26(5):3028-3039.

Seager, S., E.L. Turner, J. Schafer & E.B. Ford. 2005. Vegetation's red edge: a possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants. *Astrobiology*, 5(3):372-390.

Shenkel, J.R. & B. Bell. 1974. Quantitative analysis and population estimates of the shell mounds of the Marismas Nacionales, West Mexico. En: B. Bell, The Archaeology of West México. West Mexican Society for Advanced Study. Jalisco, Mexico, 51-56 p.

Shrestha, S., I. Miranda, A. Kumar, M.L.E. Pardo, S. Dahal, T. Rashid, ... & D.R. Mishra. 2019. Identifying and forecasting potential biophysical risk areas within a tropical mangrove ecosystem using multi-sensor data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74:281-294.

Shreve, R.L. 1966. Statistical law of stream numbers. *The Journal of Geology*, 74(1):17-37.

Silva-López, G., M.G. Ruiz-Gómez & J.A. Gómez-Díaz. 2023. Dinámica de la cobertura del manglar en el municipio de Alvarado, Veracruz, México usando una serie de tiempo larga. *Botanical Sciences*, 101(2):358-373.

Sippo, J.Z. 2019a. Causes and consequences of a massive mangrove dieback event in the Gulf of Carpentaria, Australia. Master's thesis. Southern Cross University. Australia, 226 p.

Sippo, J.Z., D.T. Maher, K.G. Schulz, C.J. Sanders, A. McMahon, J. Tucker & I.R. Santos. 2019b. Carbon outwelling across the shelf following a massive mangrove dieback in Australia: Insights from radium isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 253:142-158.

Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6):913-920.

Sobrino, J.A., G. Soria, J.C. Jiménez-Muñoz, J. Amorós, J. Bustamante & R.D. Delgado. 2011. Teledetección térmica en la reserva biológica de Doñada. In *Proceedings XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección 2011*. 417-420.

Tran, T.V., R. Reef & X. Zhu. 2022. A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sensing*, 14:4868.

Torgersen, C.E., R.N. Faux, B.A. McIntosh, N.J. Poage & D.J. Norton. 2001. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment*, 76(3):386-398.

Troxler, T.G., J.G. Barr, J.D. Fuentes, V. Engel, G. Anderson, C. Sanchez, D. Lagomasino, R. Price & S.E. Davis. 2015. Component-specific dynamics of riverine

mangrove CO₂ efflux in the Florida coastal Everglades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213:273-282.

Tucker, C.J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8:127-150.

Universidad Nacional Autónoma de México. 2012. Primer informe de validación en campo marismas nacionales, Nayarit y Sinaloa. CONACyT-CONAGUA. Ciudad de México, México, 61 p.

Utrilla, P., C. Mazo, M.C. Sopena, M. Martínez-Bea & R. Domingo. 2009. A paleolithic map from 13,660 calBP: engraved stone blocks from the Late Magdalenian in Abauntz Cave (Navarra, Spain). *Journal of Human Evolution*, 57(2):99-111.

Valderrama-Landeros, L., M. Blanco y Correa, F. Flores-Verdugo, F. Flores-de-Santiago & J.M. Kovacs. 2020. Spatiotemporal shoreline dynamics of Marismas Nacionales, Pacific coast of Mexico, based on a remote sensing and GIS mapping approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(123).

Valderrama-Landeros, L.H., M.T. Rodríguez-Zúñiga, C. Troche-Souza, S. Velázquez-Salazar, E. Villeda-Chávez, J.A. Alcántara-Maya, B. Vázquez-Balderas, M.I. Cruz-López & R. Ressler. 2017. Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980–2015. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México, 130 p.

Valdez-Hernández, J.I., A. Ruiz-Luna, M. Guzmán-Arroyo, F. González-Farías, J. Acosta-Vázquez & A.D. Vázquez-Lule. 2009. Caracterización del sitio de manglar Teacapán-Agua Brava Marismas Nacionales, Sinaloa-Nayarit. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Report PN10. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México, 7 p.

Vázquez, B. 2023. Análisis de la dinámica temporal y espacial de los cuerpos de agua en Marismas Nacionales, Sinaloa-Nayarit por sensores remotos. Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 74 p.

Veneros, J., L. García, E. Morales, V. Gómez, M. Torres & F. López-Morales. 2020. Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia (Arica)*, 38(4):99-107.

Vicente-Serrano, S.M., J.J. Camarero, J.M. Olano, N. Martín-Hernández, M. Peña-Gallardo, M. Tomás-Burguera, ... & A. El Kenawy. 2016. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187:14-29.

Villarreal-Rosas, J., C.J. Brown, M.F. Adame, C. Buelow, P. Jacobo, E. Najera, ... & V.H. Vázquez-Moran. 2022. Prioridades para la Restauración de Manglares en Marismas Nacionales. Griffith University. Australia, 37 p.

Wang, L., J.L. Silván-Cárdenas & W.P. Sousa. 2008. Neural network classification of mangrove species from multi-seasonal Ikonos imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(7):921-927.

Xu, Y., J. Wang, A. Xia, K. Zhang, X. Dong, K. Wu & G. Wu. 2019. Continuous wavelet analysis of leaf reflectance improves classification accuracy of mangrove species. *Remote Sensing*, 11(3):254.

Zhang, L., M.H. Wang, J. Hu & Y.S. Ho. 2010. A review of published wetland research, 1991–2008: ecological engineering and ecosystem restoration. *Ecological Engineering*, 36(8):973-980.

Zhong, L. & Z. Qiguo. 2001. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant Soil*, 231:175-185.

XII. ANEXOS

Tabla A1.1. Áreas obtenidas en km² por clase en el presente estudio contra las longitudes proporcionadas por la serie I a VII para uso de suelo y vegetación de INEGI.

Clase	INEGI	Estudio	INEGI	Estudio	INEGI	Estudio	INEGI	Estudio	INEGI	Estudio	INEGI	Estudio
	1986		1995		2000		2008		2016		2024	
Cuerpos de agua	154.01	276.02	164.69	233.09	162.97	269.7	189.48	420.95	419.60	331.52	194.30	325.18
Manglar	779.48	707.20	741.39	464.79	741.39	298.53	901.82	452.73	803.88	345.93	886.58	535.34
Agricultura riego (activa)	636.96	348.04	1140.68	666.39	1140.68	533.85	1201.51	660.24	1212.44	643.1	1213.76	679.22
Agricultura temporal (inactiva)	680.47	450.18	230.49	1004.6	255.80	740.59	226.85	973.93	229.22	770.32	224.53	838.12
Pastizal	54.56	878.73	60.71	436.04	60.71	1213.13	44.68	454.7	463.47	872.97	76.21	834.86
Selva baja caducifolia	336.89	320.64	62.87	547.02	573.27	296.05	276.29	388.54	256.11	387.96	216.88	139.08

Tabla A1.2. Políticas de uso así como portafolio de proyectos para zona núcleo (preservación de los ecosistemas a largo plazo) y zona de preservación (corredor natural).

Políticas de uso		Actores involucrados	Portafolio de proyectos	Financiamiento			
Permitidas	No permitidas			Nacional	Rubros a financiar	Internacional	Rubros a financiar
<ul style="list-style-type: none"> • Educación ambiental • Construcción de instalaciones de apoyo, exclusivamente para la investigación científica o el monitoreo del ambiente • Investigación científica que no implique la extracción o traslado de especímenes, ni la modificación del hábitat • Monitoreo del ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Acuicultura • Agricultura • Apertura de senderos, brechas y caminos • Aprovechamiento forestal • Ganadería • Realizar obras o actividades de exploración o explotación mineras • Remover, rellenar, trasplantar, podar o realizar cualquier obra o actividad que afecte la integralidad del flujo hidrológico 	<p>CONANP, CONAPESCA</p> <p>Ejidos y particulares</p> <p>Ejidos y particulares</p>	<p>Observaciones de aves y vida silvestre</p> <p>Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad</p> <p>Monitoreo científico</p>	<p>Fomento a las UMAS (SEMARNAT)</p> <p>Pago de servicios ambientales (CONAFOR)</p> <p>Servidumbres ecológicas (PRONATURA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción e instalación de infraestructura, equipamiento, insumos o promoción y responsabilidad técnica. Monto Máximo: \$ 1,500,000 MXN IDEAWILD • Conservar de manera activa los bosques, selvas y manglares a través de incentivos económicos a la población propietaria de terrenos. Monto aproximado: \$ 1,100 MXN/hectárea/año • Conservación de propiedades privadas y ejidales con alto valor 	<p>Disney fundación</p> <p>RUFFORD</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo a proyectos de conservación y preservación con la obtención de equipo e insumos. Monto máximo aproximado: \$ 29,000 MXN • Financiamiento a proyectos de conservación, apoyo a la investigación, así como programas educativos y de sensibilización. Monto máximo aproximado: \$ 1,000,000 MXN • Protección de especies en peligro, la restauración de hábitats, y la participación comunitaria en la conservación. Monto máximo aproximado: \$ 157,000 (Small Grants) a

del manglar				biológico, teniendo como premisas fundamentales la conservación ambiental a través de herramientas económicas, técnicas y jurídicas		\$ 395,000 MXN (Booster Grants)
<ul style="list-style-type: none"> • Usar explosivos • Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante 	CONANP	Aumento de cobertura del manglar	Fondo mexicano para la conservación de la naturaleza (FMCN)	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración de áreas degradadas, manejo sostenible de áreas, planeación territorial, educación ambiental e incidencia en políticas públicas. Monto aproximado: \$ 9,000,000 MXN	Nacional Geographic	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento a proyectos de conservación y apoyo a la investigación. Monto máximo aproximado: \$ 400,000 (Level 1) a \$ 2,000,000 MXN (Level 2)
	CONANP, CONAPESCA	Pesca deportiva	Infraestructura hidráulica para abrevaderos (SAGARPA)	<ul style="list-style-type: none"> • Fomento a proyectos ecoturísticos a través de la financiación de infraestructura y mobiliario 	International Community Foundation	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento a iniciativas que promuevan la resiliencia costera y el desarrollo sostenible. Monto máximo aproximado: \$ 2,000,000 MXN

Políticas de uso		Actores involucrados	Portafolio de proyectos	Nacional	Financiamiento		
Permitidas	No permitidas				Rubros a financiar	Internacional	Rubros a financiar
<ul style="list-style-type: none"> • Educación ambiental • Filmaciones, actividades de fotografía, captura de imágenes o sonidos, sin fines comerciales 	<ul style="list-style-type: none"> • Acuicultura • Agricultura • Apertura de senderos, brechas y caminos • Aprovechamiento forestal 	CONANP	Observaciones de aves y vida silvestre	Fomento a las UMAS (SEMARNAT)	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción e instalación de infraestructura, equipamiento, insumos o promoción y responsabilidad técnica. Monto Máximo: \$ 1,500,000 MXN 	IDEAWILD	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo a proyectos de conservación y preservación con la obtención de equipo e insumos. Monto máximo aproximado: \$ 29,000 MXN
<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de instalaciones de apoyo, exclusivamente para la investigación científica o el monitoreo del ambiente • Investigación científica que no implique la extracción o traslado de especímenes, ni la modificación del 	<ul style="list-style-type: none"> • Ganadería • Realizar obras o actividades de exploración o explotación mineras • Remover, rellenar, trasplantar, podar o realizar cualquier obra o actividad que afecte la integralidad del flujo hidrológico del manglar 	Ejidors y particulares	Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad	Pago de servicios ambientales (CONAFOR)	<ul style="list-style-type: none"> • Conservar de manera activa los bosques, selvas y manglares a través de incentivos económicos a la población propietaria de terrenos. Monto aproximado: \$ 1,100 MXN/hectárea/año 	Disney fundación	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento a proyectos de conservación, apoyo a la investigación, así como programas educativos y de sensibilización. Monto máximo aproximado: \$ 1,000,000 MXN

hábitat	<ul style="list-style-type: none"> • Usar explosivos 	Ejidos y particulares	Monitoreo científico	Servidumbres ecológicas (PRONATURA)	<ul style="list-style-type: none"> • Conservación de propiedades privadas y ejidales con alto valor biológico, teniendo como premisas fundamentales la conservación ambiental a través de herramientas económicas, técnicas y jurídicas 	RUFFORD	<ul style="list-style-type: none"> • Protección de especies en peligro, la restauración de hábitats, y la participación comunitaria en la conservación. Monto máximo aproximado: \$ 157,000 (Small Grants) a \$ 395,000 MXN (Booster Grants)
<ul style="list-style-type: none"> • Monitoreo del ambiente • Turismo de bajo impacto ambiental • Mantenimiento de senderos y caminos existentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante 						
		CONANP	Aumento de cobertura del manglar	Fondo mexicano para la conservación de la naturaleza (FMCN)	<ul style="list-style-type: none"> • Restauración de áreas degradadas, manejo sostenible de áreas, planeación territorial, educación ambiental e incidencia en políticas públicas. Monto aproximado: \$ 9,000,000 MXN 	Nacional Geographic	<ul style="list-style-type: none"> • Financiamiento a proyectos de conservación y apoyo a la investigación. Monto máximo aproximado: \$ 400,000 (Level 1) a \$ 2,000,000 MXN (Level 2)

CONANP,
CONAPESCA

Pesca
deportiva

Infraestructura
hidráulica para
abrevaderos
(SAGARPA)

- Fomento a proyectos ecoturísticos a través de la financiación de infraestructura y mobiliario

International
Community
Fundation

- Financiamiento a iniciativas que promuevan la resiliencia costera y el desarrollo sostenible. Monto máximo aproximado: \$ 2,000,000 MXN

Tabla A1.3. Áreas en km² para cada polígono existente en la zonificación actual así como para cada polígono propuesto dentro de la actualización.

Polígonos en zonificación actual	Polígonos propuestos	km ²	Incremento en km ²
	Zona núcleo		
	Subzona de uso restringido SURU(I) - Valle de la Urraca	13.233237	
	Subzona de uso restringido SURT(I) - Teacapán	0.8974	
	Subzona de uso restringido SURC(II) - Las Cuatas	10.010605	
	Subzona de uso restringido SURL(I) - La Lima (I)	2.146653	
	Subzona de uso restringido SURM(I) - Los Morrillos (I)	8.390553	NA
	Subzona de uso restringido SURC(I) - Palmar de Cautla (I)	1.599578	
	Subzona de uso restringido SURB(I) - Agua Brava (I)	3.181413	
Subzona de protección SPT(I) - Toromocho (I)		0.24294651	
Subzona de uso restringido SURH(I)T(II) - Las Haciendas (I)		10.00059412	
Subzona de uso restringido SURH(I)T(II) - Toromocho (II)		1.84438848	
	Zona de amortiguamiento		
	Subzona de preservación SPPT()SASESMZ(I)PT(II)SPP(I) - Palapar de Tuxpan - Palapar de Tuxpan (I) - Los Patos (I)	4.424758	
Subzona de preservación SPPT - Palapar de Tuxpan	Subzona de preservación SPPT()SASESMZ(I)PT(II)SPP(I) - Palapar de Tuxpan - Palapar de Tuxpan (I) - Los Patos (I)	8.5505879	12.9753459
Subzona de uso tradicional SUTPH - Paso hondo		0.96461532	
Subzona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales SASRNRPHM(I)PT(II) - El Roblito - Paso hondo a Mexcaltitán (I)		1227.042779	
Subzona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales SASRNRPHM(I)PT(II) - Palapar de Tuxpan (II)		10.17000363	
Subzona de aprovechamiento sustentable de los ecosistemas SASESMZ(I)PT(I) - San Miguel - Zomatlán (I)		6.34156043	

Subzona de aprovechamiento sustentable de los ecosistemas SASESMZ(I)PT(I) - Palapar de Tuxpan (I)	9.05612605
Subzona de aprovechamiento especial SAEFVP(I) - Francisco Villa - Pescadero (I)	29.73054515
Subzona de uso público SUPR(I)N(II)M(III) - El Roblito (I)	14.59417859
Subzona de uso público SUPR(I)N(II)M(III) - Novillero (II)	2.32771248
Subzona de uso público SUPR(I)N(II)M(III) - Mexcaltitán (III)	13.45636864
Subzona de asentamientos humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV) - El Roblito (I)	0.60100071
Subzona de asentamientos humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV) - Arenitas (II)	0.58145146
Subzona de asentamientos humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV) - Puerta de Palapares (III)	0.12910702
Subzona de asentamientos humanos SAHR(I)A(II)PP(III)MU(IV) - Mexcaltitán de Uribe (IV)	0.39931945
Subzona de recuperación SRLCH - Laguna El Chumbeño	2.51067184
