

Manzanilla, H.G., Cruz Gaistardo, C., Rodríguez Palacio, M.C., Zárate Hernández, M.R., Agraz Hernández, C.M. 2026. Índices espectrales y salud ecosistémica en el monitoreo de manglares: Una revisión sistemática de los enfoques de teledetección óptica. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 8(1): 45-74. doi 10.26359/52462.0804



Índices espectrales y salud ecosistémica en el monitoreo de manglares: una revisión sistemática de los enfoques de teledetección óptica

Spectral indices and ecosystem health in mangrove monitoring: a systematic review of optical remote sensing approaches

H.G. Manzanilla^{1}, C. Cruz Gaistardo², M.C. Rodríguez Palacio¹,
M.R. Zárate Hernández¹ y C.M. Agraz Hernández^{3,*}*

¹Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

²Independent Researcher and International Consultant

³Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX),
Universidad Autónoma de Campeche

**Autor de correspondencia: hectorgmanzanilla@gmail.com; clmagraz@uacam.mx*

doi 10.26359/52462.0804

Recibido 27/marzi/2026. Aceptado 20/julio/2026

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

La teledetección óptica se ha convertido en una herramienta clave para el monitoreo de los ecosistemas de manglar y la evaluación de sus dinámicas espaciales y temporales. Sin embargo, numerosos estudios abordan los índices espectrales principalmente desde una perspectiva aplicada, mientras que su evolución metodológica y las preguntas ecológicas que motivaron su desarrollo han recibido menor atención. Este estudio presenta una revisión sistemática de carácter interpretativo, estructurada siguiendo el marco general de PRISMA 2020 ($n = 40$ artículos), orientada a reconstruir la trayectoria histórica y metodológica de las métricas espectrales utilizadas para caracterizar la salud ecosistémica del manglar. Los resultados muestran una predominancia reciente de imágenes Sentinel-2 (55 % de los estudios revisados) y un uso persistente del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), presente en aproximadamente el 85 % de la literatura analizada. A partir de la síntesis bibliográfica se identificaron cuatro transiciones metodológicas dominantes, desde los enfoques iniciales de detección de cobertura terrestre hasta el uso de series temporales automatizadas apoyadas en plataformas de computación en la nube, particularmente Google Earth Engine (GEE). La evidencia revisada sugiere que los índices basados exclusivamente en el verdor del dosel presentan limitaciones para interpretar procesos de degradación en ambientes intermareales, particularmente cuando las alteraciones hidrológicas no se reflejan simultáneamente en cambios detectables de la cobertura vegetal. En este contexto, las estrategias multíndice que combinan métricas sensibles a la humedad (por ejemplo, NDMI o NDWI) con indicadores de vigor o corrección de fondo (*e.g.*, EVI o SAVI) pueden proporcionar información complementaria. Su desempeño depende del régimen mareal, la estructura del dosel, la resolución espacial y temporal y la disponibilidad de validación ecológica de campo. Finalmente, el estudio identifica vacíos metodológicos relacionados con la validación empírica, la cuantificación de la incertidumbre y la interpretación de señales espectrales en ambientes costeros complejos. Abordar estas limitaciones puede mejorar la confiabilidad del monitoreo basado en teledetección. La aplicación conceptual a Estero Pargo, Jaina y Atasta, en el estado de Campeche, se plantea como un ejercicio de traducción metodológica derivado de la literatura revisada y no como una validación empírica directa del desempeño de los índices en estos sitios.

Palabras clave: teledetección, manglares, índices espectrales, Sentinel-2, salud ecosistémica, ecosistemas costeros.

Abstract

Optical remote sensing has become a key tool for monitoring mangrove ecosystems and assessing their spatial and temporal dynamics. However, many studies evaluate spectral indices primarily from an applied perspective, often overlooking the methodological evolution and ecological questions that originally motivated their development. This study presents an interpretive systematic review structured following the general PRISMA 2020 framework ($n = 40$ articles) to reconstruct the historical and methodological trajectory of spectral metrics used to characterize mangrove ecosystem health. The results reveal a recent predominance of Sentinel-2 imagery (55% of the reviewed studies) and a persistent reliance on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which appears in approximately 85% of the literature analyzed. The bibliographic synthesis identified four dominant methodological transitions, ranging from early land-cover detection approaches to automated time-series analyses supported by cloud-computing platforms, particularly Google Earth Engine (GEE). The reviewed evidence suggests that indices based exclusively on canopy greenness have limitations for interpreting degradation processes in intertidal environments, where hydrological changes may precede detectable shifts in vegetation cover. Multi-index strategies that combine moisture-sensitive metrics (*e.g.*, NDMI or NDWI) with vegetation-vigor or background-corrected metrics (*e.g.*, EVI or SAVI) may provide a more informative framework. Their performance remains context dependent and should be interpreted in relation to tidal regime, canopy structure, spatial and temporal resolution, and ecological field validation. Finally, the study identifies key methodological gaps related to empirical validation, uncertainty quantification, and the interpretation of spectral signals in complex coastal environments. Addressing these limitations may improve the reliability of remote-sensing-based monitoring. The application to Estero Pargo, Jaina, and Atasta in the Campeche State, Mexico, is presented as a methodological translation of patterns identified in the reviewed literature rather than as direct empirical validation of spectral-index performance at those sites.

Keywords: Remote Sensing, mangroves, spectral indices, sentinel-2, ecosystem health, coastal ecosystems.



Introducción

Los bosques de manglar son ecosistemas costeros de elevada relevancia ecológica y climática. A escala global, almacenan en promedio alrededor de 937 t C ha⁻¹, considerando la biomasa y los suelos, lo que los sitúa entre los ecosistemas con mayores reservas de carbono (Alongi, 2012). Entre 2000 y 2020, la superficie mundial de manglar registró una pérdida neta aproximada de 284 000 ha, aunque la tasa de pérdida disminuyó durante la segunda década del periodo (FAO, 2023). A estas presiones se suman los efectos asociados al cambio climático: el nivel medio global del mar aumentó 0.20 m entre 1901 y 2018, y su tasa media de aumento alcanzó 3.7 mm año⁻¹ durante 2006–2018 (IPCC, 2021). Asimismo, eventos extremos, como los ciclones tropicales y las marejadas, pueden ocasionar mortalidad y anegamiento prolongado en bosques costeros (Lagomasino *et al.*, 2021). En este contexto, la teledetección constituye una herramienta fundamental para el monitoreo espacialmente explícito de la dinámica y la salud ecosistémica del manglar.

Con el desarrollo de la teledetección, se incorporaron y adaptaron distintos índices espectrales para caracterizar atributos biofísicos de la vegetación, entre ellos el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y métricas basadas en las regiones del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta sensibles al contenido de agua de la vegetación (Gao, 1996; Huete, 1988; Tran *et al.*, 2022). Este desarrollo no fue estrictamente lineal: distintas métricas coexistieron y se incorporaron de manera asincrónica según la disponibilidad de sensores, la pregunta ecológica, la escala de análisis y las condiciones ambientales. En conjunto, la transición metodológica amplió el enfoque desde la detección de presencia o ausencia de manglar hacia la interpretación integrada de su estructura, estado hídrico y dinámica temporal (Friess *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2022).

Durante el periodo 2015–2025, el monitoreo de manglares incorporó con mayor frecuencia enfoques basados en combinaciones de índices, series temporales y variables ambientales para apoyar la interpretación de la salud ecosistémica. Algunas revisiones publicadas durante este periodo han organizado la evidencia principalmente en función de los sensores o de los índices empleados (Friess *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Este enfoque resulta útil para caracterizar las herramientas disponibles, aunque puede limitar la integración histórica de las razones que motivaron el desarrollo de determinadas métricas y de las limitaciones que estas buscaban abordar. Reconstruir esta trayectoria resulta relevante para reducir interpretaciones erróneas en análisis multitemporales, particularmente cuando factores como la marea, la turbidez o la estacionalidad introducen variaciones espectrales que pueden confundirse con cambios ecológicos (Wang *et al.*, 2022).

La reflectancia expresa la proporción de radiación incidente que una superficie refleja en una determinada región del espectro electromagnético. En manglares, sus variaciones pueden relacionarse con pigmentos, estructura foliar y contenido de agua, pero también con factores físicos como el suelo expuesto, la inundación, la turbidez y la geometría de observación (Kuenzer *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2022). Por ello, la salud ecosistémica del manglar no debe inferirse directamente a partir de una única respuesta espectral; esta debe interpretarse respecto de una condición de referencia y en conjunto con información ecológica complementaria. En esta revisión, la línea base se entiende como el estado de referencia espacial y temporal frente al cual se evalúan desviaciones y trayectorias. La interpretación de los índices espectrales como indicadores ecológicamente informativos requiere su vinculación con datos de campo obtenidos a escalas espaciales y temporales compatibles con la



información espectral (Kuenzer *et al.*, 2011; Lagomasino *et al.*, 2021).

En este marco, el presente artículo realiza una revisión cronológica y metodológica orientada a responder tres preguntas centrales:

- ¿Cómo surgió y se consolidó el uso de índices espectrales en ambientes intermareales?
- ¿Cómo avanzó el análisis multitemporal desde comparaciones bitemporales hasta el uso de series de tiempo densas?
- ¿Qué vacíos metodológicos persisten en la evaluación de la salud ecosistémica del manglar mediante teledetección óptica?

A partir de esta síntesis, se plantea una aplicación conceptual en tres escenarios costeros contrastantes del estado de Campeche: Estero Pargo, Jaina y Atasta. Su selección busca ejemplificar cómo diferencias documentadas en conectividad hidrológica, intervención/restauración y gradientes estuarinos pueden condicionar la selección e interpretación de métricas espectrales (CONAFOR, 2016; Gázquez-Castro *et al.*, 2024; Vázquez-Rosas-Landa *et al.*, 2025). Esta aplicación regional es de carácter conceptual y no constituye una validación empírica directa del desempeño de los índices en estos sitios.

Definiciones fundamentales para el monitoreo ecosistémico

Propósito y conceptualización integral de la salud ecosistémica del manglar

Con fines operativos dentro de esta revisión, la salud ecosistémica del manglar se entiende como un constructo integrador que incorpora atributos estructurales, funcionales e hidrológicos. Se reconoce, sin embargo, que “ecosystem health”, “ecological integrity”, “ecosystem condition” y “ecosystem resilience” responden a tradiciones conceptuales relacionadas pero no estrictamente equivalentes, y que el concepto de salud ecosistémica permanece sujeto a debate respecto de los estados de referencia y los criterios de integridad (Costanza *et al.*, 1992; Rapport *et al.*, 1998; Müller & Burkhard, 2012). En este manuscrito, “condición” se utiliza para describir atributos observables, mientras que “salud ecosistémica del manglar” funciona como categoría interpretativa integradora.

En percepción remota existe un sesgo histórico hacia la interpretación del “verdor” como sinónimo de bienestar ecológico (Kuenzer *et al.*, 2011; Tran *et al.*, 2022). Sin embargo, un manglar puede mantener alta reflectancia en el infrarrojo cercano y valores elevados de NDVI mientras experimenta alteraciones hidrológicas o cambios en la salinidad no captados por esa métrica. Por tanto, el NDVI aporta información sobre vigor y cobertura foliar,

pero no constituye por sí solo un diagnóstico de salud ecosistémica; su interpretación debe complementarse con otras variables espectrales y ecológicas (Kuenzer *et al.*, 2011; Tran *et al.*, 2022).

Operativamente, el constructo se organiza en cuatro dimensiones. La primera corresponde al vigor y cobertura foliar, relacionados con la actividad fotosintética del dosel. La segunda es el estado hídrico, que puede reflejar respuestas a salinidad extrema o desecación (Gao, 1996; Lagomasino *et al.*, 2021). La tercera es la conectividad hidrológica, es decir, la interacción funcional del bosque con los flujos mareales y los aportes de agua dulce; su alteración puede modificar la vulnerabilidad del manglar frente a perturbaciones (Lagomasino *et al.*, 2021). La cuarta es la resiliencia, entendida como la capacidad de recuperación tras una perturbación (Romañach *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2023). Estas dimensiones orientan la interpretación de los índices, pero no sustituyen la definición de una línea base ni la validación en campo.

Dinámica espaciotemporal: distinguiendo el ruido de la degradación

En la teledetección de manglares, la dinámica espaciotemporal no debe reducirse a una comparación



entre dos fechas. Las series temporales permiten interpretar trayectorias y distinguir, con mayor sustento, perturbaciones abruptas, procesos graduales de degradación y variaciones naturales de fenología o inundación (Zhu & Woodcock, 2014; Zhang *et al.*, 2023). En ambientes intermareales, las variaciones de marea y turbidez pueden modificar la se-

ñal espectral sin que exista necesariamente pérdida o recuperación del bosque; por ello, estos factores deben controlarse antes de atribuir el cambio observado a una modificación de la salud ecosistémica del manglar (Lagomasino *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Metodología de búsqueda y revisión sistemática

La revisión bibliográfica se desarrolló mediante un enfoque sistemático e interpretativo para identificar, analizar y sintetizar evidencia sobre el monitoreo de manglares mediante teledetección óptica, incluidos estudios con potencial de aplicación al contexto de Campeche. El proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión se estructuró siguiendo el marco general de PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021) y se complementó con criterios de transparencia para síntesis de evidencia ambiental (Haddaway *et al.*, 2018). Debido a la heterogeneidad de los diseños, sensores y variables de validación de los estudios incluidos, se realizó una síntesis cualitativa y no un metaanálisis cuantitativo. La reproducibilidad completa de las estrategias por fuente está limitada porque no se conservaron las cadenas finales exportadas, los campos ni los filtros específicos aplicados en cada base de datos.

Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La búsqueda bibliográfica comprendió publicaciones en inglés y español correspondientes al periodo 1974-2025 y se realizó mediante cuatro fuentes: *Scopus*, *Web of Science Core Collection*, *Google Scholar* y el repositorio institucional de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Scopus* y *Web of Science* se utilizaron para recuperar literatura científica indexada; *Google Scholar* permitió ampliar la búsqueda hacia literatura gris y estudios regionales; y el repositorio de la CONABIO se consultó para incorporar documentación específica sobre los

manglares de México y de la península de Yucatán. Las consultas se realizaron entre el 5 y el 8 de febrero de 2026, de acuerdo con el registro temporal proporcionado por los autores. La combinación de estas fuentes permitió integrar literatura científica internacional y documentación relevante para el contexto regional.

- **Scopus y Web of Science (WoS Core Collection):** seleccionadas para garantizar la cobertura de literatura científica indexada y de alto impacto internacional.
- **Google Scholar:** utilizado para identificar literatura gris relevante y estudios regionales no necesariamente indexados en bases de datos tradicionales.
- **Repositorio institucional de la CONABIO:** consultado para integrar información específica sobre manglares mexicanos y de la Península de Yucatán.

Esta combinación de fuentes permitió equilibrar la literatura científica internacional con el contexto ecológico regional, sin privilegiar únicamente desarrollos tecnológicos globales.

Ecuaciones de búsqueda

Las ecuaciones de búsqueda se estructuraron mediante los operadores booleanos AND y OR y combinaron tres ejes: (1) ecosistema objetivo ("mangrove"); (2) aproximación metodológica ("remote sensing", "Sentinel-2", "Landsat", "spectral indices"); y (3) procesos ecológicos ("degradation", "health", "dynamics", "hydrology"). La cadena núcleo conservada en los registros de trabajo fue:



(“Mangrove health” OR “Mangrove degradation”) AND (“NDVI” OR “NDMI” OR “SAVI”) AND (“Time series” OR “Multitemporal”). También se emplearon términos complementarios, entre ellos “Google Earth Engine”, “break detection” y “hydrological connectivity”. Las consultas se realizaron entre el 5 y el 8 de febrero de 2026. No se conservaron las cadenas finales exportadas, los campos específicos ni los filtros aplicados individualmente en cada fuente, por lo que estos elementos no pudieron reconstruirse retrospectivamente.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyeron estudios publicados entre 1974, año de publicación del trabajo de Rouse *et al.* (1974) sobre el NDVI, y 2025, con el propósito de abarcar la trayectoria histórica del desarrollo metodológico. El análisis detallado se concentró en el periodo 2015–2025, caracterizado por una mayor disponibilidad de datos de observación de la Tierra, incluidos los provenientes de Landsat y Sentinel-2, así como por el uso creciente de plataformas de procesamiento en la nube. Se incluyeron publicaciones en inglés y español que aplicaran índices espectrales al monitoreo de manglares y que incorporaran validación empírica, comparaciones con datos independientes o una discusión metodológica explícita sobre el desempeño y las limitaciones de las métricas empleadas.

Se priorizaron sensores ópticos de resolución espacial media, principalmente la serie Landsat —incluyendo MSS, TM y OLI cuando fueron reportados por los estudios— y Sentinel-2 MSI. Para mantener coherencia con el alcance de la revisión, las frecuencias de índices se restringieron a métricas derivadas de bandas ópticas. Los estudios multifuente se consideraron únicamente cuando incorporaron un componente óptico pertinente para la pregunta de revisión; variables derivadas de SAR, LiDAR o plataformas UAV se trataron como información complementaria y no se contabilizaron como índices espectrales ópticos. Los trabajos basados exclusivamente en sensores de baja resolución espacial se excluyeron del análisis aplicado; sin em-

bargo, se conservaron algunos antecedentes históricos cuando resultaron necesarios para reconstruir la evolución metodológica. El énfasis en sensores de acceso abierto respondió al interés de favorecer la comparabilidad temporal y la posibilidad de reproducir estos enfoques en contextos regionales.

El corpus final ($n = 40$) fue intencionalmente restringido a estudios con aplicación directa de índices espectrales al monitoreo de manglares y, cuando fue posible, con validación empírica o discusión metodológica explícita. Esta restricción explica el tamaño del corpus frente al amplio periodo histórico considerado y responde al objetivo de analizar la evolución metodológica, no de contabilizar exhaustivamente toda la literatura de cartografía de manglares.

Procedimiento de cribado, extracción y codificación

El cribado se realizó en dos niveles: revisión de título y resumen, seguida de evaluación a texto completo. Los 186 registros identificados se consolidaron en una matriz de trabajo y la depuración fue asistida mediante ChatGPT (OpenAI), utilizando la versión disponible en la plataforma durante febrero de 2026. El procedimiento de deduplicación fue semiautomático y se basó en reglas operacionales de coincidencia escalonada de metadatos bibliográficos: (1) normalización de títulos, DOI, autores y año; (2) identificación de coincidencias exactas por DOI y, cuando este no estaba disponible, por título normalizado; y (3) revisión de coincidencias aproximadas mediante la comparación conjunta de título, autores y año para detectar variantes de un mismo registro. En los casos ambiguos, los registros se contrastaron individualmente antes de conservar una sola versión del trabajo. Este procedimiento identificó 44 duplicados y dejó 142 registros para el cribado. El software utilizado para apoyar esta fase fue ChatGPT; no se conserva evidencia de un gestor bibliográfico adicional ni un nombre de algoritmo propietario específico. Por ello, se reporta el flujo operacional reproducible y no se atribuye al modelo un algoritmo interno que no es accesible al



usuario. De los 142 registros cribados, 55 se excluyeron por no centrarse en manglares, no incluir un componente espectral o carecer de una aplicación ecológica pertinente. Los 87 textos recuperados fueron evaluados a texto completo y 47 se excluyeron por no cumplir los criterios de elegibilidad definidos en la Sección de criterios de inclusión y exclusión. El registro disponible conserva el total de exclusiones, pero no el desglose individual de las causas para esos 47 textos; por transparencia, no se reconstruyen retrospectivamente motivos más específicos. El corpus final quedó constituido por 40 estudios. La matriz de extracción registró, como mínimo, autor y año, sensor o técnica, índices empleados, aportes reportados, brechas metodológicas, enfoque temático y aplicación principal (Anexo S1).

Para la síntesis descriptiva del enfoque temático (tabla 4), cada estudio se asignó a una única categoría principal de acuerdo con el objetivo y el tipo de análisis que estructuraban el trabajo. Cuando un artículo abordó más de un componente, la categoría principal se utilizó únicamente con fines de conteo descriptivo y los componentes secundarios se conservaron en la matriz del Anexo S1; por tanto, esta codificación no implica que los enfoques sean mutuamente excluyentes en términos conceptuales.

Evaluación de calidad metodológica y control de sesgos

La calidad metodológica se evaluó cualitativamente, sin asignar una puntuación numérica, debido a la heterogeneidad de diseños y objetivos. Se consideraron tres dominios: (i) consistencia entre pregunta, sensor, escala e índice; (ii) presencia y tipo de validación empírica o contraste con datos independientes; y (iii) claridad con la que el estudio distinguió una señal espectral de una interpretación ecológica. Para controlar sesgos de interpretación,

los resultados se sintetizaron reconociendo explícitamente el sesgo idiomático derivado de incluir únicamente inglés y español, la distribución geográfica desigual del corpus, la predominancia de determinados sensores y las diferencias entre estrategias de validación. En consecuencia, las tendencias identificadas se interpretan como patrones del corpus revisado y no como estimaciones universales del desempeño de cada índice.

Criterios para la periodización metodológica

Las cuatro etapas propuestas no deben interpretarse como periodizaciones rígidas. Se definieron como transiciones metodológicas dominantes a partir de la convergencia de cinco criterios observados en el corpus: (1) disponibilidad de sensores y cambios en resolución o frecuencia de observación; (2) tipo de métrica espectral predominante; (3) complejidad analítica, desde comparaciones estáticas o bi-temporales hasta series densas y procesamiento en la nube; (4) pregunta ecológica dominante; y (5) nivel de integración con validación de campo. Los años de transición son aproximados y representan cambios en el predominio de determinados enfoques, no la sustitución completa de unos métodos por otros (Kuenzer *et al.*, 2011). La selección de 12 estudios para la tabla 1 se realizó después de la síntesis, con fines ilustrativos y no como criterio de calidad o jerarquía: se buscaron trabajos que, en conjunto, cubrieran las principales transiciones, documentaran la introducción o aplicación de métricas relevantes, mostraran cambios en la disponibilidad de datos o complejidad analítica y aportaran ejemplos de validación o de limitaciones propias del monitoreo de manglares. Cuando varios estudios cumplieran una función similar, se priorizó el que presentaba una relación más directa con la transición metodológica descrita y suficiente detalle para su comparación.



Tabla 1. Estudios seleccionados para representar las principales transiciones metodológicas en el monitoreo espectral de manglares. La selección es ilustrativa y no constituye un ranking ni una evaluación de calidad. NIR: infrarrojo cercano (Near-Infrared).

Autor y año	Metodología o aporte	Aporte sintetizado	Limitación o cautela	Enfoque	Función en la síntesis
Rouse <i>et al.</i> (1974)	Antecedente de índices rojo–NIR con datos ERTS/Landsat MSS	Relacionó combinaciones espectrales rojo–NIR con vegetación verde; constituye un antecedente del NDVI.	El trabajo no fue diseñado para manglares ni para interpretar salud ecosistémica.	Metodológico	Origen de métricas de verdor.
Huete (1988)	Formulación del Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	Propuso un ajuste para reducir la influencia del brillo del suelo sobre la respuesta espectral de la vegetación.	El parámetro de ajuste y las condiciones de fondo requieren contextualización local.	Metodológico	Tratamiento del efecto del suelo.
Gao (1996)	Formulación NIR–SWIR denominada NDWI en el artículo original	Propuso un índice sensible al agua líquida de la vegetación; la misma formulación se denomina con frecuencia NDMI en literatura posterior.	La señal no debe interpretarse por sí sola como estrés y puede estar influida por fondo, inundación y estructura del dosel.	Metodológico	Incorporación de información asociada con agua de la vegetación.
Kuenzer <i>et al.</i> (2011)	Revisión de teledetección de ecosistemas de manglar	Sintetizó sensores, aplicaciones y limitaciones del monitoreo remoto de manglares.	La diversidad de sensores, escalas y esquemas de validación limita comparaciones directas.	Metodológico	Marco de limitaciones y oportunidades.
Giri <i>et al.</i> (2011)	Cartografía global con archivo Landsat	Produjo una base global consistente de extensión de manglar a 30 m para el año 2000.	La cartografía de extensión no equivale a evaluación de condición o función ecológica.	Descriptivo	Transición hacia cartografía global consistente.
Zhu & Woodcock (2014)	Continuous Change Detection and Classification (CCDC) con series Landsat	Desarrolló un enfoque para detección y clasificación continua de cambios usando todas las observaciones Landsat disponibles.	Su aplicación a manglares requiere controlar nubosidad, inundación, marea y otras fuentes de variabilidad.	Metodológico	Automatización del análisis temporal.
Gupta <i>et al.</i> (2018)	Combined Mangrove Recognition Index (CMRI) con Landsat 8 OLI	Combinó NDVI y NDWI para mejorar la discriminación temática de manglar frente a otras coberturas en los sitios evaluados.	El desempeño reportado depende del sitio y requiere validación antes de transferirse a otras costas.	Metodológico	Desarrollo de índices específicos para manglar.
Bunting <i>et al.</i> (2018)	Global Mangrove Watch; ALOS PALSAR + Landsat	Generó una línea base global de extensión de manglar para 2010 mediante clasificación multifuente.	El producto se orienta a extensión/cobertura y no constituye por sí solo un diagnóstico de salud ecosistémica.	Gestión	Disponibilidad de líneas base globales.
Baloloy <i>et al.</i> (2020)	Mangrove Vegetation Index (MVI) con Sentinel-2	Propuso MVI usando bandas verde, NIR y SWIR1 para apoyar el mapeo rápido de manglares.	La transferibilidad debe evaluarse en contextos ecológicos y espectrales distintos a los sitios de validación.	Metodológico	Aprovechamiento de Sentinel-2 e índices específicos.
Lagomasino <i>et al.</i> (2021)	LiDAR aéreo, imágenes satelitales y observaciones de campo	Relacionó la mortalidad posterior al huracán Irma con marejada, encharcamiento, baja elevación y aislamiento hidrológico en el suroeste de Florida.	Los mecanismos documentados corresponden a un evento y región específicos; no deben generalizarse sin validación.	Ecológico	Ejemplo de integración entre señal remota y mecanismo hidrológico.
Tran <i>et al.</i> (2022)	Revisión de índices espectrales aplicados a manglares	Documentó el uso amplio del NDVI y la expansión de índices y fusiones de sensores ópticos en estudios de manglar.	La heterogeneidad de objetivos y validación limita comparaciones universales entre índices.	Metodológico	Síntesis de la evolución de índices espectrales.
Wang <i>et al.</i> (2023)	Series Landsat e índices para evaluar trayectorias de restauración	Propuso índices de efectividad y persistencia de restauración combinando cambios de área y NDVI en un caso de estudio.	La restauración evaluada se refiere principalmente a recuperación de vegetación y requiere cautela para inferir función ecosistémica completa.	Gestión	Ejemplo reciente de evaluación temporal de restauración.



Resultados

Selección de estudios y estadísticas descriptivas

Se identificaron inicialmente 186 registros. Mediante el procedimiento de deduplicación asistida por ChatGPT, descrito en la Sección procedimiento de cribado, extracción y codificación, se identificaron y eliminaron 44 registros duplicados, por lo que 142 pasaron al cribado por título y resumen. De estos, 55 fueron excluidos por no centrarse en manglares, carecer de un componente espectral o

no incluir una aplicación ecológica pertinente. Posteriormente, se evaluaron 87 documentos a texto completo y se excluyeron 47 por no cumplir los criterios de elegibilidad definidos en la Sección de criterios de inclusión y exclusión. Debido a que el registro disponible no conserva el desglose individual de las causas de exclusión a texto completo, no se asignan retrospectivamente motivos específicos a esos 47 documentos. El corpus final quedó constituido por 40 estudios (figura 1).

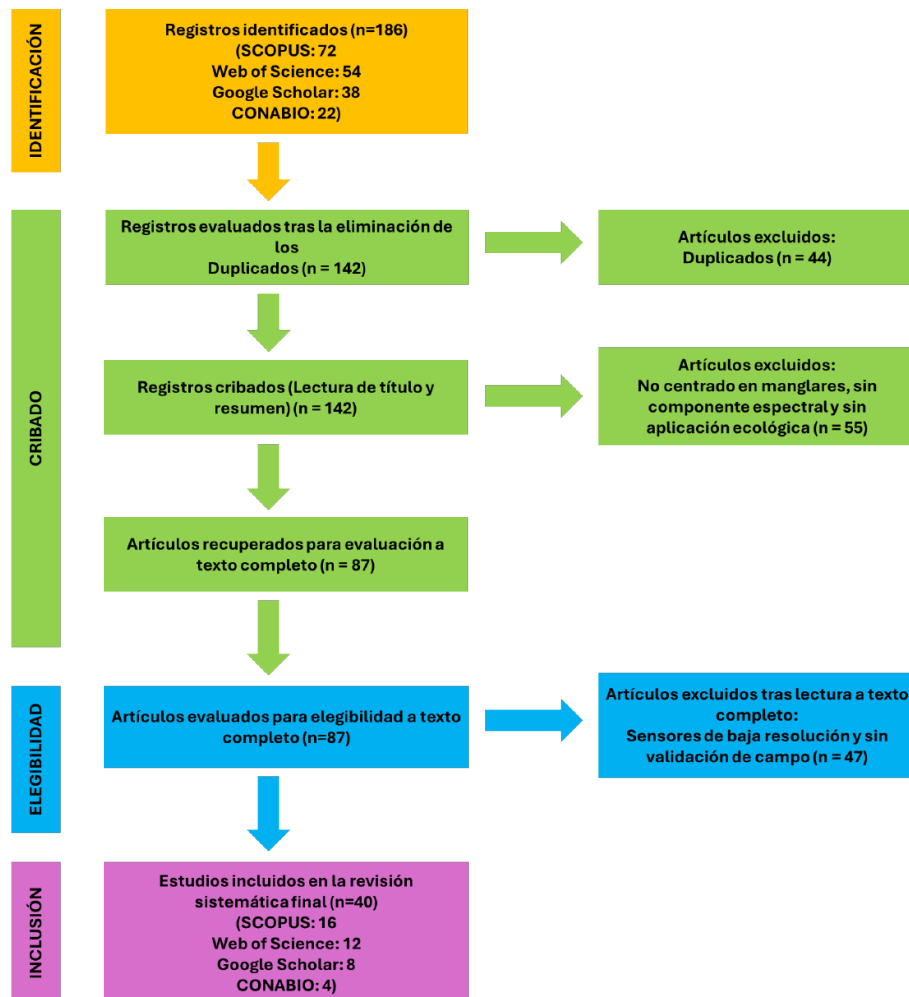


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de identificación, deduplicación, cribado, elegibilidad e inclusión de los estudios considerados en la revisión sistemática sobre monitoreo de manglares mediante teledetección óptica. La identificación de duplicados fue asistida por ChatGPT (OpenAI) mediante el procedimiento operacional descrito en la sección procedimiento de cribado, extracción y codificación.



El análisis descriptivo del corpus ($n = 40$) mostró que el 55 % de los estudios utilizó Sentinel-2 como fuente principal de información, el 25 % Landsat, el 15 % combinó ambas plataformas y el 5 % restante empleó otras configuraciones o fuentes de datos de teledetección (tabla 2). La distribución geográfica fue desigual: 45 % de los estudios correspondió a Asia, 30 % a América excepto México, 15 % a México y 10 % a África u otras regiones tropicales (tabla 3). Estas categorías son mutuamente excluyentes para fines del conteo y los porcentajes describen el corpus seleccionado, no una estimación exhaustiva de la producción científica mundial.

En cuanto al enfoque temático principal, 35 % de los estudios se codificó como metodológico, 30 % como ecológico, 20 % como aplicado a la gestión y 15 % como descriptivo (tabla 4), siguiendo el criterio de codificación descrito en la Sección de procedimiento de cribado, extracción y codificación. Respecto a la frecuencia de uso, NDVI apareció en 85 % del corpus, seguido de NDWI (60 %), NDMI (50 %), EVI (45 %), SAVI (30 %) y MSAVI (20 %) (tabla 5). Un mismo estudio

pudo utilizar más de un índice, por lo que las frecuencias de índices no son categorías mutuamente excluyentes. Las variables SAR de retrodispersión o coherencia no se contabilizaron como índices espectrales ópticos.

En el corpus revisado, Sentinel-2 fue la fuente de información utilizada con mayor frecuencia (55 %). Esta plataforma proporciona datos con resoluciones espaciales de 10-20 m para las bandas empleadas habitualmente en los índices analizados y una frecuencia de revisita que permite construir series temporales con mayor densidad de observaciones. El NDVI continúa siendo la métrica más utilizada para describir vigor foliar, mientras que NDMI y NDWI se emplean con frecuencia creciente para aportar información complementaria sobre humedad e inundación. La literatura también muestra una expansión del procesamiento automatizado mediante Google Earth Engine y otros entornos computacionales. Estas tendencias deben interpretarse considerando el contexto ecológico, las características del sensor y la disponibilidad de validación de campo.

Tabla 2. Resumen estadístico de la fuente principal de datos de teledetección codificada para los artículos analizados ($n = 40$). Las fuentes complementarias de estudios multifuente no sustituyen la categoría principal usada para este conteo.

Fuente principal de datos de teledetección	Número de artículos	Porcentaje (%)
Sentinel-2	22	55
Landsat	10	25
Sentinel-2 + Landsat (combinados)	6	15
Otras configuraciones o fuentes principales (e.g., PlanetScope, UAV y/o SAR en estudios multifuente)	2	5
Total	40	100

Tabla 3. Resumen estadístico sobre la distribución geográfica de los artículos analizados ($n = 40$).

Región	Número de artículos	Porcentaje (%)
Asia	18	45
América (Norte, Centro y Sur)	12	30
México	6	15
África y otras regiones tropicales	4	10
Total	40	100



Tabla 4. Resumen estadístico del enfoque temático principal de los artículos analizados (n = 40). Cuando un estudio abordó varios enfoques, se asignó una categoría principal únicamente para el conteo descriptivo, conforme a la Sección Procedimiento de cribado, extracción y codificación.

Enfoque principal	Número de estudios	Porcentaje (%)
Metodológico (algoritmos, ML, clasificación)	14	35
Ecológico (estructura, estrés, productividad)	12	30
Gestión y conservación	8	20
Descriptivo / cartográfico	6	15
Total	40	100

Tabla 5. Frecuencia de uso de índices espectrales ópticos en los artículos analizados (n = 40).

Índice espectral	Número de estudios	Porcentaje (%)
NDVI	34	85
NDWI	24	60
NDMI	20	50
EVI	18	45
SAVI	12	30
MSAVI	8	20
NBR	10	25
MNDWI	9	22.5
GNDVI	7	18
PRI	4	10
NDRE	3	8

Nota: un estudio puede utilizar múltiples índices, por lo que los porcentajes no suman 100 %. Las variables SAR de retrodispersión y coherencia no se incluyen porque no constituyen índices espectrales ópticos

A partir de los criterios de representación descritos en la Sección criterios para la periodización metodológica, se seleccionaron 12 estudios para ilustrar las principales transiciones metodológicas observadas en el corpus. Esta selección tiene una función sintética y no constituye un ranking, una valoración de calidad ni una identificación de “hitos” universales. La tabla 1 resume esos estudios, mientras que el Anexo S1 presenta la matriz comparativa del corpus completo.

Cronología del desarrollo metodológico

La síntesis permitió distinguir cuatro transiciones metodológicas dominantes en la evolución del

monitoreo de manglares (figura 2 y tabla 6). Estas etapas son categorías analíticas aproximadas, sustentadas en los criterios descritos en la Sección 3.6, y no implican que una tecnología o enfoque haya sustituido de manera inmediata a los anteriores.

Etapas 1. Origen: mapeo y detección básica de cobertura (≈ 1970s–1990s)

Durante este periodo, una de las principales aplicaciones de la teledetección fue la identificación y cartografía de la cobertura de manglar. Con la serie Landsat (MSS y TM) se ampliaron las posibilidades de análisis espacial y se utilizaron clasificaciones de cobertura junto con índices de vegetación, entre ellos el NDVI propuesto por Rouse *et al.* (1974).

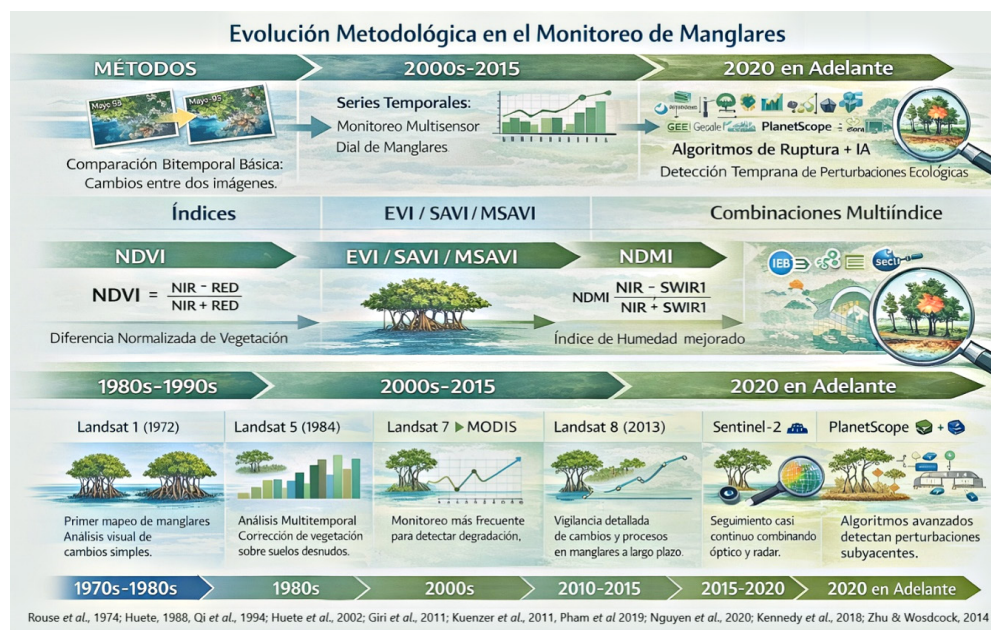


Figura 2. Línea del tiempo de la evolución metodológica en el monitoreo de los manglares. La composición gráfica fue generada con asistencia de ChatGPT (OpenAI), utilizando la versión disponible en la plataforma entre enero y marzo de 2026, y posteriormente revisada por los autores. El prompt documentado y adaptado se presenta en el Anexo S3.

Durante esta etapa se extendió el uso del contraste entre las regiones del rojo y del infrarrojo cercano para caracterizar la respuesta espectral de la vegetación. No obstante, el NDVI presenta saturación en coberturas densas y sensibilidad al fondo acuático o al suelo, por lo que sus variaciones no deben equipararse directamente con cambios en la salud ecosistémica del manglar (Green *et al.*, 2000).

La declaración anterior se incorpora para favorecer la transparencia y la trazabilidad del uso de inteligencia artificial generativa sin atribuir a la revista una política específica que no aparece en las directrices públicas consultadas.

Etapas 2. Consolidación de índices y reconocimiento del entorno intermareal (≈ 2000–2014)

Al iniciar el milenio se hizo más explícito que la señal espectral del manglar estaba condicionada por un entorno intermareal en el que agua y suelo pueden influir en la respuesta registrada por el sensor. Durante este periodo adquirieron mayor relevan-

cia enfoques orientados a considerar la influencia del agua, el suelo y la estructura del dosel sobre la respuesta espectral de los manglares. En este contexto se utilizaron, además del NDVI, índices previamente desarrollados para reducir determinados efectos de fondo o mejorar la caracterización de la vegetación, como SAVI (Huete, 1988) y EVI (Huete *et al.*, 2002).

También se incorporaron índices orientados a caracterizar componentes relacionados con el agua. McFeeters (1996) propuso el NDWI para favorecer la identificación de cuerpos de agua, mientras que Gao (1996) desarrolló una formulación basada en las regiones del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta para estimar el contenido de agua de la vegetación, denominada originalmente NDWI y posteriormente referida como NDMI en parte de la literatura. En manglares, estas métricas pueden aportar información complementaria sobre distintos componentes del sistema hídrico; sin embargo, su interpretación depende del régimen de inundación, las características del fondo, la estructura



del dosel y la validación local, por lo que no deben considerarse, por sí solas, indicadores directos de la condición fisiológica o de la salud ecosistémica del manglar (Kuenzer *et al.*, 2011).

Etapas 3. Landsat 8 y Sentinel-2: expansión del análisis multitemporal ($\approx$ 2015–2019)

La disponibilidad de Landsat 8 y Sentinel-2 amplió las posibilidades para desarrollar análisis multitemporales orientados a examinar variaciones estacionales y trayectorias de cambio. La revisita aproximada de cinco días de la constelación Sentinel-2 permite construir series temporales más densas cuando las condiciones de nubosidad y calidad de imagen lo permiten. Estudios como Baloloy *et al.* (2020) y Tran *et al.* (2022) ilustran la expansión de índices específicos y de combinaciones multíndice para caracterizar diferentes dimensiones de la cobertura.

La mayor densidad temporal no elimina el ruido físico-ambiental. Mareas, turbidez, nubes, fenología y diferencias de adquisición pueden modificar la reflectancia; por ello, las series temporales pueden contribuir a distinguir cambios persistentes de variaciones transitorias solo cuando incorporan controles de calidad, comparabilidad temporal y validación ecológica (Wang *et al.*, 2022).

Etapas 4. Series temporales extensas y procesamiento automatizado en la nube ($\approx$ 2020–2025)

Durante el periodo 2020–2025, los estudios del corpus muestran una mayor incorporación de plataformas de procesamiento en la nube, como Google Earth Engine (GEE), y de enfoques automatizados para el análisis de series temporales extensas.

Entre las metodologías disponibles se encuentran algoritmos de detección continua de cambios, como CCDC, desarrollado por Zhu y Woodcock (2014). Estos enfoques permiten analizar rupturas y tendencias a partir de series temporales extensas, desplazando la pregunta desde “¿hubo cambio?” hacia “¿qué trayectoria, duración y velocidad presenta el cambio?”. Trabajos recientes ilustran el uso de series temporales para localizar cambios y describir trayectorias de pérdida, ganancia o restauración (Zhang *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). Sin embargo, el aumento de capacidad computacional no sustituye la validación: una tendencia negativa de una métrica sensible a la humedad, por ejemplo, puede ser compatible con cambios en el estado hídrico de la vegetación, pero también estar influida por condiciones de inundación, estructura del dosel, características del fondo u otros factores. Por ello, su interpretación ecológica requiere contrastarse con evidencia independiente y de campo (Lagomasino *et al.*, 2021; Tran *et al.*, 2022).

Evolución temporal y análisis comparativo de índices espectrales

La figura 2 sintetiza el avance desde clasificaciones estáticas y comparaciones entre fechas hacia series temporales y procesamiento automatizado. Derivado de este recorrido se presenta una matriz comparativa de índices (tabla 6) que organiza su propósito biofísico, sensibilidad ambiental, aplicaciones potenciales y requisitos mínimos de validación. La matriz debe utilizarse como guía contextual y no como una jerarquía universal de índices, ya que el desempeño depende del sitio, sensor, escala temporal y diseño de validación.

**Tabla 6.** Matriz comparativa de índices espectrales aplicados al monitoreo de manglares: propósito biofísico, sensibilidad ambiental, casos de uso recomendados y requisitos de validación empírica.

Índice (Acrónimo)	Qué representa (Propósito biofísico)	Sensibilidad ambiental y limitaciones del índice	Casos de uso recomendados	Requisito mínimo de validación en campo
NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	Respuesta espectral asociada con verdor y cobertura foliar.	Puede saturarse en doseles densos y es sensible al fondo acuático, suelo e inundación; no equivale por sí solo a salud ecosistémica.	Seguimiento de cambios de verdor/ cobertura como señal complementaria, especialmente cuando la saturación es limitada.	Cobertura de dosel, LAI u otra variable estructural/ fenológica compatible con la escala del píxel.
EVI (Índice de Vegetación Mejorado)	Respuesta de vegetación con ajustes para reducir algunos efectos atmosféricos y de fondo.	Puede reducir parte de la saturación y de los efectos de fondo respecto de NDVI, pero depende de estructura del dosel y calidad atmosférica.	Complemento de NDVI en coberturas densas, sujeto a evaluación local.	Variables estructurales del dosel y control de calidad atmosférica.
SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo)	Respuesta de vegetación con ajuste explícito del efecto del suelo.	El parámetro de ajuste y la humedad del fondo pueden modificar la respuesta.	Sectores con cobertura vegetal discontinua o suelo expuesto, con validación temática local.	Proporción de suelo expuesto y cobertura vegetal.
MSAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado)	Variante que reduce la necesidad de fijar manualmente el factor de ajuste del suelo.	Sigue siendo sensible a mezcla de píxeles, bordes e inundación.	Bordes o coberturas raras como complemento de otras métricas.	Cobertura/regeneración y caracterización del fondo.
NDWI de Gao (1996; NIR–SWIR) / NDMI en uso posterior	Respuesta espectral sensible al agua líquida de la vegetación.	También puede variar por inundación, humedad del fondo, estructura del dosel y geometría de adquisición; no constituye un diagnóstico autónomo de estrés.	Caracterización complementaria de cambios en el agua de la vegetación integrada con otras métricas y datos de campo.	Mediciones de contenido hídrico, salinidad/hidropérido u otras variables hidrológicas pertinentes al proceso evaluado.
NDWI de McFeeters (1996; Verde–NIR)	Contraste espectral orientado a la delineación de agua superficial.	Muy sensible a marea, turbidez, suelo saturado y momento de adquisición.	Cartografía de agua superficial y apoyo para estratificar condiciones de inundación.	Nivel de inundación/ hidropérido y referencia espacial de cuerpos de agua.
CMRI (Combined Mangrove Recognition Index)	Combinación de NDVI y NDWI propuesta para discriminar manglar de otras coberturas.	El desempeño depende de umbrales, contexto costero y vegetación adyacente.	Discriminación temática donde la firma combinada sea separable; requiere evaluación de transferibilidad.	Puntos o polígonos independientes de validación temática.

Fuentes conceptuales y metodológicas: Huete (1988); Gao (1996); McFeeters (1996); Huete *et al.* (2002); Kuenzer *et al.* (2011); Gupta *et al.* (2018); Tran *et al.* (2022). La tabla resume sensibilidad espectral y posibles usos; no atribuye diagnósticos ecológicos automáticos.



Discusión

A pesar de los avances en el procesamiento en la nube y de la mayor disponibilidad de datos con alta resolución temporal, la evidencia revisada sugiere que la evaluación de la salud ecosistémica del manglar mediante teledetección continúa representando un desafío metodológico. El incremento de la capacidad computacional no siempre ha estado acompañado por una validación ecológica de campo acorde con los procesos que se pretende interpretar. Por ello, las señales espectrales deben considerarse evidencias indirectas y dependientes del contexto, y no diagnósticos autónomos de la salud ecosistémica del manglar (Friess *et al.*, 2019; Tran *et al.*, 2022).

A partir de la literatura revisada se identificaron ocho brechas metodológicas recurrentes que limitan la comparabilidad y la interpretación ecológica del monitoreo basado en teledetección (tabla 7). Estas brechas se encuentran interrelacionadas y se presentan como áreas de investigación que requie-

ren mayor atención, sin establecer una jerarquía entre ellas.

Atender estas brechas puede contribuir a avanzar desde productos cartográficos predominantemente descriptivos hacia sistemas de monitoreo con mayor trazabilidad ecológica. Entre las líneas de desarrollo identificadas se encuentra la integración de sensores ópticos y SAR, vehículos aéreos no tripulados (UAV), información hiperspectral, métodos de inteligencia artificial y esquemas multifuente, junto con estrategias de validación ecohidrológica y cuantificación de la incertidumbre. Estas tecnologías no sustituyen la calibración y validación local, pero pueden ampliar la continuidad temporal, la resolución espacial y las posibilidades de análisis en ambientes con nubosidad persistente.

La revisión presenta limitaciones que condicionan el alcance de sus inferencias. La búsqueda se restringió a publicaciones en inglés y español, lo que introduce un sesgo idiomático, y el corpus

Tabla 7. Brechas críticas y tareas metodológicas propuestas para fortalecer el monitoreo ecosistémico de manglares.

Brecha crítica	Tarea metodológica propuesta	Prioridad sugerida
Validación ecosistémica	Estandarizar protocolos que relacionen métricas espectrales con biomasa, área basal, salinidad y potencial de oxidación-reducción del agua intersticial, así como hidroperiodo..	Alta
Ruido físico-ambiental	Separar respuestas de vegetación de efectos de marea, turbidez, nubosidad y fenología mediante filtros y diseños temporales comparables.	Alta
Umbral de estrés	Definir con calibración local magnitud, duración y persistencia de cambios espectrales asociados con estrés crónico frente a variabilidad temporal.	Alta
Integración hidrológica	Combinar índices de humedad y vegetación con topografía y métricas de conectividad hidrológica superficial y subterránea.	Alta
Incertidumbre espacial	Reportar intervalos de confianza o capas de incertidumbre y propagar errores de sensor, nubosidad y clasificación.	Alta
Comparación multi-temporal	Comparar técnicas de tendencia y detección de rupturas sobre los mismos sitios y conjuntos de validación.	Alta
Transferibilidad regional	Evaluar qué parámetros requieren recalibración entre sistemas con distinta geomorfología, turbidez, especies dominantes y régimen mareal.	Alta
Línea base de alta resolución	Establecer parcelas permanentes georreferenciadas para calibrar índices y construir referencias estructurales e hidrológicas.	Alta



presentó una distribución geográfica desigual, con una mayor representación de estudios realizados en Asia. En consecuencia, los patrones identificados deben interpretarse en función de la composición del corpus y no asumirse como representativos de todas las regiones de manglar ni transferirse directamente al Neotrópico sin validación en el contexto regional.

También existe un sesgo tecnológico asociado con el predominio de sensores ópticos de acceso abierto y resolución espacial media, particularmente Sentinel-2 y Landsat. En consecuencia, la revisión no representa de manera equivalente los estudios basados en radar de apertura sintética (SAR), sensores hiperespectrales, plataformas comerciales de muy alta resolución o vehículos aéreos no tripulados (UAV). Esta delimitación metodológica permitió concentrar el análisis en fuentes de datos con amplia disponibilidad y continuidad temporal, pero restringe el alcance de la síntesis respecto de configuraciones de monitoreo multifuente.

Finalmente, los estudios incluidos presentan diferencias en los diseños de muestreo, las escalas espaciales y temporales, los algoritmos empleados, la definición de clases y el alcance de la validación de campo. Esta heterogeneidad limita la comparabilidad cuantitativa del desempeño de los índices y, por tanto, la posibilidad de obtener estimaciones integradas de su respuesta entre estudios. En consecuencia, la síntesis permite identificar tendencias metodológicas y condiciones de uso dentro del corpus analizado, pero no estimar tamaños de efecto ni establecer la superioridad universal de un índice. El escalamiento entre la señal satelital y las variables biofísicas, así como la cuantificación explícita de la incertidumbre, deben considerarse en el diseño y la interpretación de futuros estudios (Woodcock & Strahler, 1987; Olofsson *et al.*, 2014; Congalton & Green, 2019).

Aplicación conceptual en Campeche

La aplicación a Campeche se plantea como un ejercicio de traducción metodológica derivado de los patrones identificados en la literatura revisada y no como una validación empírica directa del desempeño de los índices espectrales en la región. Estero Pargo, Jaina y Atasta se seleccionaron como escenarios contrastantes a partir de condiciones documentadas de conectividad hidrológica y presión antrópica en Estero Pargo, acciones de restauración hidrológica y reforestación en Jaina, y variación ambiental estuarina en el sistema Pom-Atasta asociado a Laguna de Términos (CONAFOR, 2016; Gazca-Castro *et al.*, 2024; Vázquez-Rosas-Landa *et al.*, 2025). Estas referencias sustentan la justificación ecológica de los sitios; la tabla 8 conserva el carácter conceptual de las estrategias espectrales propuestas.

- **Estero Pargo.** Estudios recientes documentan diferencias entre zonas con distinta conectivi-

dad hidrológica y describen presiones antropogénicas en el entorno del estero (Vázquez-Rosas-Landa *et al.*, 2025). En este escenario, EVI y NDVI pueden aportar información complementaria sobre la respuesta del dosel, mientras que la formulación NIR-SWIR propuesta por Gao (1996), frecuentemente denominada NDMI en literatura posterior, puede utilizarse como indicador complementario de variaciones asociadas con el agua de la vegetación. Cualquier anomalía debe contrastarse con condiciones de inundación, salinidad, hidroperiodo y datos de campo antes de atribuirla a estrés crónico.

- **Jaina.** La CONAFOR documentó un proyecto de restauración ecológica de manglar desarrollado entre 2012 y 2016, con acciones de rehabilitación hidrológica y regeneración/reforestación en Isla Jaina (CONAFOR, 2016). Este



Tabla 8. Síntesis conceptual de los sitios de aplicación en Campeche. Las características regionales se sustentan en CONAFOR (2016), Gazca-Castro *et al.* (2024) y Vázquez-Rosas-Landa *et al.* (2025); las estrategias espectrales propuestas requieren validación local.

Sitio	Contraste ecohidrológico/geomor- fológico	Desafío de monitoreo	Estrategia conceptual	Justificación ecológica del sitio
Estero Pargo	Conectividad hidrológica variable y sectores descritos como hidrológicamente alterados; presencia de presiones antropogénicas en el entorno (Vázquez-Rosas-Landa <i>et al.</i> , 2025).	Distinguir variación del dosel de señales asociadas con inundación y conectividad.	Sentinel-2; NDVI/EVI junto con la formulación NIR-SWIR de Gao (1996), más validación de hidroperiodo/salinidad.	Ejemplifica un sitio donde la hidrología local y la presión antropogénica deben considerarse antes de interpretar anomalías espectrales.
Jaina	Antecedentes documentados de restauración ecológica con rehabilitación hidrológica y regeneración/reforestación de manglar (CONAFOR, 2016).	Separar la trayectoria de la vegetación de los efectos de la intervención y de la variabilidad natural.	Serie Landsat + Sentinel-2; SAVI/MSAVI cuando exista suelo expuesto; contraste con historia de intervención y campo.	Permite ejemplificar monitoreo de trayectorias antes, durante y después de acciones de restauración.
Atasta	Sistema Pom-Atasta asociado a Laguna de Términos con ambientes dulceacuícolas, oligohalinos y mesohalinos documentados mediante variables fisicoquímicas (Gazca-Castro <i>et al.</i> , 2024).	Separar cambios de verdor/ cobertura de variaciones en agua superficial y condiciones estuarinas.	NDWI para agua superficial y formulación NIR-SWIR de Gao (1996) como complemento, junto con índices de verdor y mediciones locales.	Representa un gradiente estuarino donde la salinidad y otras condiciones ambientales son necesarias para contextualizar la señal óptica.

antecedente hace pertinente una perspectiva histórica: Landsat puede apoyar la reconstrucción de trayectorias de largo plazo y Sentinel-2 aportar mayor detalle en periodos recientes. SAVI o MSAVI pueden resultar útiles cuando existe suelo expuesto, pero la interpretación de recuperación debe contrastarse con la historia de intervención y con observaciones de campo.

- **Atasta.** El sistema fluvio-lagunar Pom-Atasta, asociado a Laguna de Términos, presenta variación ambiental que incluye ambientes dulceacuícolas, oligohalinos y mesohalinos documentados a partir de parámetros fisicoquímicos (Gazca-Castro *et al.*, 2024). En este contexto, NDWI puede apoyar la caracterización de agua superficial y la formulación NIR-SWIR de Gao (1996) puede aportar información complementaria sobre el agua de la vegetación. Estas señales deben contrastarse con salinidad, hidroperiodo y otras mediciones locales; una disminución espectral no debe interpretarse de manera inequívoca como evidencia de estrés.

Consideraciones metodológicas para su aplicación

A partir de la evidencia sintetizada en la revisión, se plantean consideraciones metodológicas para futuros estudios en estos tres sitios, orientadas a reducir la influencia de fuentes de variabilidad ambiental y fortalecer la interpretación ecológica de las señales espectrales. Estas consideraciones incluyen la comparabilidad temporal, el control de factores hidrometeorológicos, la validación de campo y el análisis multíndice, y deberán ajustarse a las características locales de cada sitio.

- **Integración temporal y espacial.** Integrar el registro histórico de Landsat para analizar trayectorias de cambio de largo plazo con la mayor frecuencia de observación y resolución espacial de Sentinel-2, disponible desde 2015, para caracterizar con mayor detalle la variabilidad temporal y espacial en periodos recientes.
- **Control estacional e hidrometeorológico:** Aplicar procedimientos consistentes de enmascaramiento de nubes y controlar, de ma-

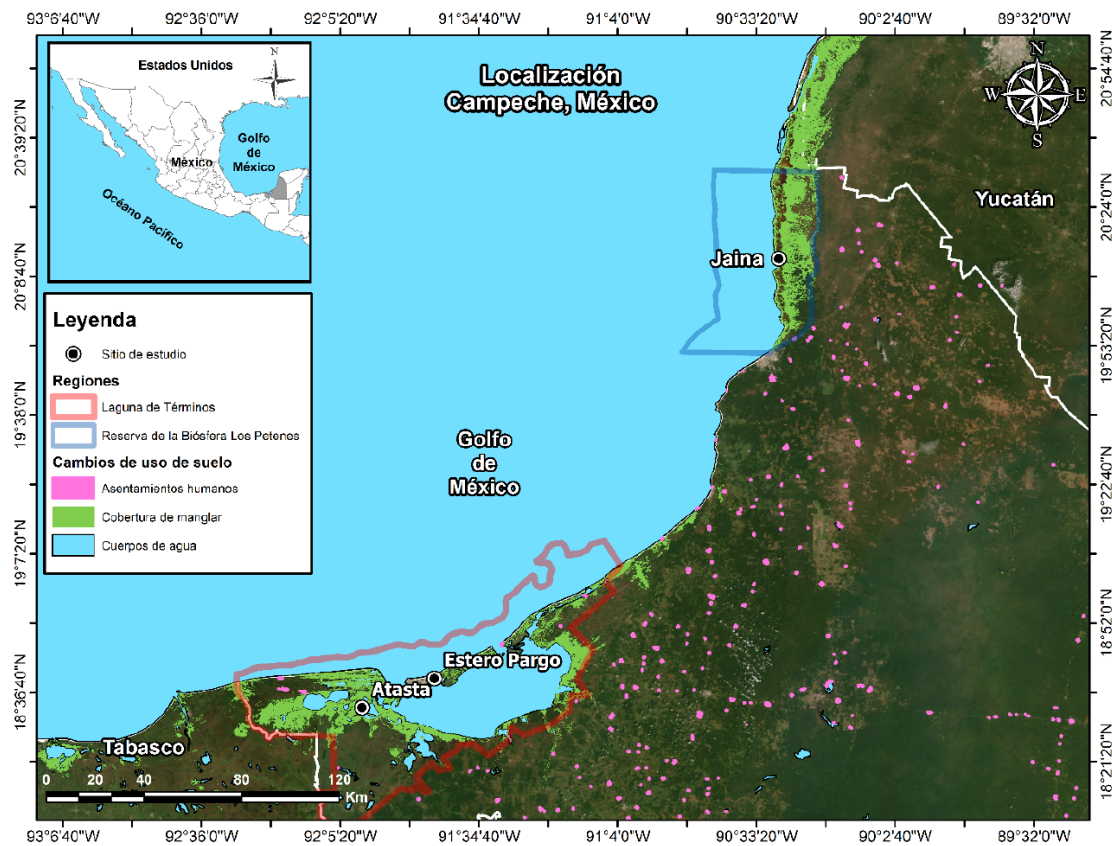


Figura 3. Localización geográfica de las áreas de aplicación conceptual en el litoral de Campeche, México: Jaina, Estero Pargo y Atasta.

nera independiente, las principales fuentes de variabilidad temporal. Las comparaciones multitemporales deberán realizarse entre imágenes correspondientes a periodos estacionales equivalentes, mientras que la influencia de la marea deberá considerarse mediante información sobre las condiciones mareales durante la adquisición de las imágenes. Este procedimiento permitirá reducir la posibilidad de atribuir a cambios ecológicos variaciones espectrales asociadas con la estacionalidad o con las condiciones de inundación.

- **Validación empírica estratificada.** La validación de campo no deberá limitarse a comprobar la presencia o ausencia de cobertura de manglar, sino incorporar variables estructurales, como área basal y regeneración; hidrológicas, como el hidroperiodo; y fisicoquímicas, como

la salinidad y el potencial de oxidación-reducción del agua intersticial. La selección de estas variables deberá guardar correspondencia con el proceso ecológico y la métrica espectral que se pretenda interpretar.

Producto de gestión: Tipologías funcionales dinámicas

Como producto de gestión, se propone explorar una tipología funcional dinámica basada en la convergencia de índices de verdor y humedad. Las categorías siguientes son hipótesis operativas que requieren umbrales calibrados localmente y no deben emplearse como diagnósticos automáticos de salud ecosistémica:

- **Condición relativamente estable:** polígonos con trayectorias multitemporales persistentes de verdor y humedad dentro de rangos defi-



nidos por una línea base local. Esta señal sería compatible con estabilidad, pero debe contrastarse con conectividad hidrológica y datos de campo.

- **Posible estrés hidrológico incipiente:** zonas donde el índice de verdor permanece relativamente estable y un índice de humedad muestra una disminución persistente. El patrón puede funcionar como alerta para priorizar verificación de salinidad, hidroperiodo y otras causas.
- **Posible degradación:** áreas con disminución simultánea y persistente de métricas de vigor y humedad. La atribución a perturbaciones específicas requiere descartar efectos de marea,

nubes, suelo expuesto y diferencias de adquisición.

- **Posible recuperación:** sectores con tendencias positivas sostenidas en métricas de humedad y vigor después de una perturbación o intervención. La interpretación como resiliencia natural o éxito de restauración requiere comparación con una línea base y evidencia de campo.

La aplicación de este marco podría ayudar a priorizar zonas para inspección, conservación o restauración, siempre que las categorías se utilicen como señales de apoyo a la decisión y no como sustitutos de la evaluación ecológica. Su validación en Campeche constituye una etapa futura necesaria.

Conclusiones

La presente revisión sugiere que la teledetección aplicada a manglares ha transitado desde enfoques predominantemente cartográficos y descriptivos hacia análisis multitemporales orientados a caracterizar trayectorias de cambio y apoyar su interpretación ecológica. El NDVI aporta información sobre características del dosel y la cobertura vegetal, pero su uso aislado resulta insuficiente para representar la salud ecosistémica del manglar. La integración contextual de índices sensibles al verdor, la humedad de la vegetación y la presencia de agua puede proporcionar información complementaria, siempre que su interpretación considere el régimen mareal, la estructura del dosel, las escalas espacial y temporal de observación y la validación ecológica de campo.

En Campeche, las series multitemporales de Landsat y Sentinel-2 pueden proporcionar una base para desarrollar esquemas de monitoreo que integren la variabilidad espacial y temporal de los manglares; sin embargo, la propuesta regional presentada en este estudio es conceptual y requiere validación empírica. Las investigaciones futuras podrían incorporar enfoques multifuente que integren sensores ópticos y SAR, vehículos aéreos no tripulados (UAV), información hiperespectral y métodos de inteligencia artificial, junto con parcelas permanentes y mediciones ecohidrológicas. La cuantificación de la incertidumbre y el análisis del escalamiento entre las observaciones de campo y la señal satelital serán necesarios para evaluar la transferibilidad y la utilidad operativa de estas herramientas en el monitoreo y la gestión de los manglares.

Agradecimientos

Se agradece al Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud UAM y la UAC por su respaldo institucional. Esta investigación fue financiada por SE-CIHTI mediante una beca de estudios de posgrado

(CVU: 1001721). Los autores declaran no tener conflictos de interés. La matriz de análisis bibliográfico (n=40) se encuentra disponible en el Material Suplementario.



Referencias

- Alongi, D.M. 2012. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3): 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>.
- Baloloy, A.B., Blanco, A.C., Ana, R.R.C., Nadaoka, K. 2020. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 166: 95–117.
- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R.M., Rebelo, L.-M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M., Finlayson, C.M. 2018. The Global Mangrove Watch—A New 2010 Global Baseline of Mangrove Extent. *Remote Sens.*, 10: 1669. <https://doi.org/10.3390/rs10101669>.
- CONABIO. 2020. Sistema de Monitoreo de los Manglares de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- CONAFOR. 2016. Regeneran 217 mil plantas de manglar en Isla Jaina Campeche. Comisión Nacional Forestal, Gobierno de México, 9 de diciembre de 2016. <https://www.gob.mx/conafor/prensa/regenera-conafor-217-mil-plantas-de-manglar-en-isla-jaina-campeche?idiom=es-MX>.
- Congalton, R.G., Green, K. 2019. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices, third ed. CRC Press.
- Costanza, R., Norton, B.G., Haskell, B.D. (Eds.). 1992. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Island Press, Washington, DC.
- Ellison, J.C. 2020. Mangrove vulnerability and resilience to climate change. *Wetlands Ecol. Manage.*, 28: 509–526.
- FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. FAO. 2023. The World's Mangroves 2000–2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO. 2023. The World's Mangroves 2000–2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Flores-de-Santiago, F., Rodríguez-Sobeyra, R., Álvarez-Sánchez, L.F., Valderrama-Landeros, L., Amezcua, F., Flores-Verdugo, F. 2023. Understanding the natural expansion of white mangrove (*Laguncularia racemosa*) in an ephemeral inlet based on geomorphological analysis and remote sensing data. *J. Environ. Manage.*, 338: 117820. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117820>.
- Friess, D.A., Rogers, K., Lovelock, C.E., Krauss, K.W., Hamilton, S.E., Lee, S.Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., Shi, S. 2019. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 44: 89–115.
- Gao, B.C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.*, 58: 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
- Gazca-Castro, M., Aguirre-León, A., Díaz-Ruiz, S., Álvarez-Hernández, S. 2024. El ambiente como factor que estructura la comunidad de peces del sistema fluvio-lagunar Pom-Atasta, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 34(3): 153–166. <https://doi.org/10.24275/BPOE8175>.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L.L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J.G., Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 20: 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>.
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N., Fatoyinbo, T. 2020. Global declines in human-driven mangrove loss. *Glob. Change Biol.*, 26: 5844–5855. <https://doi.org/10.1111/gcb.15275>.
- Green, E.P., Mumby, P.J., Edwards, A.J., Clark, C.D. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. Coastal Management Sourcebooks 3, UNESCO.
- Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Majumdar, S.D., Samanta, S., Mitra, D., Samal, R.N., Pattnaik, A.K., Hazra, S. 2018. An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5: 1129–1139. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.011>.
- Haddaway, N.R., Macura, B., Whaley, P., Pullin, A.S. 2018. ROSES RepOrting standards for Systematic Evidence Syntheses: pro forma, flow-diagram and descriptive summary of the plan and conduct of environmental systematic reviews and systematic maps. *Environmental Evidence*, 7: 7. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0121-7>.
- Hamilton, S.E., Casey, D. 2016. Creation of a high spatio-temporal resolution global database of continuous mangrove forest cover for the 21st century (CGMFC-21). *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 25: 729–738. <https://doi.org/10.1111/geb.12449>.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25: 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 83: 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Kauffman, J.B., Donato, D.C. 2012. Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass, and carbon stocks in mangrove forests. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T.V., Dech, S. 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sens.*, 3: 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>.
- Kotikot, S.M., Spencer, O., Cissell, J.R., Connette, G., Smithwick, E.A.H., Durdall, A., Grimes, K.W., Stewart, H.A., Tzadik, O., Canty, S.W.J. 2024. Building a mangrove



- ecosystem monitoring tool for managers using Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. *Ocean Coast. Manage.*, 256: 107307. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107307>.
- Lagomasino, D., Fatoyinbo, T., Castañeda-Moya, E., Cook, B.D., Montesano, P.M., Neigh, C.S.R., Corp, L.A., Ott, L.E., Chavez, S., Morton, D.C. 2021. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in southwest Florida following Hurricane Irma. *Nat. Commun.*, 12: 4003. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24253-y>.
- Lee, C.K.F., Duncan, C., Nicholson, E., Fatoyinbo, T.E., Lagomasino, D., Thomas, N., Worthington, T.A., Murray, N.J. 2021. Mapping the Extent of Mangrove Ecosystem Degradation by Integrating an Ecological Conceptual Model with Satellite Data. *Remote Sens.*, 13: 2047. <https://doi.org/10.3390/rs13112047>.
- Li, Q., Bonebrake, T.C., Michalski, J.R., Wong, F.K.K., Fung, T. 2023. Combining multi-temporal airborne LiDAR and Sentinel-2 multispectral data for assessment of disturbances and recovery of mangrove forests. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 291:108444. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108444>.
- López-Portillo, J., Lewis III, R.R., Saenger, P., Rovai, A., Koedam, N., Dahdouh-Guebas, F., Rivera-Monroy, V.H. 2017. Mangrove forest restoration and rehabilitation, pp. 301–345. In: Rivera-Monroy, V.H., et al. (Eds.), *Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective*. Springer.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 17: 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Müller, F., Burkhard, B. 2012. The indicator side of ecosystem services. *Ecosystem Services*, 1(1): 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.06.001>.
- Mukhopadhyay, A., Wheeler, D., Dasgupta, S., Dey, A., Soibhan, I. 2019. Mangrove Spatial Distribution in the Indian Sundarbans: Predicting Salinity-Induced Migration in a Changing Climate. *J. Manage. Sustain.*, 9(1): 1–13. <https://doi.org/10.5539/jms.v9n1p1>.
- Nardin, W., Locatelli, S., Pasquarella, V., Rulli, M.C., Woodcock, C.E., Fagherazzi, S. 2016. Dynamics of a fringe mangrove forest detected by Landsat images in the Mekong River Delta, Vietnam. *Earth Surf. Process. Landforms*, 41(14): 2024–2037. <https://doi.org/10.1002/esp.3968>.
- Nguyen, H.H., McAlpine, C., Pullar, D., Johansen, K., Duke, N.C. 2013. The relationship of spatial-temporal changes in fringe mangrove extent and adjacent land-use: Case study of Kien Giang coast, Vietnam. *Ocean Coast. Manage.*, 76: 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.01.003>.
- Olofsson, P., Foody, G.M., Herold, M., Stehman, S.V., Woodcock, C.E., Wulder, M.A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sens. Environ.*, 148: 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., et al. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372: n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Pham Minh Hai, Pham Hong Tinh, Nguyen Phi Son, Tran Van Thuy, Nguyen Thi Hong Hanh, Sharma, S., Do Thi Hoai, Vu Cong Duy. 2022. Mangrove health assessment using spatial metrics and multi-temporal remote sensing data. *PLoS ONE*, 17(12): e0275928. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275928>.
- Rapport, D.J., Costanza, R., Epstein, P.R., Gaudet, C., Levins, R. (Eds.). 1998. *Ecosystem Health*. Blackwell Science, Oxford.
- Rivera-Monroy, V.H., Elliton, C., Narra, S., Meselhe, E., Zhao, X., White, E., Sasser, C.E., Visser, J.M., Meng, X., Wang, H., Xue, Z., Jaramillo, F. 2019. Wetland Biomass and Productivity in Coastal Louisiana: Base Line Data (1976–2015) and Knowledge Gaps for the Development of Spatially Explicit Models for Ecosystem Restoration and Rehabilitation Initiatives. *Water*, 11: 2054. <https://doi.org/10.3390/w11102054>.
- Rodríguez-Zúñiga, M.T., Troche-Souza, C., Vázquez-Lule, A.D., Márquez-Mendoza, J.D., Vázquez-Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Velázquez-Salazar, S., Cruz-López, M.I., Ressler, R., Uribe-Martínez, A., Cerdeira-Estrada, S., Acosta-Velázquez, J., Díaz-Gallegos, J., Jiménez-Rosenberg, R., Fueyo-Macias, L., Galindo-Leal, C. 2013. *Manglares de México: Extensión, distribución y dinámica (1970-2005)*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Romañach, S.S., DeAngelis, D.L., Koh, H.L., Li, Y., Teh, S.Y., Raja Barizan, R.S., Zhai, L. 2018. Conservation and restoration of mangroves: Global status, perspectives, and prognosis. *Ocean Coast. Manage.*, 154: 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.009>.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in: *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, vol. 1. NASA SP-351, pp. 309–317.
- Santos, L.C.M., Bitencourt, M.D. 2016. Remote sensing in the study of Brazilian mangroves: review, gaps in the knowledge, new perspectives and contributions for management. *J. Integr. Coast. Zone Manag.*, 16(3): 245–261. <https://doi.org/10.5894/rgci662>.
- Simard, M., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V.H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N., Van der Stocken, T. 2019. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nat. Geosci.*, 12: 40–45. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0279-1>.
- Spalding, M., Kainuma, M., Collins, L. 2010. *World Atlas of Mangroves*. Earthscan, London.
- Tran, T.V., Reef, R., Zhu, X. 2022. A review of spectral indices for mangrove remote sensing. *Remote Sens.*, 14: 4868. <https://doi.org/10.3390/rs14194868>.



- Valderrama-Landeros, L., Cruz-López, M.I., Rodríguez-Zúñiga, M.T., Ressler, R., Colditz, R.R. 2017. Manglares de México: Actualización y análisis de los datos 2015. CO-NABIO.
- Vázquez-Rosas-Landa, M., Pérez-Ceballos, R., Zaldívar-Jiménez, A., Hereira, S., Pérez González, L., Prieto-Davó, A., Celis-Hernández, O., Canales-Delgadillo, J.C. 2025. Impact of seasonal flooding and hydrological connectivity loss on microbial community dynamics in mangrove sediments of the southern Gulf of Mexico. *PeerJ*, 13:e19371. <https://doi.org/10.7717/peerj.19371>.
- Wang, Y., Wang, X., Khan, S., Zhou, D., Ke, Y. 2023. Evaluation of mangrove restoration effectiveness using remote sensing indices - a case study in Guangxi Shankou Mangrove National Natural Reserve, China. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1280373. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1280373>.
- Wang, X., Xiao, X., Zou, Z., Dong, J., Qin, Y., Doughty, R.B., Menarguez, M.A., Chen, B., Wang, J., Ma, J., Li, B. 2022. Mapping tidal flats dynamics using time-series Sentinel-2 images. *Remote Sens. Environ.*, 270: 112850.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, 21: 311–332.
- Worthington, T.A., Spalding, M. 2019. Mangrove restoration needs to be mindful of the future. *Science*, 365: 453–453.
- Worthington, T.A., zu Ermgassen, P.S.E., Friess, D.A., Krauss, K.W., Lovelock, C.E., Thorley, J., Spalding, M. 2020. Harnessing Big Data to support the conservation and rehabilitation of mangrove forests globally. *One Earth*, 2: 429–443. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.04.018>.
- Wu, J., Jones, K.B., Li, H., Loucks, O.L. (Eds.). 2006. Scaling and uncertainty analysis in ecology: Methods and applications. Springer.
- Zhang, Z., Ahmed, M.R., Zhang, Q., Li, Y., Li, Y.. 2023. Monitoring of 35-Year Mangrove Wetland Change Dynamics and Agents in the Sundarbans Using Temporal Consistency Checking. *Remote Sens.*, 15: 625. <https://doi.org/10.3390/rs15030625>.
- Zhu, Z., Woodcock, C.E., 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sens. Environ.* 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>.
- Zhu, Z., Wulder, M.A., Roy, D.P., Woodcock, C.E., Hansen, M.C., Radeloff, V.C., Healey, S.P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J.-F., Lymburner, L., Pahlevan, N., Scambos, T.A. 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sens. Environ.*, 224: 382–385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>.



Anexos

Anexo S1. Síntesis de la literatura seleccionada: Metodología aplicada, hallazgos clave, brechas metodológicas y aplicaciones principales en el monitoreo de manglares

Autor y Año	Metodología Aplicada (Sensores/ Técnicas)	Síntesis del aporte reportado	Brechas Metodológicas Identificadas	Enfoque	Aplicación considerada en esta revisión
Rouse <i>et al.</i> (1974)	Formulación teórica / Landsat MSS	Relacionó combinaciones espectrales rojo–NIR con vegetación verde; antecedente del desarrollo del NDVI.	No fue formulado para manglares ni para ambientes intermareales.	Metodológico	Antecedente de métricas de verdor.
Huete (1988)	Modelación espectral empírica	Propuso SAVI para reducir la influencia del brillo del suelo sobre la respuesta de la vegetación.	El parámetro de ajuste y las condiciones del fondo requieren contextualización local.	Metodológico	Tratamiento del efecto del suelo.
Gao (1996)	Análisis de reflectancia SWIR	Propuso NDWI (NIR–SWIR) para el agua líquida de la vegetación; esta formulación se denomina frecuentemente NDMI en literatura posterior.	No separa por sí solo efectos de inundación, fondo y estructura del dosel.	Metodológico	Información complementaria sobre agua de la vegetación.
McFeeters (1996)	Análisis multiespectral (Verde/NIR)	Propuso NDWI verde–NIR para favorecer la delineación de agua abierta.	Puede confundir agua abierta con otras superficies según el contexto espectral.	Metodológico	Delineación de agua superficial.
Green <i>et al.</i> (2000)	Clasificación supervisada / Landsat TM	Mapeo regional viable con sensores ópticos	Baja resolución en polígonos pequeños	Descriptivo	Cartografía base
Huete <i>et al.</i> (2002)	Comparación MODIS (EVI vs NDVI)	Evaluó el desempeño radiométrico y biofísico de NDVI/EVI de MODIS; EVI fue diseñado para mejorar sensibilidad en alta biomasa.	Requiere banda azul y control de calidad atmosférica.	Metodológico	Antecedente para métricas de vegetación en doseles densos.
Kuenzer <i>et al.</i> (2011)	Revisión del estado del arte	Sintetizó aplicaciones, sensores y limitaciones de la teledetección de manglares.	Identificó heterogeneidad metodológica y necesidades de validación.	Metodológico	Marco metodológico para manglares.
Giri <i>et al.</i> (2011)	Análisis global multitemporal / Landsat	Generó una cartografía global consistente de extensión de manglar con Landsat.	La extensión cartográfica no equivale a condición o función ecológica.	Descriptivo	Línea base de distribución global.
Alongi (2012)	Revisión ecológica global	Sintetizó la elevada densidad de carbono y el papel de los manglares en el secuestro de carbono.	Es una referencia ecológica contextual, no un estudio de teledetección.	Ecológico	Contexto de carbono azul.


Anexo S1. Síntesis de la literatura seleccionada: Metodología aplicada, hallazgos clave, brechas metodológicas y aplicaciones principales en el monitoreo de manglares

Autor y Año	Metodología Aplicada (Sensores/ Técnicas)	Síntesis del aporte reportado	Brechas Metodológicas Identificadas	Enfoque	Aplicación considerada en esta revisión
Zhu & Woodcock (2014)	Continuous Change Detection and Classification (CCDC) / Landsat	Desarrolló CCDC para detección y clasificación continua de cambios con el archivo Landsat.	La aplicación en manglares requiere controlar variabilidad mareal, nubosidad e inundación.	Metodológico	Análisis de series temporales y cambios.
Hamilton & Casey (2016)	Series temporales Landsat	Generó una base global anual de cobertura continua de manglar para 2000–2012.	Se orienta a cobertura; no implica por sí sola evaluación funcional.	Descriptivo	Tendencias históricas de cobertura.
López-Portillo <i>et al.</i> (2017)	Campo + percepción remota	Sintetizó principios y enfoques de restauración y rehabilitación de manglares.	Referencia principalmente ecológica/contextual; la transferencia a monitoreo espectral requiere diseño específico.	Ecológico	Contexto para interpretar restauración.
Gupta <i>et al.</i> (2018)	Índice CMRI	Propuso CMRI combinando NDVI y NDWI y reportó mejora de discriminación en los sitios evaluados.	La transferibilidad requiere validación en otras costas.	Metodológico	Discriminación temática de manglar.
Romañach <i>et al.</i> (2018)	Modelación ecohidrológica	Revisó el estado, perspectivas y desafíos de conservación y restauración de manglares.	La revisión no establece una relación espectral universal con resiliencia.	Gestión	Contexto de conservación/restauración.
Friess <i>et al.</i> (2019)	Revisión sistemática	Pérdida continúa pese a áreas protegidas	Falta monitoreo continuo operativo	Gestión	Evaluación de conservación
Bunting <i>et al.</i> (2018)	Global Mangrove Watch / ALOS + Landsat	Generó una línea base global de extensión de manglar para 2010 mediante clasificación ALOS PALSAR + Landsat.	El producto caracteriza extensión/ cobertura, no salud ecosistémica por sí sola.	Gestión	Línea base global de extensión.
Baloloy <i>et al.</i> (2020)	Índice MVI / Sentinel-2	Propuso MVI con bandas verde, NIR y SWIR1 de Sentinel-2 para apoyar el mapeo de manglares.	La transferibilidad debe evaluarse fuera de los sitios de validación.	Metodológico	Mapeo rápido de manglar.
Goldberg <i>et al.</i> (2020)	Metaanálisis espacial	Cuantificó la disminución global de pérdidas de manglar impulsadas por actividades humanas y distinguió presiones humanas y naturales.	Los patrones globales no sustituyen el diagnóstico local.	Ecológico	Contexto de pérdida y presiones.
FAO / CONABIO (2020)	Informes y cartografía	Actualización de superficie y presión humana	Enfoque estático sin modelación	Descriptivo	Referencia estadística


Anexo S1. Síntesis de la literatura seleccionada: Metodología aplicada, hallazgos clave, brechas metodológicas y aplicaciones principales en el monitoreo de manglares

Autor y Año	Metodología Aplicada (Sensores/ Técnicas)	Síntesis del aporte reportado	Brechas Metodológicas Identificadas	Enfoque	Aplicación considerada en esta revisión
Nardin <i>et al.</i> (2016)	Series Landsat + SRTM / dinámica de borde de manglar	Analizó dos décadas de imágenes Landsat para caracterizar expansión y variación del dosel de un manglar de borde en el delta del Mekong y relacionó los patrones con procesos físicos costeros.	Caso regional; la relación entre NDVI, sedimentación, oleaje y expansión del manglar depende del contexto geomorfológico.	Metodológico	Dinámica de expansión y relación entre señal espectral y procesos geomorfológicos.
Lagomasino <i>et al.</i> (2021)	Landsat + campo	Integró LiDAR, imágenes satelitales y campo para relacionar mortalidad post-Irma con marejada, encharcamiento y aislamiento hidrológico.	Los mecanismos corresponden a un evento y región específicos.	Metodológico	Vinculación de observaciones remotas con procesos hidrológicos.
Zhu <i>et al.</i> (2019)	Series Landsat en nube	Describió los beneficios científicos y operativos de la política de datos Landsat libres y abiertos.	Es una referencia de política de datos, no un algoritmo específico de manglares.	Metodológico	Contexto de disponibilidad de series Landsat.
Lee <i>et al.</i> (2021)	Modelo conceptual ecológico + datos satelitales de acceso abierto	Integró un modelo conceptual de degradación con variables derivadas de observación de la Tierra para cartografiar la extensión de la degradación del ecosistema de manglar.	La clasificación depende de la selección de variables y de la validación; no constituye por sí sola una atribución causal del proceso de degradación.	Metodológico	Cartografía de degradación con vínculo explícito entre variables satelitales y conceptos ecológicos.
Tran <i>et al.</i> (2022)	Revisión metodológica	Revisó el uso de índices espectrales en teledetección de manglares y documentó el predominio del NDVI y la expansión de enfoques multíndice.	La heterogeneidad de objetivos y validación limita comparaciones universales.	Metodológico	Síntesis de índices espectrales.
Wang <i>et al.</i> (2022)	NDWI multitemporal	Aplicó series Sentinel-2 para cartografiar dinámica de planicies mareales, mostrando la importancia del contexto intermareal.	La señal intermareal depende del momento de adquisición y de la inundación.	Metodológico	Contexto para control de variabilidad mareal.
Pham Minh Hai <i>et al.</i> (2022)	Métricas espaciales + teledetección multitemporal	Evaluó la salud del manglar mediante métricas espaciales y datos multitemporales para caracterizar cambios de extensión y fragmentación.	Estudio regional; las métricas de patrón no sustituyen variables fisiológicas ni establecen umbrales universales de salud.	Metodológico	Evaluación espacial de condición, cambio y fragmentación del manglar.



Anexo S1. Síntesis de la literatura seleccionada: Metodología aplicada, hallazgos clave, brechas metodológicas y aplicaciones principales en el monitoreo de manglares

Autor y Año	Metodología Aplicada (Sensores/ Técnicas)	Síntesis del aporte reportado	Brechas Metodológicas Identificadas	Enfoque	Aplicación considerada en esta revisión
Nguyen <i>et al.</i> (2013)	Landsat TM + SPOT; clasificación supervisada multi-temporal	Evaluó cambios espaciotemporales en la extensión y anchura del manglar y su relación con usos del suelo adyacentes en la costa de Kien Giang, Vietnam.	Estudio regional centrado en extensión y cambio de uso del suelo; no constituye por sí solo una evaluación integral de salud ecosistémica.	Ecológico	Cambios de extensión del manglar y relación con usos del suelo costero.
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Tendencias NDVI (35 años)	Desarrolló un enfoque de consistencia temporal para cartografiar pérdidas y ganancias de manglar durante 35 años.	La interpretación de agentes de cambio depende del contexto del Sundarbans y del diseño del algoritmo.	Metodológico	Detección anual de cambio con series Landsat.
Flores-de-Santiago <i>et al.</i> (2023)	Análisis geomorfológico + teledetección espacial y temporal	Analizó la expansión natural de <i>Laguncularia racemosa</i> en una boca efímera de México integrando información geomorfológica y datos de teledetección.	Caso local; la relación entre dinámica hidrosedimentaria y expansión del manglar requiere contrastarse en otros sistemas costeros.	Ecológico	Expansión natural, colonización y dinámica geomorfológica costera.
Li <i>et al.</i> (2023)	Sentinel-2 multitemporal + LiDAR aéreo	Integró NDVI derivado de Sentinel-2 y estructura de dosel obtenida con LiDAR para evaluar perturbaciones y recuperación de bosques de manglar.	La recuperación del verdor espectral puede ocurrir antes que la recuperación estructural del dosel; se requiere complementar información espectral y estructural.	Ecológico	Perturbación, resistencia y recuperación del manglar.
Santos & Bitencourt (2016)	Revisión de teledetección aplicada a manglares de Brasil	Sintetizó aplicaciones, limitaciones, vacíos de conocimiento y perspectivas de la teledetección para el estudio y manejo de manglares brasileños.	La diversidad de sensores, escalas y enfoques limita comparaciones directas y refuerza la necesidad de validación de campo.	Metodológico	Revisión de aplicaciones y vacíos de teledetección en manglares.
Rivera-Monroy <i>et al.</i> (2019)	Síntesis de biomasa/ productividad y vacíos para modelación espacial	Compiló líneas base de biomasa y productividad de humedales costeros de Louisiana y discutió necesidades para modelos espacialmente explícitos de restauración.	No es un estudio de índices espectrales de manglar; se utiliza como referencia contextual sobre integración de datos y restauración de humedales costeros.	Ecológico	Contexto ecohidrológico y de restauración de humedales costeros.
Spalding <i>et al.</i> (2010)	Atlas global cartográfico	Compiló información global sobre distribución y contexto biogeográfico de manglares.	No constituye una evaluación espectral de condición ecológica.	Descriptivo	Contexto biogeográfico global.


Anexo S1. Síntesis de la literatura seleccionada: Metodología aplicada, hallazgos clave, brechas metodológicas y aplicaciones principales en el monitoreo de manglares

Autor y Año	Metodología Aplicada (Sensores/ Técnicas)	Síntesis del aporte reportado	Brechas Metodológicas Identificadas	Enfoque	Aplicación considerada en esta revisión
Simard <i>et al.</i> (2019)	LiDAR + sensores ópticos	Relacionó altura global del dosel y carbono con variables climáticas usando observaciones remotas y datos de campo.	La estructura del dosel no equivale por sí sola a salud ecosistémica.	Metodológico	Caracterización estructural global.
Worthington & Spalding (2019)	Análisis global de vulnerabilidad	Pérdida acelerada por cambio climático	No distingue presiones locales	Ecológico	Conservación global
Mukhopadhyay <i>et al.</i> (2019)	Evaluación espacial + escenarios de salinidad	Modeló la distribución espacial de manglares del Sundarbans y exploró cambios potenciales en la distribución de especies asociados con salinización futura.	El estudio se orienta a escenarios de distribución y salinidad; no constituye una validación directa de índices espectrales de salud.	Ecológico	Contexto de salinización, distribución de especies y cambio climático.
Ellison (2020)	Revisión ecofuncional	Resiliencia depende de sedimentación e hidropérido	Falta calibración satelital con acreción	Ecológico	Resiliencia climática
Worthington <i>et al.</i> (2020)	Modelos espaciales climáticos	Sintetizó grandes conjuntos de datos globales y su utilidad para conservación y rehabilitación de manglares.	La traducción de productos globales a decisiones locales requiere validación contextual.	Gestión	Uso de Big Data para conservación/ restauración.
Kotikot <i>et al.</i> (2024)	Sentinel-2 + Google Earth Engine	Desarrolló una herramienta de monitoreo de manglares para gestores basada en imágenes Sentinel-2 y procesamiento en Google Earth Engine.	La transferibilidad operativa depende de la calibración local, la calidad de las observaciones y la interpretación contextual de degradación y recuperación.	Metodológico	Monitoreo operativo y apoyo a la gestión con Sentinel-2.
Kuenzer <i>et al.</i> (2022)	Revisión avanzada	Sentinel-2 estándar actual de monitoreo	Falta flujo metodológico estandarizado	Metodológico	Estandarización
Wang <i>et al.</i> (2023)	Índices NDVI/ NDMI	Propuso índices basados en cambios de área y NDVI para evaluar trayectorias de restauración en un caso de estudio.	La recuperación de vegetación no equivale automáticamente a recuperación integral de funciones ecosistémicas.	Gestión	Seguimiento de restauración.



Anexo S2. Prompt documentado para la generación asistida por inteligencia artificial de la figura 2

Declaración de uso de IA. La figura 2 fue generada con asistencia de ChatGPT (OpenAI), utilizando la versión disponible en la plataforma entre enero y marzo de 2026. El identificador exacto del modelo no se conserva. La composición obtenida fue revisada por los autores antes de su incorporación al manuscrito. El texto siguiente corresponde a una versión documentada y editorialmente normalizada del prompt empleado, conservando sus elementos sustantivos, estructura, etiquetas, fórmulas y referencias visuales. No se generó nuevamente la imagen como parte de esta revisión.

Prompt documentado (adaptado para su presentación editorial):

Create a detailed, professional scientific infographic titled 'Evolución Metodológica en el Monitoreo de Manglares'. Use a clean, publication-ready infographic style on a white background, without gradients, with a balanced green-and-blue color palette. All visible labels and explanatory text must be legible and written in Spanish. Organize the composition as a clear horizontal, grid-based timeline that synthesizes the methodological evolution of mangrove monitoring.

STRUCTURE 1 — MÉTODOS. Place a green horizontal arrow labeled 'MÉTODOS' across the upper section and organize it into three chronological blocks: early approaches (approximately 1970s–1990s), '2000s–2015', and '2020 en Adelante'. In the first block, show two juxtaposed bitemporal satellite images labeled 'Mayo 98' and 'Mayo 99', connected by an arrow to a simple bar chart, with the caption: 'Comparación Bitemporal Básica: Cambios entre dos imágenes'. In the second block, include the heading 'Series Temporales' and the explanatory text 'Monitoreo multisensor de la dinámica de manglares', together with a detailed temporal line graph. In the third block, include 'Algoritmos de Ruptura + IA: Detección Temprana de Perturbaciones Ecológicas', with visual references to cloud processing, Google Earth Engine, PlanetScope and satellite imagery, plus

an analytical circular graphic containing vegetation and a magnifying-glass symbol.

STRUCTURE 2 — ÍNDICES. Add a second green horizontal arrow labeled 'ÍNDICES'. Represent the methodological transition from 'NDVI' to 'EVI / SAVI / MSAVI', followed by moisture-sensitive indices and 'Combinaciones Multiíndice'. For the NDVI block, display the formula ' $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ ' and the text 'Diferencia Normalizada de Vegetación'. For the EVI / SAVI / MSAVI block, show a mangrove stand with visible soil and exposed roots to represent correction for soil/background effects. For the moisture and multi-index block, use the NIR–SWIR formulation proposed by Gao (1996), originally named NDWI and frequently referred to as NDMI in later literature: ' $(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$ '. Label it as a moisture/water-content-sensitive vegetation metric rather than a direct diagnostic of ecosystem health. Emphasize that the final stage combines several spectral indicators rather than presenting a single index as universally superior.

STRUCTURE 3 — SENSORES Y EVENTOS CLAVE. In the lower section, construct a wide green timeline divided into '1980s–1990s', '2000s–2015' and '2020 en Adelante'. For the first period, include 'Landsat 1 (1972)' and 'Landsat 5 (1984)' with satellite imagery and simple charts. Add the descriptions 'Primer mapeo de manglares: análisis visual de cambios simples' and 'Análisis multitemporal: corrección de la influencia de vegetación y suelos expuestos'. For the 2000s–2015 period, include 'Landsat 7 + MODIS' and 'Landsat 8 (2013)', accompanied by line graphs and the descriptions 'Monitoreo más frecuente para detectar degradación' and 'Vigilancia detallada de cambios y procesos en manglares a largo plazo'. For '2020 en Adelante', include 'Sentinel-2' and 'PlanetScope', satellite icons and detailed remote-sensing scenes. Add the descriptions 'Seguimiento de alta frecuencia mediante sensores ópticos y enfoques multi-fuente' and 'Algoritmos avanzados para detectar perturbaciones y cambios subyacentes'. Include detailed



illustrations of mangrove canopies, layered satellite observations and magnifying-glass elements to convey monitoring and diagnostic analysis.

TIMELINE AND REFERENCES. Immediately above the reference line, add a smaller chronological strip with the periods '1970s–1980s', '1980s', '2000s', '2010s–2015', '2015–2020' and '2020 en Adelante'. The bibliographic strip should contain only references that have been verified against the manuscript bibliography and should be updated in the editable source before final submission. In the current rasterized figure, the internal reference line remains part of the previously generated image and was not regenerated in this revision.

VISUAL REQUIREMENTS. Maintain a clean scientific vector-infographic appearance combined with realistic remote-sensing and mangrove imagery.

Use consistent typography, alignment and spacing; avoid decorative effects that reduce legibility; do not use a gradient background. Preserve a wide horizontal aspect ratio suitable for insertion as a scientific figure. The visual hierarchy must clearly communicate the progression from bitemporal mapping to time-series analysis, multi-index approaches, cloud processing and artificial-intelligence-assisted disturbance detection.

Nota editorial: el prompt se incluye con fines de transparencia metodológica y trazabilidad del uso de inteligencia artificial generativa. La figura presentada en el manuscrito corresponde al producto previamente elaborado y revisado por los autores; este anexo no implica que la imagen haya sido regenerada durante el proceso de revisión.

