

MANGLARES DE MÉXICO

ACTUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS 2020



CONABIO

COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD

MANGLARES DE MÉXICO

ACTUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS 2020



CONABIO

COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

Primera edición, julio de 2021

D. R. © 2021, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)
Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Parques del Pedregal
Delegación Tlalpan, Ciudad de México, 14010
www.gob.mx/conabio www.biodiversidad.gob.mx/

Revisión editorial y de estilo: Samuel Velázquez Salazar
Coordinación de producción editorial: Bernardo Terroba Arechavala
Diseño y diagramación: Rafael Ríos Rodríguez
Elaboración de mapas: Berenice Vázquez, Carlos Troche, Edgar Villeda,
Jose Alberto Alcántara y María Teresa Rodríguez
Diseño de mapas: Rafael Ríos Rodríguez
Fotografía de portada: Manglares áridos en Isla San José, Baja California Sur. Autor: Samuel Velázquez
Traducción al inglés del resumen: Rainer Ressler
Ilustraciones de las especies de manglares: Aldo Domínguez de la Torre

Forma de Citar: Velázquez-Salazar S., Rodríguez-Zúñiga M.T., Alcántara-Maya J.A., Villeda-Chávez E., Valderrama-Landeros L., Troche-Souza C., Vázquez-Balderas B., Pérez-Espinosa I., Cruz-López M. I., Ressler R., De la Borbolla D. V. G., Paz O., Aguilar-Sierra V., Hruby F. y Muñoa-Coutiño J. H. 2021. Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México CDMX. Pp. 168

ISBN: 978-607-8570-50-8
Editado en México

ÍNDICE

<i>Resumen Ejecutivo</i>	6
<i>Executive summary</i>	8
<i>Abreviaciones</i>	10
CAPÍTULO 1	
ANTECEDENTES	13
1.1 Manglares en México y en el mundo	14
1.2 Panorama actual del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México	17
1.3 Sinergias del SMMM	19
CAPÍTULO 2	
ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS MANGLARES DE MÉXICO 2020	23
2.1 Cambio de insumo y sus implicaciones	23
2.2 Método	25
2.3 Información auxiliar para la toma de decisiones en el mapeo de manglares	27
2.4 Actualización en la distribución de los manglares en México 2020	30
2.5 Resultados a nivel nacional	31
2.6 Índice de mapas	37
Región Pacífico Norte	40
Baja California	40
Baja California Sur	44
Sonora	48
Sinaloa	52
Nayarit	56
Región Pacífico Centro	60
Jalisco	60
Colima	64
Michoacán	68
Región Pacífico Sur	72
Guerrero	72
Oaxaca	76
Chiapas	80

Región Golfo de México	84
Tamaulipas	84
Veracruz	88
Tabasco	92
Región Península de Yucatán	96
Campeche	96
Yucatán	100
Quintana Roo	104

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE DATOS Y CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS MANGLARES DE MÉXICO

3.1 Dinámica de cambios de manglares	109
3.2 Diferenciación de manglar arbustivo en el Complejo Sian Ka'an, Quintana Roo	114
3.3 Cambios en los manglares por impacto de fenómenos hidrometeorológicos: Caso de los huracanes Willa y Carlotta	119
3.4 Uso de RPAS (drones) para la caracterización de manglares	126
3.5 Exploración de imágenes de radar para la caracterización de manglares de un sitio piloto en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas	129
3.6 Conectividad estructural de humedales costeros: Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche	134

CAPÍTULO 4

DISPONIBILIDAD DE LOS DATOS DEL SMMM EN LA WEB Y GEOVISUALIZACIÓN

4.1 Página web	141
4.2 Geoportal	143
4.3 Atlas de naturaleza y sociedad	144
4.4 Base de datos de monitoreo en unidades de muestreo	146
4.5 Realidad virtual de los manglares de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo	147

<i>Conclusiones</i>	153
<i>Referencias</i>	156
<i>Agradecimientos y créditos</i>	163
<i>Fotógrafos</i>	166

RESUMEN EJECUTIVO

- El Sistema de Monitoreo de Manglares de México (SMMM) continúa generando información nacional actualizada sobre la distribución espacial y el estado de los manglares mexicanos. Incluyendo esta reciente actualización del año 2020, el SMMM comprende cinco evaluaciones nacionales (1970/1980, 2005, 2010, 2015 y 2020), que permiten identificar y analizar los principales cambios y dinámicas espaciales del ecosistema de manglar.
- México ocupa el cuarto lugar en el mundo en superficie de manglar. En 2020, se registró una extensión total de 905 086 ha, que se distribuye en 17 estados costeros. Esto corresponde al 6.7% de la cobertura global de manglares y al 0.46% de la superficie continental de México.
- Se utilizaron datos del satélite Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) para generar la nueva cartografía nacional 2020. Estas imágenes permiten una mejor diferenciación de los manglares en áreas de mayor incertidumbre. En el caso del Complejo Sian Ka'an, los manglares arbustivos se han registrado con mayor detalle, delimitando 83 791 ha de áreas adicionales de manglares previamente consideradas como *Otros humedales*.
- Se identificaron ganancias y pérdidas de manglares durante los cuatro periodos. Desde 1970/1980 hasta 2010 predominaron las pérdidas, mientras que entre los periodos 2010–2015 y 2015–2020 predominaron cambios positivos en general. Este último es el resultado de la recuperación natural de los manglares, el asentamiento de nuevas áreas, el éxito de los programas de restauración y además por la disponibilidad de nueva información y mejoras técnicas y metodológicas en el SMMM, que permitieron una mejor identificación del ecosistema.
- Del área total de manglares reportada para 1970/1980, solo el 76% resultó sin cambios hasta 2020, el 4% se recuperó y el 20% restante cambió a otros tipos de cobertura y usos de suelo.
- Un proceso identificado en el análisis de los datos fue la perturbación del manglar por impacto de huracanes, mostrando procesos de recuperación o

pérdida permanente. El seguimiento de los lugares afectados es importante para tomar medidas que favorezcan su rehabilitación.

- El uso de nuevas tecnologías como los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (drones), se ha implementado como una nueva fuente de datos para algunas líneas de trabajo del SMMM, obteniendo una mayor cantidad de información de alta resolución (como fotografías y videos) en menor tiempo y con menor esfuerzo. Además, se explora el uso de imágenes de radar del satélite Sentinel-1 para estudiar la estructura de la vegetación en un sitio piloto.
- Los datos del SMMM, junto con otras fuentes de información, hacen una importante contribución al estudio de la conectividad estructural de los humedales costeros. Este tipo de análisis se utiliza para estudiar las relaciones espaciales y ecológicas entre los manglares y otros ecosistemas costeros.
- Los datos y resultados de SMMM se publican en varias plataformas digitales. Estas plataformas están dirigidas al público en general y ofrecen información en diversos formatos (imágenes, fotos, ilustraciones, cartografía digital, mapas, etc.).
- El uso de la realidad virtual (RV), apoyada con datos del SMMM, abre nuevas posibilidades para la visualización del ecosistema manglar, especialmente con fines didácticos, educativos y de sensibilización. Experimentar los manglares utilizando un mundo virtual inmersivo basado en información real, ofrece una experiencia mucho más intensa de este ecosistema en comparación con las técnicas de visualización convencionales.

EXECUTIVE SUMMARY

- The Mexican Mangrove Monitoring System (SMMM) continues to generate updated national information on the spatial distribution and status of the Mexican mangroves. Including this recent update of the year 2020, the SMMM comprises five national inventories (1970/1980, 2005, 2010, 2015 and 2020), which allow the identification and analysis of principal changes and spatial dynamics of the mangrove ecosystem.
- Mexico ranks fourth in the world in terms of mangrove area. In 2020, a total area of 905 086 ha was registered, which is distributed over 17 coastal states. This corresponds to 6.7% of the total global mangrove cover and 0.46% of the continental surface of Mexico.
- Sentinel-2 (European Space Agency) satellite data was used to derive the new 2020 national cartography. These images allow for better differentiation of mangroves in areas of greater uncertainty. In the case of the Sian Ka'an National Biosphere Reserve, shrubby mangroves have been recorded in greater detail, delimiting 83 791 hectares of additional mangrove areas previously considered *Other wetlands*.
- Mangrove gains and losses were identified over the five periods. From 1970/1980 to 2010 the losses predominated, while between the periods 2010–2015 and 2015–2020 positive changes prevailed overall. The latter is the result of the natural recovery of mangroves, the settlement of new areas and the success of restoration programs, but also due to the availability of new information and technical and methodological improvements in the SMMM, which enable better identification of the ecosystem.
- Of the total mangrove area reported for 1970/1980, only 76% resulted unchanged until 2020, 4% recovered, and the remaining 20% were lost to other land cover/land use types.
- The effects of hurricanes on mangroves and the resulting disturbances were analyzed and showed either permanent loss or recovery processes. The

monitoring of the affected locations is important to take measures that favor their rehabilitation.

- The use of new technologies such as remotely piloted aircraft systems (drones) has been implemented as a new data source within the SMMM, obtaining a greater amount of spatial high resolution information (such as photographs and videos) in less time and with less effort. Further, radar images of the Sentinel-1 satellite were used to study biophysical vegetation properties at pilot sites.
- The SMMM data, along with other sources of information, make an important contribution to studying the structural connectivity of coastal wetlands. This type of analysis is used to study the spatial and ecological relationships between mangroves and other coastal ecosystems.
- SMMM data and results are published on various digital platforms. These platforms are aimed at the general public and offer information in various formats (images, photos, illustrations, digital cartography, maps, etc.).
- The use of virtual reality (VR), supported with data from the SMMM, opens up new possibilities for the visualization of the mangrove ecosystem, especially for didactic, educational, and awareness-raising purposes. Experiencing mangroves using an immersive virtual world based on real information offers a much more intense experience of this ecosystem compared to conventional visualization techniques.

ABREVIACIONES

- AB: Área Basal.
- AMC: Área Mínima Cartografiable.
- ANP: Área Natural Protegida.
- B1, B2, B3, B4, etc.: Banda 1, Banda 2, Banda 3 y Banda 4 de imágenes de satélite.
- CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONAFOR: Comisión Nacional Forestal.
- CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- DAP: Diámetro a la Altura del Pecho.
- DN: Diámetro Normal.
- ECOSUR: El Colegio de la Frontera Sur.
- ERMEXS: Estación de Recepción México de la constelación Spot.
- ERMEX NG: Estación de Recepción México Nueva Generación.
- ESA: European Space Agency (Agencia Espacial Europea).
- FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).
- FMCN: Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.
- GEE: Google Earth Engine.
- H: Polarización Horizontal.
- IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- IIC: Índice Integral de Conectividad.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- MAD: Modelo de Altura del Dosel.
- MDS: Modelo Digital de Superficie.
- MDT: Modelo Digital del Terreno.
- NDVI: Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).
- NIR: Near Infrared (Infrarrojo cercano).
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica).
- NOM: Norma Oficial Mexicana.
- PR: Percepción Remota.

RBLP: Reserva de la Biosfera Los Petenes.
 RGB: Red, Green and Blue (Rojo, Verde y Azul).
 RPAS: Remotely Piloted Aircraft System (Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia).
 RTK: Real Time Kinematic (Navegación Cinética Satelital).
 RV: Realidad virtual
 SEMAR: Secretaría de Marina.
 SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
 SIG: Sistema de Información Geográfica.
 SMMM: Sistema de Monitoreo de los Manglares de México.
 SNAP: Sentinel Application Platform (Plataforma de Aplicaciones Sentinel).
 SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre (Satélite Para la Observación de la Tierra).
 SWIR: ShortWave Infrared (Infrarrojo de onda corta).
 UM: Unidades de muestreo.
 UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).
 USAID: United States Agency for International Development (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional).
 USFS: United States Forest Service (Servicio Forestal de los Estados Unidos).
 v: Polarización Vertical.
 VAS: Vegetación Acuática Sumergida.

Unidades de medida

cm: centímetros.
 ha: hectáreas.
 km/h: kilómetros por hora.
 km: kilómetros.
 km²: kilómetros cuadrados.
 m²: metros cuadrados.



Manglar en Marismas Nacionales, Nayarit.
FOTO: E.V.C. CONABIO-SEMAR

ANTECEDENTES

Los manglares son un tipo de ecosistema dominado por especies vegetales arbóreas o arbustivas denominadas mangles. Se cataloga como un tipo de humedal costero, ya que se encuentra en las desembocaduras de ríos, lagunas costeras y esteros, con la particularidad de estar influenciado por agua salada proveniente del mar y agua dulce proveniente del escurrimiento de las cuencas hidrológicas a través de ríos, arroyos y afluentes de agua subterránea. Estas condiciones de inundación y agua salobre han propiciado en los mangles adaptaciones muy específicas para sobrevivir en estos ambientes, donde destaca el desarrollo de raíces aéreas para un mejor anclaje en suelos húmedos,

inestables y bajos en oxígeno, glándulas excretoras de sal, entre otras (Twilley y Day 2012; Srikanth, Lum y Chen 2015).

Este ecosistema es especialmente importante, ya que provee de servicios ecosistémicos ampliamente conocidos, como control de inundaciones, protección contra huracanes, fuente de nutrientes para ecosistemas vecinos como pastos marinos y arrecifes de coral, captura de gases de efecto invernadero, almacenes de carbono, hábitat refugio para diferentes especies (figura 1.1), entre ellas varias de importancia pesquera, y muchos otros (FAO 2007; Kathiresan 2012).

Pese a su importancia, los manglares se encuentran catalogados como uno de los ecosistemas



FIGURA 1.1 Nido de águila pescadora (*Pandion haliaetus*) sobre un manglar *Rhizophora mangle* en Sian Ka'an, Quintana Roo. FOTO: J.A.A.M.

más vulnerables ante el cambio global, pues su hábitat es fácilmente alterable, al depender de condiciones hidrológicas específicas, tanto por acción del hombre como por condiciones ambientales adversas, como el cambio en el nivel medio del mar y las sequías prolongadas (Thomas *et al.* 2017; Goldberg *et al.* 2020).

Ante este panorama, surge la necesidad de generar información actualizada y confiable de los manglares a nivel global. La Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO) se ha encargado de generar información precisa en México sobre su distribución, extensión, patrones de cambio y amenazas, entre otros datos. Además, ha colaborado con distintas instituciones tanto nacionales como internacionales para la generación de conocimiento de este ecosistema.

Uno de los objetivos más relevantes, tanto de la CONABIO como del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM) es la difusión de la información y resultados que generan. Por esta razón, la presente obra da continuidad a la serie de libros *Manglares de México*, en los que se han presentado todos los avances y resultados del SMMM, ahora con la fecha más actualizada de observación, que corresponde al año 2020.

1.1 Manglares en México y en el mundo

Los manglares se distribuyen a nivel mundial en las zonas costeras de los trópicos y subtropicos del planeta. La cifra global más reciente de la superficie de manglar, estimada por el Global Mangrove Watch para el año 2016 fue de 135 881.65 km², distribuidos a lo largo de aproximadamente 120 países y territorios, cubriendo al rededor de 12% de la línea de costa mundial (Bunting *et al.* 2018; GMW 2020). Entre los países que destacan por tener una mayor superficie de manglar están: Indonesia, Brasil, Australia, México y Nigeria (cuadro 1.1).

En el mundo se han reportado alrededor de 80 especies e híbridos de mangles, distribuidas en 16 familias, siendo Indonesia su centro de diversidad (Spalding *et al.* 2010; Duke 2017). En cuanto a México, únicamente cuenta con registro de seis especies y una variedad: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Conocarpus erectus*, *Conocarpus erectus* var. *sericeus*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia bicolor* y *Rhizophora harrisonii* (estas dos últimas registradas únicamente en zonas restringidas de las costas de Chiapas (Nettel *et al.* 2008; Santamaría 2014)) (figura 1.2).

CUADRO 1.1 Países con mayor superficie de manglar a nivel mundial (Global Mangrove Watch 2020).

País	Superficie (km ²)	Porcentaje a nivel mundial
Indonesia	26 508	19.5%
Brasil	10 888	8%
Australia	9 672	7.1%
México	9 051*	6.7%
Nigeria	6 894	5%

*Cifra actualizada con los datos del SMMM para 2020



Rhizophora mangle



Avicennia germinans



Conocarpus erectus



Conocarpus erectus var. *sericeus*

FIGURA 1.2 Especies de manglar presentes en México. ILUSTRACIONES: A.D.T.



Laguncularia racemosa



Avicennia bicolor



Rhizophora harrisonii

FIGURA 1.2 (Continúa) Especies de manglar presentes en México¹. ILUSTRACIONES: A.D.T.

1 Para consultar y descargar las ilustraciones en alta resolución visitar la siguiente página:
<https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/material-de-apoyo>

A lo largo de las últimas dos décadas la importancia de la conservación y protección de los manglares se incrementó de manera sustancial a nivel mundial (Valderrama *et al.* 2017). En nuestro país, las acciones más importantes a su favor han sido la inclusión de cuatro especies de mangle (*R. mangle*, *L. racemosa*, *A. germinans* y *C. erectus*) en una Norma Oficial Mexicana (NOM), la NOM-059-SEMARNAT-2010 que considera a estas especies en la categoría de amenazadas.² Una de las tareas pendientes en materia de protección de especies de mangle en el territorio nacional es la inclusión de *R. harrisonii* y *A. bicolor* dentro de esta misma NOM.

Además de esta NOM, la protección del ecosistema de mangle está considerada de forma amplia en el artículo 60 TER de la Ley General de la Vida Silvestre (2007), que prohíbe cualquier cambio que afecte su integridad, mismo que ha sido una de las mejores estrategias del Gobierno de México para frenar la destrucción y propiciar la recuperación de ese ecosistema. De esta forma, aunque *R. harrisonii*, *A. bicolor* y *C. erectus* var. *sericeus* registrados también para México, no estén consideradas dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010, sí lo están en el marco del artículo 60 TER.

1.2 Panorama actual del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México

En 2005 la CONABIO, en estrecha colaboración con diversas instituciones gubernamentales,

² Aquellas especies, o poblaciones de las mismas, que podrían llegar a encontrarse en peligro de desaparecer a corto o mediano plazo, si siguen operando los factores que inciden negativamente en su viabilidad, al ocasionar el deterioro o modificación de su hábitat o disminuir directamente el tamaño de sus poblaciones (SEMARNAT 2010).

organizaciones de la sociedad civil y especialistas en el tema de manglares, inició la integración, recopilación y generación de nueva información sobre el ecosistema de mangle, para desarrollar lo que años más tarde se denominaría el Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM).

De manera general, los sistemas de monitoreo de ecosistemas tienen dentro de sus metas generar información confiable para sus usuarios, a partir de la observación sistemática y metodológica de variables que midan condiciones consideradas clave para describir su estado. El SMMM tiene como objetivo generar información sobre los cambios del ecosistema de mangle a través de la evaluación de su extensión, distribución espacial y condición a través del tiempo. En función de esta información, se busca identificar las amenazas existentes, latentes y tendencias de cambios (pérdida, deterioro o recuperación), de tal forma que sirva de apoyo a los tomadores de decisiones para coadyuvar en su entendimiento, conservación y manejo.

En el SMMM se generan periódicamente una serie de productos, que son analizados dentro de los cuatro componentes del sistema (Figura 1.3) para monitorear diferentes aspectos de los manglares.

El *componente de distribución espacial* es el más desarrollado hasta el momento. Se basa en parámetros e indicadores obtenidos a través de técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica, haciendo uso principalmente de imágenes de satélite y datos obtenidos en trabajo de campo. Esto permite evaluar la extensión del mangle y sus coberturas adyacentes cada cinco años, identificando las áreas y coberturas involucradas en los procesos de dinámica de cambio.

El *componente de caracterización de los manglares* comprende diversos aspectos enfocados

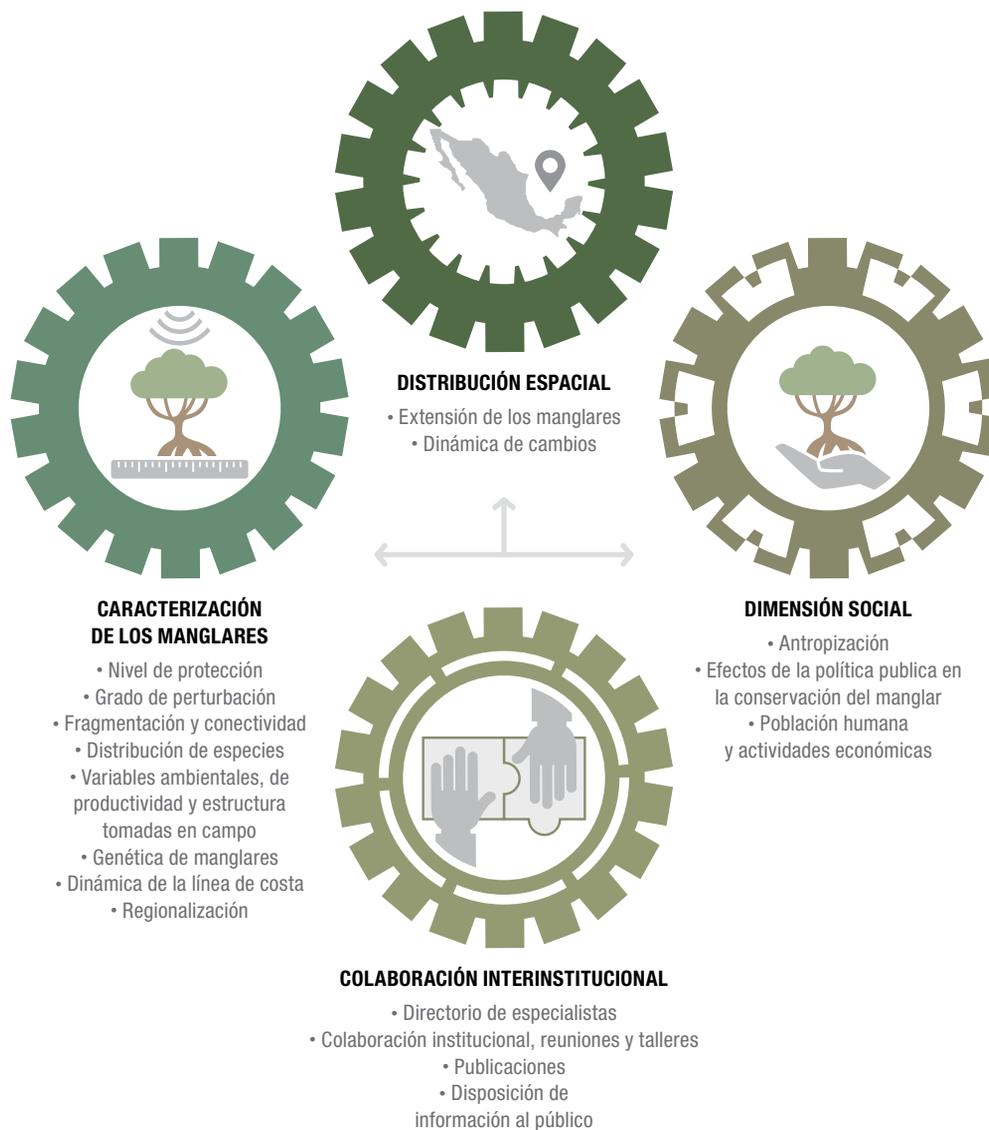


FIGURA 1.3 Esquema conceptual del SMMM.

en la descripción de los manglares. En este sentido, los parámetros e indicadores evaluados comprenden diversas escalas que van desde la nacional, que tiene como punto de partida los resultados del componente de distribución espacial, hasta la local, en unidades de muestreo (UM) donde se colectan datos de campo en

colaboración con otras instituciones a través de proyectos financiados por la CONABIO, así como proyectos para los cuales la CONABIO recibe apoyo. Las líneas de trabajo consideran distintos enfoques, por ejemplo, el nivel de protección de los manglares, la condición de perturbación, los aspectos de fragmentación, conectividad y

detección de amenazas, su caracterización a nivel estructural (incluye variables estructurales y la distribución de algunas especies en determinados sitios piloto), la caracterización ambiental (que comprende datos de productividad, fisicoquímicas de agua y suelo), así como aspectos de genética de los manglares. Dentro de este componente también se encuentran elementos experimentales, donde se evalúa la viabilidad y el uso de nuevas tecnologías y nuevos datos de sensores remotos en sitios piloto, para la obtención de información específica sobre la caracterización de los manglares; aquí se explora el uso de tecnología de radar y mosaicos fotográficos geolocalizados tomados con RPAS para obtener datos de estructura y composición.

El *componente dimensión social* se enfoca a proponer e instrumentar indicadores que permitan monitorear el efecto de acciones y políticas públicas sobre el ecosistema de manglar, lo cual dará soporte a la toma de decisiones en torno a la conservación y manejo de este ecosistema. Este componente también considera las interacciones entre la sociedad, el ecosistema de manglar y sus efectos.

Finalmente, el *componente de colaboración*, que es uno de los pilares del SMMM, comprende la interacción de la CONABIO con múltiples instituciones, que incluyen entidades nacionales e internacionales, tanto académicas, gubernamentales así como de la sociedad civil. El objetivo de estas interacciones es el desarrollo del SMMM a través de la retroalimentación y la generación de datos en conjunto para apoyar y fortalecer al sistema.

Todos los componentes y sus resultados son utilizados para retroalimentarse en función de análisis y tecnologías de vanguardia disponibles al momento de hacer las evaluaciones, adaptando el sistema cuando es necesario.

En el caso particular del *componente espacial*, la Subcoordinación de Percepción Remota de la

CONABIO ha concentrado desde un inicio gran parte de sus esfuerzos en generar los productos correspondientes de forma oportuna, evaluando la confiabilidad de los datos. Conforme se generan nuevos resultados en el SMMM, se agregan temas que han definido líneas de trabajo novedosas y niveles de análisis de los datos, enriqueciendo cada uno de sus componentes y por ende el conocimiento del funcionamiento y dinámica de este ecosistema.

La información que se genera en el SMMM es cada vez de mayor utilidad para los encargados de la toma de decisiones, gestores del ecosistema y sociedad en general; esto se refleja en las solicitudes de información que recibe y atiende constantemente la CONABIO en materia de manglares y engloban desde trabajos escolares para estudiantes, información para investigadores y academia en general, hasta resoluciones judiciales. Como parte de la filosofía de compartir, difundir, divulgar y hacer propietaria a la ciudadanía de la información generada en el SMMM, en estos últimos 15 años la generación de información ha estado acompañada de un sitio web actualizado, diferentes aplicaciones de visualización, descarga de datos y diferentes publicaciones (cuatro libros, tres informes, tres folletos, cuatro artículos científicos y un artículo de divulgación)³, que muestran los avances en este tema.

1.3 Sinergias del SMMM

La visión integrativa y de largo plazo del SMMM ha permitido la convergencia e inclusión de otras iniciativas a diferentes niveles, con el objetivo de ampliar el conocimiento, la información

³ Disponibles a través del siguiente enlace: <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/material-de-apoyo>

y la conservación del ecosistema de manglar. En este sentido, se han representado diversas sinergias con distintos actores relacionados con el SMMM, que han aportado experiencia y conocimiento extenso sobre sus áreas de trabajo en diversas acciones como la investigación, el monitoreo, la conservación y la rehabilitación del manglar.

Dentro de las actividades del SMMM han existido colaboraciones interinstitucionales, por ejemplo con la ERMEXS (Estación de Recepción México de la Cosntelación SPOT), para el suministro de las imágenes del satélite SPOT, uno de los insumos más importantes para generar la cartografía de la distribución de los manglares, del uso de suelo y de la vegetación de las zonas alejadas al manglar hasta 2015. Con la Secretaría de Marina (SEMAR) durante las intensas campañas de sobrevuelos (2008 y 2015/2016) en las zonas de manglares, con el fin de obtener datos para la validación de la cartografía generada en el SMMM.

La participación de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) ha jugado un papel importante desde el inicio del SMMM, colaborando con apoyo para el trabajo de campo, así como brindando asesoría y retroalimentación para áreas de manglar que se distribuyen dentro de sitios bajo su resguardo.

La participación de investigadores especialistas en el tema de manglares ha sido fundamental. Basados en su experiencia, a través de reuniones y talleres han colaborado en la delimitación de áreas de relevancia para la conservación de manglares, áreas de interés para la restauración y rehabilitación ambiental. Además, investigadores de diversas instituciones aportan datos de estructura y de parámetros ambientales dentro de unidades de muestreo, con la finalidad de fortalecer el SMMM por medio de datos tomados en campo a través de proyectos financiados por CONABIO.

Uno de los varios casos exitosos de sinergias entre el SMMM e instituciones nacionales e internacionales es la generación de una *Guía metodológica para la caracterización de los manglares mexicanos*,⁴ que coordinó la CONABIO. Este esfuerzo financiado por la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), a través del Servicio Forestal de Estados Unidos (USFS), por medio del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), permitió la ejecución de talleres para la creación de criterios específicos, validados con visitas a campo, que se reflejan en los capítulos con la colaboración de especialistas de cada tema, en los que participaron instituciones de educación y gubernamentales además de asociaciones civiles, que fueron imprescindibles para el desarrollo de la publicación. Con esta guía se homologaron metodologías y unidades de medición con el objetivo de facilitar la integración, el análisis y la comparación de la información de manglares en diferentes escalas y sitios de trabajo (figura 1.4).

Otro caso de éxito en cooperación internacional es el realizado entre México y Colombia, a través de un programa de intercambio y fortalecimiento de capacidades técnicas en temas de análisis de información espacial y sistemas de monitoreo. Este intercambio se desarrolló entre la CONABIO y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y consistió en la capacitación de personal entre ambas instituciones, logrando desarrollar metodologías aplicadas a sistemas de monitoreo.

4 Disponible a través del siguiente enlace: <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/14078.pdf>



FIGURA 1.4 Colaboración entre CONABIO y diversos especialistas en el marco de los talleres para la generación del libro *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala*. FOTOS: E.V.C.



Manglar en Bahía Magdalena, Baja California Sur.
FOTO: S.V.S. CONABIO-SEMAR

ACTUALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS MANGLARES DE MÉXICO 2020

El método de interpretación interdependiente propuesto por la FAO (1996) ha sido utilizado para la generación de la cartografía de los manglares de México para todas las fechas, excepto para la elaboración del primer mapa de manglares en el año 2005, en el que se usó un método de clasificación no supervisada. A partir de entonces, tanto el mapa de análisis retrospectivo (1970/1980) como las siguientes actualizaciones (2010, 2015 y 2020) mantuvieron el mismo método para asegurar que todos los mapas generados sean comparables entre sí y aminorar los errores derivados de falsos cambios.

Asimismo, el continuo desarrollo de la tecnología satelital permite contar cada vez con una mejor disponibilidad y calidad de datos e insumos que mejoran la precisión y exactitud de los mapas. En el caso de la cartografía del SMMM, la disponibilidad de fotografías aéreas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y fotografías de la Fundación ICA permitieron realizar el mapa de 1970/1980. En 2005, 2010 y 2015 el país contaba con una licencia de uso de las imágenes de la constelación SPOT que permitieron dar continuidad en el insumo para generar los mapas de la distribución del manglar. Sin embargo, a inicios del 2015 el satélite SPOT-5 fue dado de baja y las características ópticas de sus sucesores no cumplieron con los requerimientos técnicos que el SMMM necesitaba para continuar el monitoreo espacial de los manglares de México con dicho insumo. A mediados del año 2015, la Agencia Espacial Europea (ESA por

sus siglas en inglés) puso en órbita el primero de dos satélites gemelos que proporcionan las imágenes Sentinel-2, mientras que el segundo fue lanzado en el primer trimestre de 2017. La funcionalidad de estas imágenes se puso a disposición del público a partir del 2016. Debido a la interrupción de las imágenes SPOT-5, fue necesario cambiar de insumos para elaborar la cartografía, siendo las imágenes Sentinel-2 las que cumplieron con los requerimientos, además de ofrecer más información y estar disponibles. En la figura 2.1 se muestran los diferentes insumos utilizados para la generación de la cartografía de manglares del SMMM en las diferentes evaluaciones.

2.1 Cambio de insumo y sus implicaciones

En el SMMM las particularidades técnicas de las imágenes de satélite que se usan es uno de los aspectos más importantes para mantener un método coherente y garantizar la comparabilidad entre mapas de diferentes años. Las características ópticas que ofrecen las imágenes Sentinel-2 son muy similares a las que presentaban las imágenes SPOT-5 (figura 2.2), ambos sensores proporcionan información de las bandas NIR y SWIR, que son muy importantes para la identificación de manglares.

La resolución espacial, es decir el tamaño del pixel (que es de 10 y 20 metros según la banda utilizada), coincide con la resolución espacial

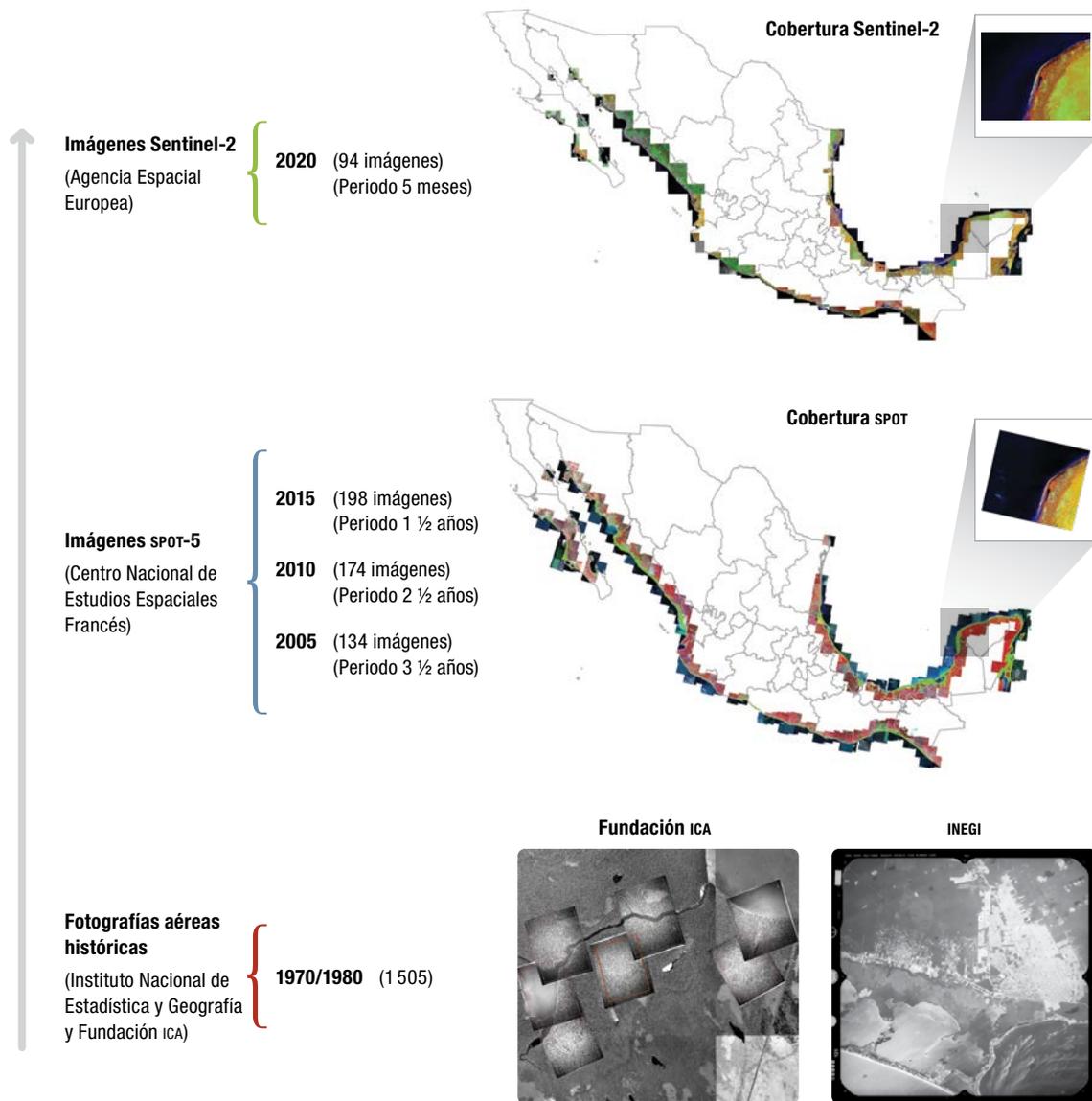


FIGURA 2.1 Insumos empleados en la generación de la cartografía y periodo de tiempo empleado en su adquisición, para las diferentes fechas de evaluación del SMMM.

de las bandas de ambos tipos de insumos. Finalmente, comparando la resolución temporal, Sentinel-2 presenta disponibilidad de imágenes de un mismo lugar cada cinco días, superando de manera significativa a SPOT-5, que presentaba una temporalidad de cada 26 días. Esta

última característica permitió que para 2020 se obtuviera la cobertura de imágenes para la actualización del mapa de manglares en cinco meses, a diferencia del año y medio necesario para cubrir toda la zona de estudio para la cartografía de 2015.

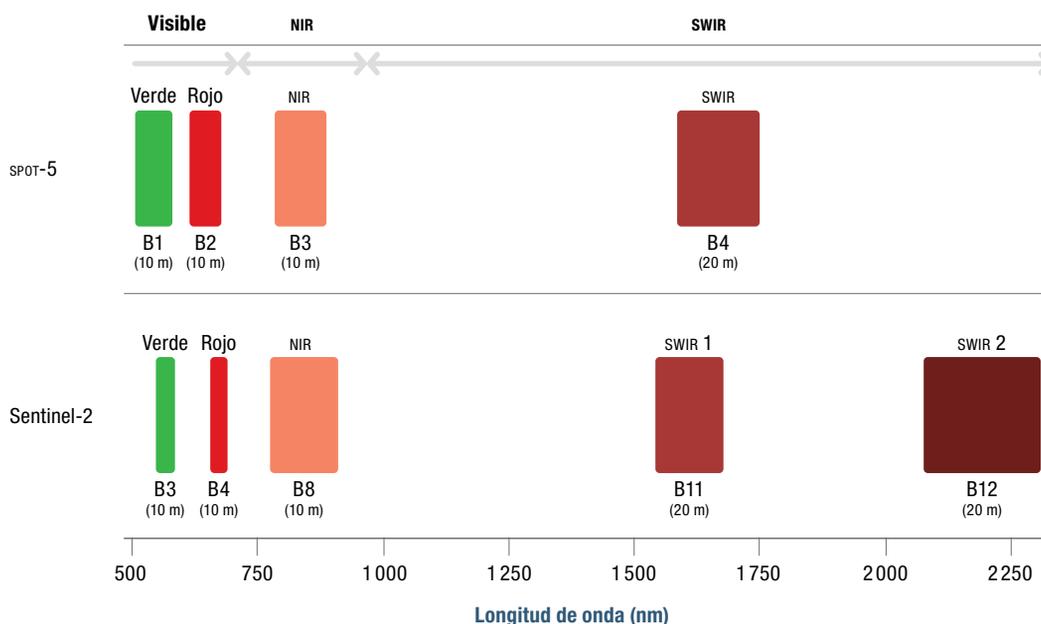


FIGURA 2.2 Comparación de las bandas y longitud de onda que registran los sensores SPOT-5 y Sentinel-2 utilizadas para la identificación del manglar.

En lo económico, las imágenes SPOT-5 utilizadas hasta 2015 representaban un gasto de operación al país, ya que se requería de una licencia para su adquisición y uso. Por el contrario, las imágenes Sentinel-2, de la ESA, son de libre acceso y descarga en su sitio web.⁵

En lo práctico, debido al acceso libre de las imágenes Sentinel-2 existe una gran disponibilidad de métodos, algoritmos y filtros que pueden mejorar el procesamiento de las imágenes. Esto, en términos de la actualización del mapa de manglares, permitió obtener mejoras visuales significativas al momento de la interpretación e identificación en zonas de manglar, que anteriormente no fue posible identificar con imágenes SPOT-5 (figura 2.3). Para la cartografía 2020 las imágenes Sentinel-2 permitieron una mejora significativa en la discriminación visual del manglar

arbusivo, sobre todo en zonas de incertidumbre de la Península de Yucatán. Sobre este tema se habla más extensamente en la sección 3.2.

2.2 Método

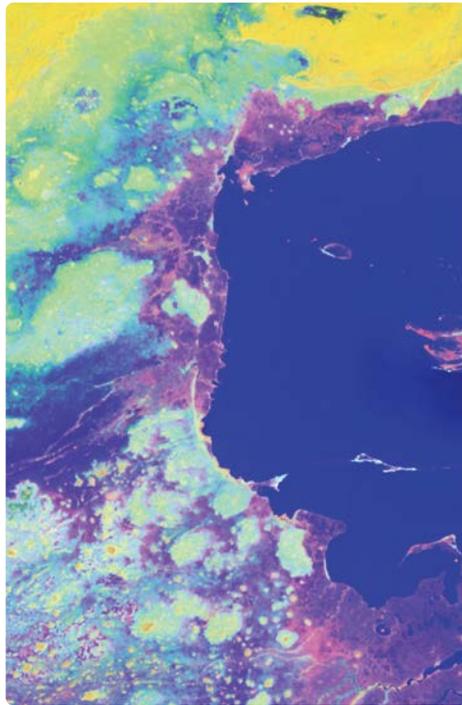
Para generar la cartografía 2020 del SMMM se emplearon 94 imágenes de satélite, todas de la constelación Sentinel-2, que fueron obtenidas de enero a mayo de 2020. A estas imágenes se les realizó un remuestreo de los píxeles de 20 metros de las bandas SWIR a 10 metros con el procedimiento de la herramienta Super-Resolution (Brodu 2017; Lanaras *et al.* 2017) en el software de uso libre SNAP,⁶ desarrollado por la ESA.

El método utilizado fue el de interpretación interdependiente (FAO 1996) tomando como mapa

5 <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

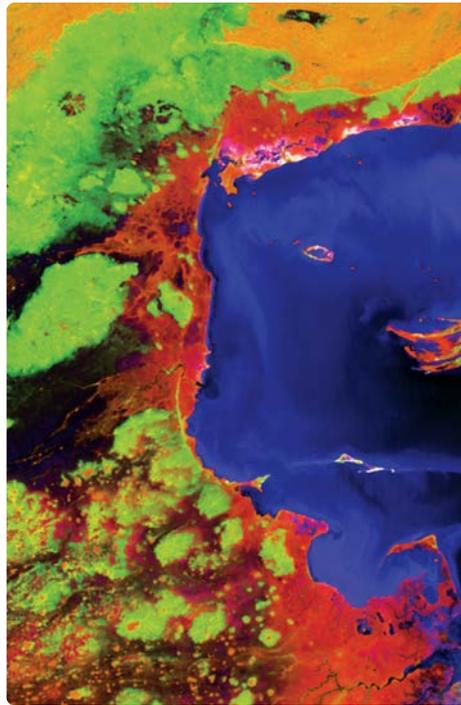
6 <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

SPOT-5



© CNES 2015, producida por el SIAP bajo licencia de "SPOT IMAGINE". Combinación bandas NIR (3), SWIR (4), Rojo (2).

Sentinel-2



© ESA 2020, producida por Copernicus Space Component. Combinación bandas NIR (B8), SWIR (B11), Rojo (B4).

FIGURA 2.3 Ejemplo de mejora visual entre imágenes SPOT-5 y Sentinel-2, para la interpretación de zonas de manglar en la zona de Sian Ka'an.

base la cartografía de 2015 sobre la que se modificaron los parches de manglar y otras coberturas mediante interpretación visual según los cambios registrados en las imágenes de satélite de 2020.

El resultado del proceso de actualización de la cartografía es un mapa temático conformado por ocho clases que agrupan y describen el tipo de cobertura vegetal o de uso de suelo presente en las zonas aledañas al manglar. Para los mapas de 1970/1980, 2005 y 2010 existe una novena clase que se refiere a ausencia de información debido a la presencia de nubes y sus sombras. La descripción de cada clase se muestra en el cuadro 2.1. Los mapas que se presentan en las secciones 2.7–2.11, muestran estas categorías de uso

del suelo y vegetación, así como su cobertura en diferentes estados del país.

Como en todos los mapas de actualización del SMMM, el proceso de validación también se encuentra contemplado para la cartografía 2020; sin embargo, debido a la contingencia sanitaria que se vive a nivel mundial, esta tarea presenta retrasos por la dificultad para obtener material en campo útil para este proceso. Una vez que se obtengan los datos se calcularán los valores de omisión y comisión del mapa, necesarios para establecer la exactitud y serán publicados en la página del SMMM.⁷

⁷ <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/>

CUADRO 2.1 Descripción de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo de la cartografía del SMMM.

ID	Clase	Descripción
1	Desarrollo antrópico	Incluye poblados, estanques acuícolas, granjas camaroneras, salineras, caminos y carreteras, así como obras de infraestructura hidráulica que incluye canales.
2	Agrícola-Pecuaria	Incluye las tierras utilizadas para agricultura de temporal, de riego y los pastizales dedicados a la actividad pecuaria. Esta categoría corresponde a coberturas antrópicas destinadas a la producción de alimento, así como los monocultivos perennes arbolados propios de cada región, y otros agroecosistemas. Incluye áreas agrícolas en descanso.
3	Otra vegetación	Incluye la vegetación arbustiva y arbórea de selvas bajas perennifolias y subperennifolias inundables y selva mediana subperennifolia inundables, diferentes tipos de vegetación secundaria arbórea y arbustiva y la vegetación secundaria herbácea.
4	Sin vegetación	Incluye las áreas sin vegetación aparente y con erosión, dunas costeras de arena y playas.
5	Manglar	Incluye humedales arbustivos y arbóreos conformados por la asociación vegetal de una o más especies de mangle: mangle blanco (<i>Laguncularia racemosa</i>), mangle rojo (<i>Rhizophora mangle</i>), mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>), mangle botoncillo (<i>Conocarpus erectus</i>), <i>Rhizophora harrisonii</i> y <i>Avicennia bicolor</i> .
6	Manglar perturbado	Incluye humedales conformados por parches de árboles o arbustos de manglar muerto o en regeneración. Esta categoría se refiere a la cubierta forestal perturbada por huracanes, tormentas, ciclones y por la construcción de infraestructura hidráulica, carreteras, caminos, entre otros.
7	Otros humedales	Incluye la vegetación hidrófita de Popal-Tular-Carrizal, además de pastizales inundables, vegetación hidrófita o halófila con individuos de mangle dispersos o en pequeños islotes y los terrenos salinos costeros con poca cubierta vegetal.
8	Cuerpos de agua	Incluye océanos, bahías, esteros, lagunas, ríos, presas, cenotes, aguadas.

2.3 Información auxiliar para la toma de decisiones en el mapeo de manglares

El avance tecnológico constante, la mayor disponibilidad de información de campo y el crecimiento natural de estos ecosistemas permitieron que la actualización presentara mejoras en la identificación y delimitación en zonas de manglar. En muchos casos, cuando el comportamiento espectral típico conocido en las imágenes de satélite para manglares no era claro, se empleó información auxiliar para la correcta clasificación de categoría a la cobertura observada en las imágenes de satélite.

Los especialistas encargados de la actualización del mapa pudieron emplear en algunos casos hasta cuatro fuentes auxiliares de información para apoyar sus decisiones:

- Fotografías aéreas de helicóptero:** El SMMM cuenta actualmente con un acervo de más de 186 000 fotografías aéreas verticales con una coordenada central aproximada que permite conocer dónde está ubicada la toma. Corresponden a las dos campañas de vuelo (2008 y 2015/2016) realizadas con el apoyo de la SEMAR. Estas fotografías se utilizaron directamente por medio de fotointerpretación en las zonas con incertidumbre (figura 2.4).

- b) **Fotografías aéreas de dron y trabajo de campo:** Aunque más acotado a lugares específicos, el uso de RPAS en estos últimos años, disminuyó el tiempo de obtención de datos en zonas de difícil acceso, lo cual incrementó la eficiencia en los trabajos de campo. La información obtenida nos permite conocer con mayor detalle aspectos de diferenciación de la cobertura, características de los manglares, composición de especies e incluso realizar modelos en 3D sobre la estructura del dosel (figura 2.5).
- c) **Fenología:** El desarrollo de herramientas gratuitas para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales y otros datos geospaciales ha sido exponencial en los últimos años. Un ejemplo es la plataforma en línea Google Earth Engine® (GEE) (Gorelick *et al.* 2017), que permite el procesamiento masivo de datos en la nube. Con esta herramienta fue posible acceder a

imágenes de varios años y trabajar con un índice de vegetación (NDVI⁸) para caracterizar la fenología del manglar y sus cambios a lo largo del tiempo (figura 2.6). Este tipo de procesamiento, llamado análisis de series de tiempo, se basó en códigos modificados de los trabajos de Clinton (2016), Fawcett *et al.* (2017), Gorelick *et al.* (2017) y Shumway y Stoffer (2017). Con este procedimiento aplicado en zonas de manglar arbustivo con incertidumbre se obtuvo un elemento más de decisión para definir y delimitar estas coberturas. Esta herramienta ayudó a observar algunos efectos de procesos antrópicos y eventos de degradación en los manglares, así como de regeneración a lo largo del tiempo, como se explica en la sección 3.3.

8 El NDVI es un índice que expresa verdor en la vegetación. Puede adquirir valores de -1 a 1, correspondiendo 1 a la vegetación con el verdor más alto (vigorosa) y a -1 a zonas sin verdor, es decir con nula actividad fotosintética.



FIGURA 2.4 Uso de fotografías aéreas para la verificación y validación de áreas de la zona de estudio del SMMM.

FOTOS: C.T.S (superior) y J.D. (inferior derecha). Imagen Sentinel-2 y puntos centrales de fotografía aérea (inferior izquierda).



FIGURA 2.5 Uso de RPAS en zonas de manglar para generar modelos en 3D de la estructura del dosel. FOTOS: S.V.S., C.T.S. y mosaico J.A.A.M.

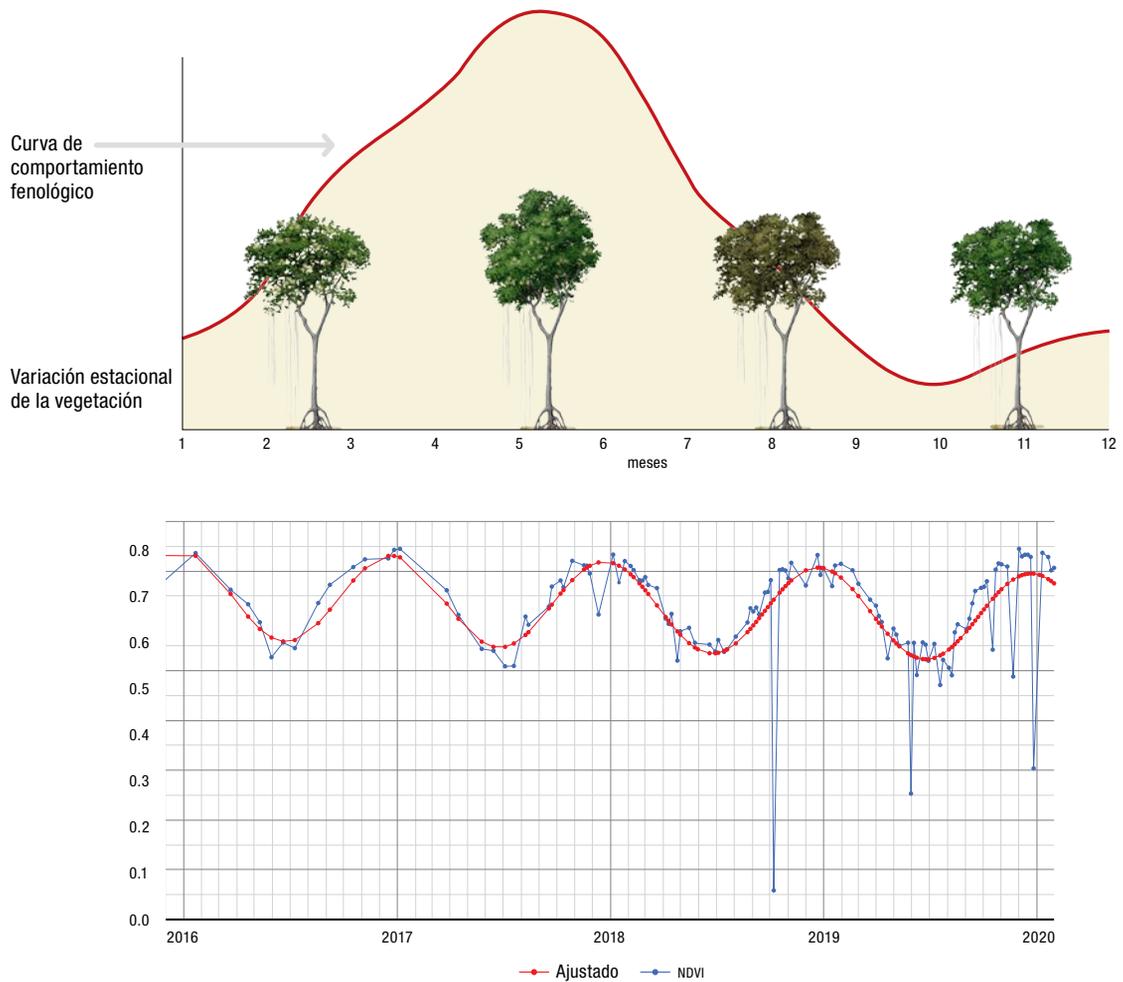


FIGURA 2.6 Series de tiempo para el análisis de la fenología de una zona de manglar en el periodo 2016–2020. Se muestran los valores originales de ndvi y estimados derivados en imágenes Sentinel-2.

d) **Consulta a especialistas:** La retroalimentación recibida por parte de especialistas en ciertas regiones del país fue especialmente útil en zonas donde las otras fuentes auxiliares no permitieron definir claramente la presencia de manglar en zonas de incertidumbre para el analista. Un caso especial fue en Tamaulipas, en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y Delta del Río Bravo, donde gracias a la consulta con expertos locales, se verificó la presencia de manglar en nuevas áreas no incluidas en los mapas anteriores, principalmente porque la extensión aún no cumplía con el Área Mínima Cartografiable (AMC), por lo que el área de estudio del SMMM aumentó.

2.4 Actualización en la distribución de los manglares en México 2020

El análisis comparativo entre los datos de uso de suelo y vegetación interpretados para el área de estudio del SMMM en 2015 y en la más reciente actualización de 2020 permite observar los cambios en la cobertura del manglar y coberturas circundantes. A nivel nacional, se incrementaron 102 549 ha en la superficie del área de estudio del SMMM (área de manglar y zona de influencia dentro de 5 km de buffer), lo que significa que en la cartografía 2020 se mapearon 8 721 749 ha distribuidas en los 17 estados costeros del país. Este incremento obedece a nuevas zonas de manglar que anteriormente no cumplían los criterios de AMC de una hectárea y corresponden a 97% (99 626 ha) en Laguna Madre, Tamaulipas y el 3% (2 923 ha) en la localidad de Mayto, en Jalisco.

Los datos de la superficie de manglar revelaron que prevalecieron las ganancias sobre las pérdidas de este ecosistema. La superficie de manglar estimada en 2015 fue de 775 555 ha y en

2020 fue de 905 086 ha (0.46% de la cobertura continental de México); es decir, hubo un incremento neto de 129 530 ha, que representa el 16.7%. La superficie de pérdida de manglar estimada entre estas dos fechas a nivel nacional es de 37 724 ha, mientras que las ganancias son de 167 254 ha. Sin embargo, estas cifras no representan necesariamente una recuperación histórica del manglar, pues las herramientas tecnológicas actuales permitieron hacer una mejor diferenciación del manglar en zonas de incertidumbre, como fue el caso del Complejo Sian Ka'an en Quintana Roo, en donde 83 791 ha que se tenían catalogadas como *Otros humedales* en 2015 se clasificaron como *Manglar* en 2020; este análisis se aborda con mayor detalle en la sección 3.2.

Tres estados mostraron pérdidas netas en la superficie de manglar en el periodo de 2015 a 2020. Estos fueron Sinaloa, con 5 258 ha (6.4%); Baja California Sur, con 1 068 ha (4%); y Nayarit, con 247 ha (0.4%). Los estados con mayor ganancia neta de manglar fueron, en primer lugar, Quintana Roo, con 117 115 ha (90.2%); seguido por Veracruz, con 4 385 ha (11.4%); Tabasco, con 3 815 ha (8.4%); Yucatán, con 3 702 ha (4%); y Chiapas, con 2 814 ha (6%). El resto de los estados presentó ganancias por debajo de las 1 037 ha (cuadro 2.2).

En lo que respecta al porcentaje de manglar que cubre la línea de costa a nivel nacional, se registró un incremento de 37% en 2015 a 39% en 2020, siendo este último el mismo valor reportado para 1970/1980. A nivel estatal destacó Chiapas como el estado que presenta el mayor porcentaje de manglar que cubre su línea de costa, con 96%; seguido de Yucatán, con 92%; y Quintana Roo, con 83%. El estado con menor ocupación de su línea de costa con manglar fue Baja California, con 0.3%. El resto de los estados se encuentra entre 79% y 11% de ocupación de manglar en su línea de costa (cuadro 2.3).

La clase de *Manglar perturbado* registró una superficie de 9 680 ha para 2020, que representa una disminución de 8 652 ha (47%) con respecto a 2015. El estado que destacó en 2020 a nivel nacional fue Nayarit, ya que tiene la mayor superficie de esta clase con un total de 2 736 ha, además de tener la mayor pérdida con 3 280 ha. Los otros estados que destacan con mayor superficie de esta clase para 2020 fueron Quintana Roo (con 1 174 ha), Sinaloa (con 1 134 ha) y Campeche (con 1 048 ha). El resto de los estados registraron superficies por debajo de 1 000 ha, a excepción de Sonora y Baja California (cuadro 2.2); este último destaca por la ausencia de esta clase a lo largo de las cinco fechas de estudio del SMMM. La clase de *Manglar perturbado* es de particular importancia, porque se considera de transición, ya sea que cambie a lo largo del tiempo a otra clase natural o antrópica o que se recupere como manglar. Esta situación dependerá del origen de la perturbación, así como de las condiciones específicas de recuperación natural (resiliencia) o de manejo que tenga. Para el periodo 2015–2020, por ejemplo, se registró una recuperación de 5 093 ha de *Manglar perturbado* a *Manglar*.

Al igual que en las evaluaciones anteriores, para 2020 la mayor superficie de manglar se encuentra en la región Península de Yucatán, con 544 169 ha (60% a nivel nacional), seguida de la región Pacífico Norte, con 181 036 ha (20%). La región Pacífico Centro se sigue manteniendo con la menor superficie a nivel nacional, con 7 275 ha (0.8%). A nivel estatal, a diferencia de fechas anteriores, en 2020 Quintana Roo es el estado con mayor superficie de manglar, con 247 017 ha (27.3% de la superficie nacional), seguido de Campeche, con 200 279 ha (22.1%), y Yucatán, con 96 873 ha (10.7%). El estado con la menor superficie de manglar a nivel nacional sigue siendo Baja California, con 42 ha (0.005%) (figura 2.7).

En las siguientes páginas se presentan los datos, estadísticas y mapas para cada estado, correspondientes a la cartografía 2020 del SMMM. En primer lugar se presentan los datos de superficie estatal de manglar, manglar perturbado, las tasas de cambio y el porcentaje de línea de costa con presencia de manglar de 1970/1980 hasta 2020, además de una gráfica de superficie de manglar a nivel estatal. Para cada entidad federativa se presentan gráficas con los porcentajes de cobertura de las clases presentes para 2015 y 2020, así como la superficie de pérdida y ganancia según la clase de uso de suelo y vegetación presentes en el área de estudio (definida principalmente por un área buffer de 5 km en relación a las zonas de manglares (Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2013)). Se muestran también gráficas de superficie de manglar expresado en hectáreas para las cinco fechas de estudio. Además de los datos de la extensión de manglar dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP) de orden federal y estatal, así como en sitios con denominación Ramsar. Cabe mencionar que la suma total no necesariamente equivale a la adición de los valores de las áreas naturales protegidas y sitios Ramsar, debido a que puede existir sobreposición entre ellos. Por último, para cada estado, se muestran los mapas de distribución del manglar y otras coberturas adyacentes para 2020.

2.5 Resultados a nivel nacional

Ver cuadro 2.2, figura 2.7 y cuadro 2.3 en las siguientes páginas.

CUADRO 2.2 Superficie estatal de manglar, manglar perturbado y tasas de cambio de 1970/1980 a 2020.

Región	Estados	SUPERFICIE 1970–1980 (ha)		SUPERFICIE 2005 (ha)		SUPERFICIE 2010 (ha)		SUPERFICIE 2015 (ha)		SUPERFICIE 2020 (ha)	
		Manglar	Manglar perturbado	Manglar	Manglar perturbado	Manglar	Manglar perturbado	Manglar	Manglar perturbado	Manglar	Manglar perturbado
Pacífico Norte	Baja California	36	0	36	0	36	0	39	0	42	0
	Baja California Sur	26 724	0	26 519	0	26 696	0	26 579	59	25 511	186
	Sonora	10 940	0	11 098	0	11 342	0	12 111	1	12 334	0
	Sinaloa	82 171	760	79 109	954	77 262	2 257	81 558	1 851	76 300	1 134
	Nayarit	78 024	0	69 784	4 862	66 932	6 309	67 096	6 016	66 849	2 736
	Total P.N.	197 895	760	186 546	5 816	182 268	8 566	187 383	7 926	181 036	4 056
Pacífico Centro	Jalisco	8 098	399	2 150	0	2 200	22	2 271	33	2 338	17
	Colima	6 589	0	3 294	0	3 241	5	3 302	73	3 487	53
	Michoacán	1 788	0	1 543	0	1 420	18	1 438	2	1 450	1
	Total P.C.	16 475	399	6 987	0	6 861	46	7 011	107	7 275	71
Pacífico Sur	Guerrero	16 348	0	8 434	82	8 141	305	6 693	1 583	7 730	499
	Oaxaca	28 501	0	18 522	6	18 611	41	18 690	634	19 673	398
	Chiapas	53 901	0	44 598	135	46 342	343	46 804	585	49 618	923
	Total P.S.	98 750	0	71 554	223	73 094	689	72 187	2 802	77 021	1 820
Golfo de México	Tamaulipas	2 831	0	3 281	0	3 099	1	3 327	54	3 664	35
	Veracruz	44 820	4	39 211	92	37 842	339	38 311	1 740	42 696	130
	Tabasco	41 999	0	44 982	36	44 591	101	45 410	425	49 225	406
	Total G.M.	89 650	4	87 474	128	85 532	441	87 048	2 219	95 585	571
Península de Yucatán	Campeche	216 969	17	199 662	208	197 623	1 256	198 853	2 067	200 279	1 048
	Yucatán	98 756	12	91 701	2 067	91 348	1 789	93 171	1 493	96 873	940
	Quintana Roo	137 910	0	130 210	464	128 048	2 037	129 902	1 717	247 017	1 174
	Total P.Y.	453 635	29	421 573	2 739	417 019	5 082	421 926	5 277	544 169	3 162
TOTALES		856 405	1 192	774 134	8 906	764 774	14 823	775 555	18 332	905 086	9 680

*El año inicial corresponde al de mayor proporción de superficie por estado en las fotografías aéreas o imágenes Landsat empleadas. /

Año inicial*	1970/1980–2005		2005–2010		2010–2015		2015–2020	
	SUPERFICIE DE CAMBIO de manglar (ha)	TASA de cambio** (%)	SUPERFICIE DE CAMBIO de manglar (ha)	TASA de cambio** (%)	SUPERFICIE DE CAMBIO de manglar (ha)	TASA de cambio** (%)	SUPERFICIE DE CAMBIO de manglar (ha)	TASA de cambio** (%)
1982	0	0.00	0	0.00	3	1.71	3	1.34
1978	-205	-0.03	177	0.13	-117	-0.09	-1 068	-0.82
1973	158	0.05	244	0.43	769	1.31	223	0.37
1985	-3062	-0.15	-1 847	-0.47	4 296	1.08	-5 258	-1.33
1970	-8 240	-0.30	-2 852	-0.83	164	0.05	-247	-0.07
	-11 349	-0.09	-4 278	-0.15	5 115	0.81	-6 347	-0.69
1971	-5 948	-3.94	50	0.47	71	0.63	67	0.58
1971	-3 295	-2.08	-53	-0.35	61	0.37	185	1.09
1974	-245	-0.35	-123	-1.66	18	0.26	12	0.16
	-9 488	-2.12	-126	-0.51	150	0.42	264	0.74
1979	-7 914	-2.55	-293	-0.71	-1 448	-3.92	1 037	2.88
1979	-9 979	-1.65	89	0.10	79	0.09	983	1.02
1972	-9 303	-0.54	1 744	0.77	462	0.20	2 814	1.17
	-27 196	-1.58	1 540	0.05	-907	-1.21	4 834	1.30
1976	450	0.60	-182	-1.14	228	1.42	337	1.93
1976	-5 609	-0.35	-1 369	-0.71	469	0.25	4 385	2.17
1972	2 983	0.22	-391	-0.17	819	0.36	3 815	1.61
	-2 176	0.16	-1 942	-0.67	1 516	0.68	8 537	1.87
1981	-17 307	-0.28	-2 039	-0.21	1 230	0.12	1 426	0.14
1979	-7 055	-0.29	-353	-0.08	1 823	0.40	3 702	0.78
1981	-7 700	-0.24	-2 162	-0.33	1 854	0.29	117 115	12.85
	-32 062	-0.27	-4 554	-0.21	4 907	0.27	122 243	5.09
	-82 271	-0.42	-9 360	-0.24	10 781	0.28	129 531	3.09

/ **Fórmula tasa de cambio (Puyravaud 2003)

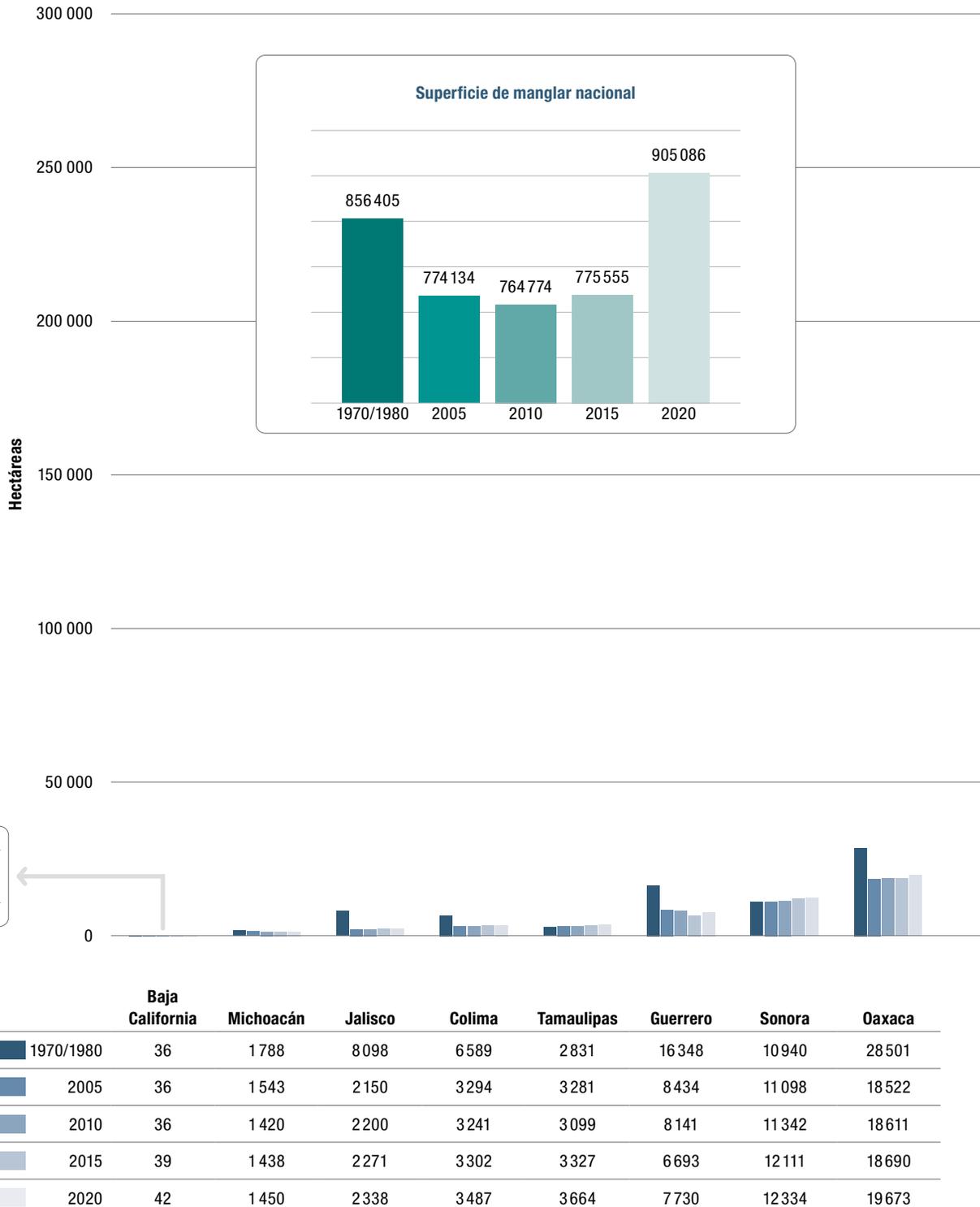
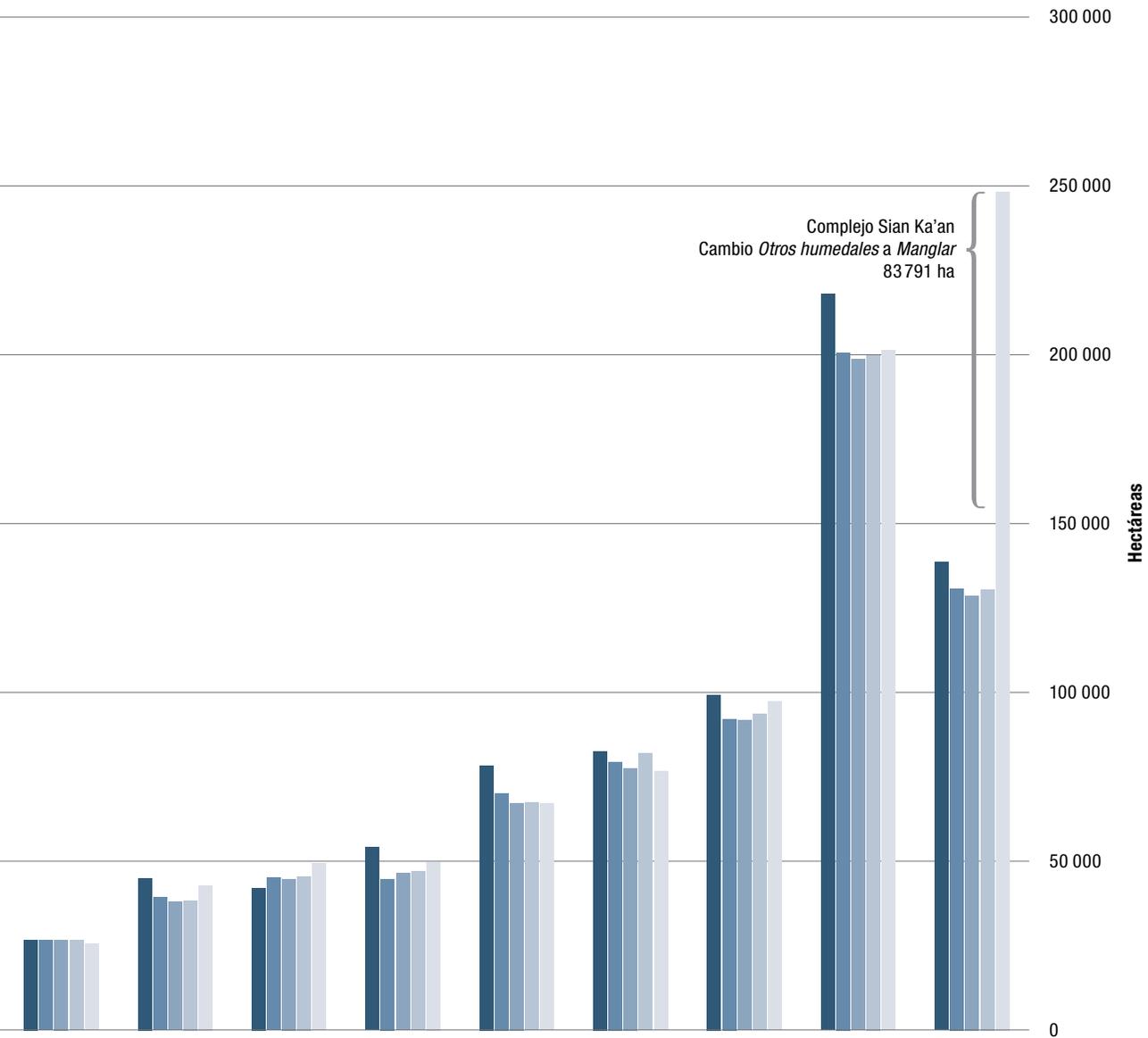


FIGURA 2.7 Superficie de manglar a nivel estatal y nacional, por cada fecha evaluada.



Baja California Sur	Veracruz	Tabasco	Chiapas	Nayarit	Sinaloa	Yucatán	Campeche	Quintana Roo
26724	44820	41999	53901	78024	82171	98756	216969	137910
26519	39211	44982	44598	69784	79109	91701	199662	130210
26696	37842	44591	46342	66932	77262	91348	197623	128048
26579	38311	45410	46804	67096	81558	93171	198853	129902
25511	42696	49225	49618	66849	76300	96873	200279	247017

CUADRO 2.3 Porcentaje de la línea de costa ocupada por manglar de 1970/1980 hasta 2020.

Línea de costa						
Región	Estados	Ocupada por manglar 1970–1980 (%)	Ocupada por manglar 2005 (%)	Ocupada por manglar 2010 (%)	Ocupada por manglar 2015 (%)	Ocupada por manglar 2020 (%)
Pacífico Norte	Baja California	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
	Baja California Sur	11	11	11	11	11
	Sonora	19	19	19	19	20
	Sinaloa	65	65	65	66	66
	Nayarit	57	55	54	54	52
Total P.N.		18	18	18	18	18
Pacífico Centro	Jalisco	36	20	21	21	24
	Colima	55	49	49	49	50
	Michoacán	16	14	14	14	14
Total P.C.		34	24	25	25	26
Pacífico Sur	Guerrero	51	44	44	43	43
	Oaxaca	53	51	52	50	53
	Chiapas	98	95	95	95	96
Total P.S.		61	57	57	56	57
Golfo de México	Tamaulipas	22	25	24	24	30
	Veracruz	34	34	34	34	35
	Tabasco	70	66	66	66	68
Total G.M.		36	36	35	35	48
Península de Yucatán	Campeche	81	77	77	79	79
	Yucatán	93	91	91	92	92
	Quintana Roo	76	74	73	75	83
Total P.Y.		80	78	77	78	83
TOTAL NACIONAL		39	37	37	37	39

2.6 Índice de mapas

Región Pacífico Norte

- Baja California / 40
- Baja California Sur / 44
- Sonora / 48
- Sinaloa / 52
- Nayarit / 56



Región Pacífico Centro

- Jalisco / 60
- Colima / 64
- Michoacán / 68



Región Pacífico Sur

- Guerrero / 72
- Oaxaca / 76
- Chiapas / 80



Región Golfo de México

- Tamaulipas / 84
- Veracruz / 88
- Tabasco / 92



Región Península de Yucatán

- Campeche / 96
- Yucatán / 100
- Quintana Roo / 104



110°0'W

30°0'N

25°0'N

20°0'N

15°0'N



Región Pacífico Norte

Región Pacífico Centro

OCEANO PACÍFICO

110°0'W

100°0'W

90°0'W



ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

GOLFO DE MÉXICO

30°0'N

25°0'N

20°0'N

15°0'N

84

Región Golfo de México

Región Península de Yucatán

MÉXICO

88

100

104

96

92

92

72

72

76

76

80

BELICE

GUATEMALA

HONDURAS

EL SALVADOR

Región Pacífico Sur

100°0'W

90°0'W

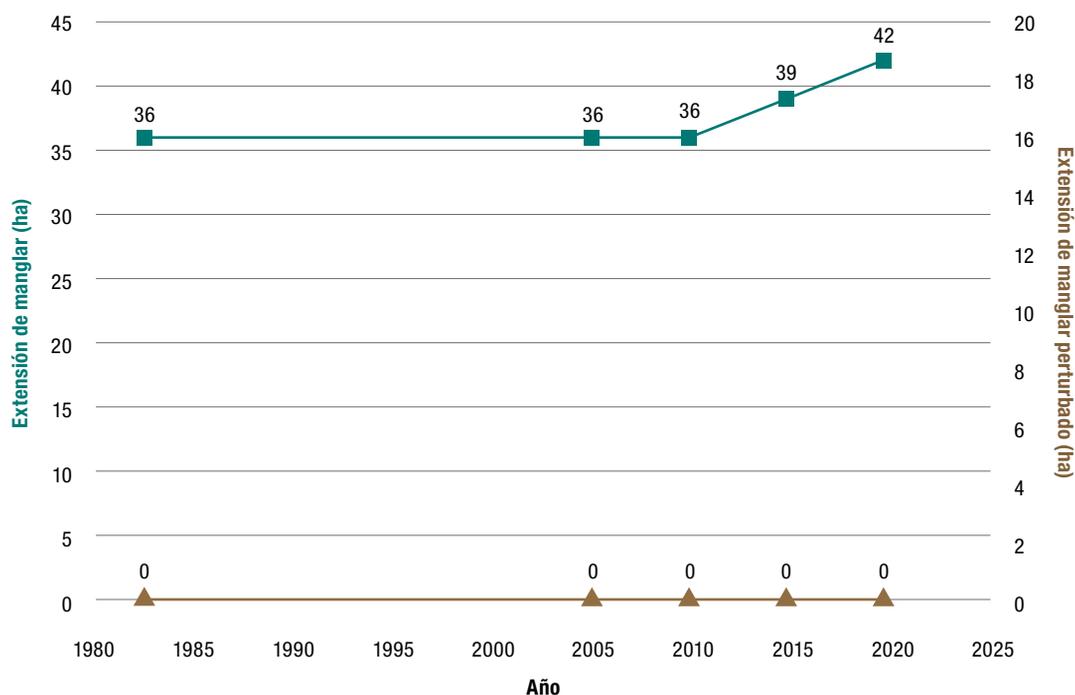
Baja California



Manglar en Isla Partida, Baja California. FOTO: N.V.

Baja California

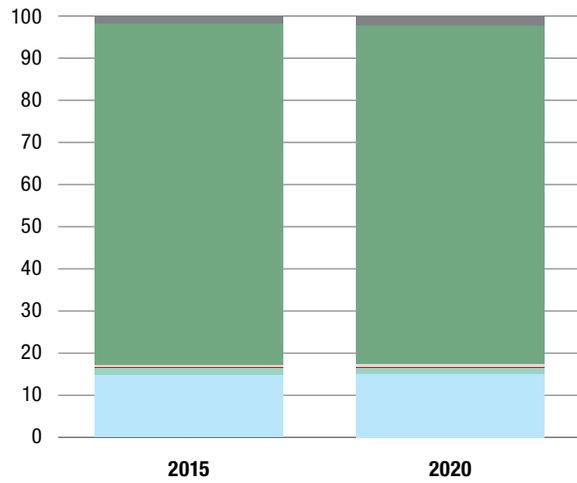
	Superficie (ha)				
	1982	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	36	36	36	39	42
Extensión del manglar perturbado	0	0	0	0	0
Extensión de la línea de costa (km)	1 474	1 474	1 474	1 474	1 474
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	36	36	36	39	42
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	34	34	33	36
Total de manglar bajo protección	36	36	36	39	42
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	1	1	1	1
Sitios Ramsar con manglar	0	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	1	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	100	100	100	100	100



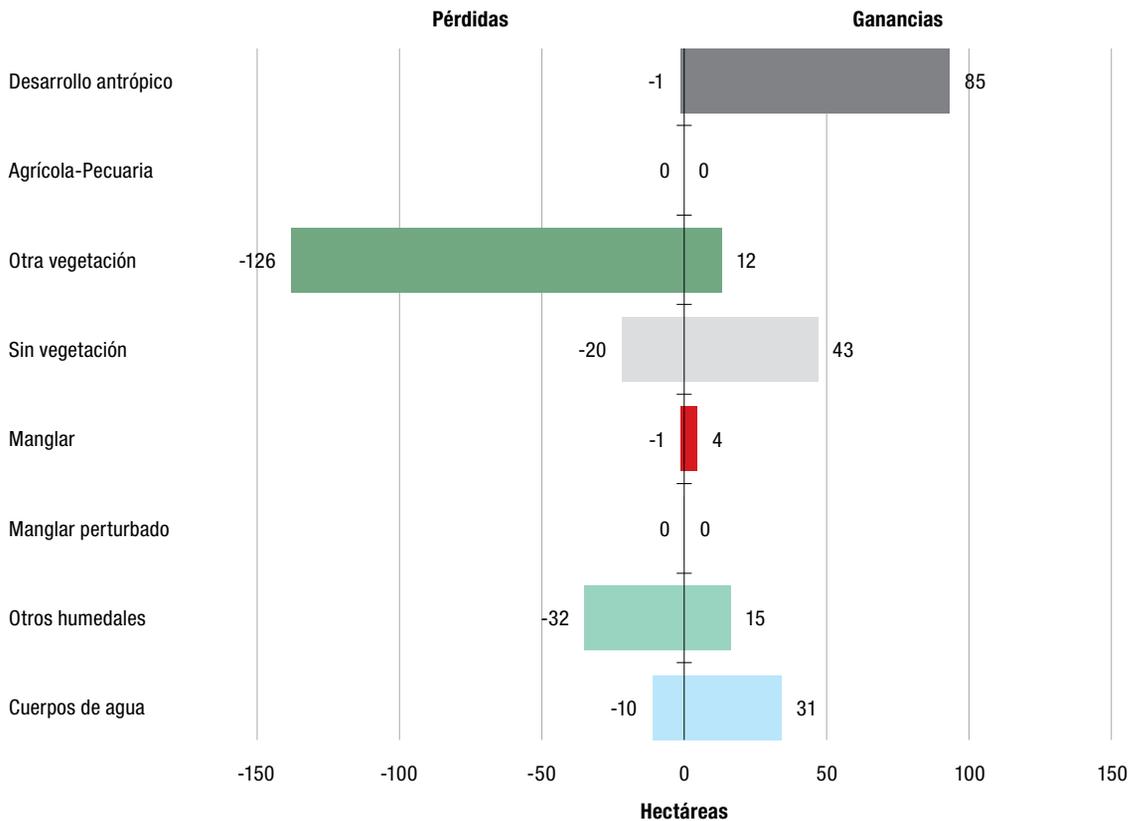
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Baja California.

Baja California

	2015	2020
Desarrollo antrópico	1.71	2.22
Agrícola-Pecuaria	0.00	0.00
Otra vegetación	81.03	80.33
Sin vegetación	0.52	0.66
Manglar	0.24	0.26
Manglar perturbado	0.00	0.00
Otros humedales	1.63	1.53
Cuerpos de agua	14.88	15.01

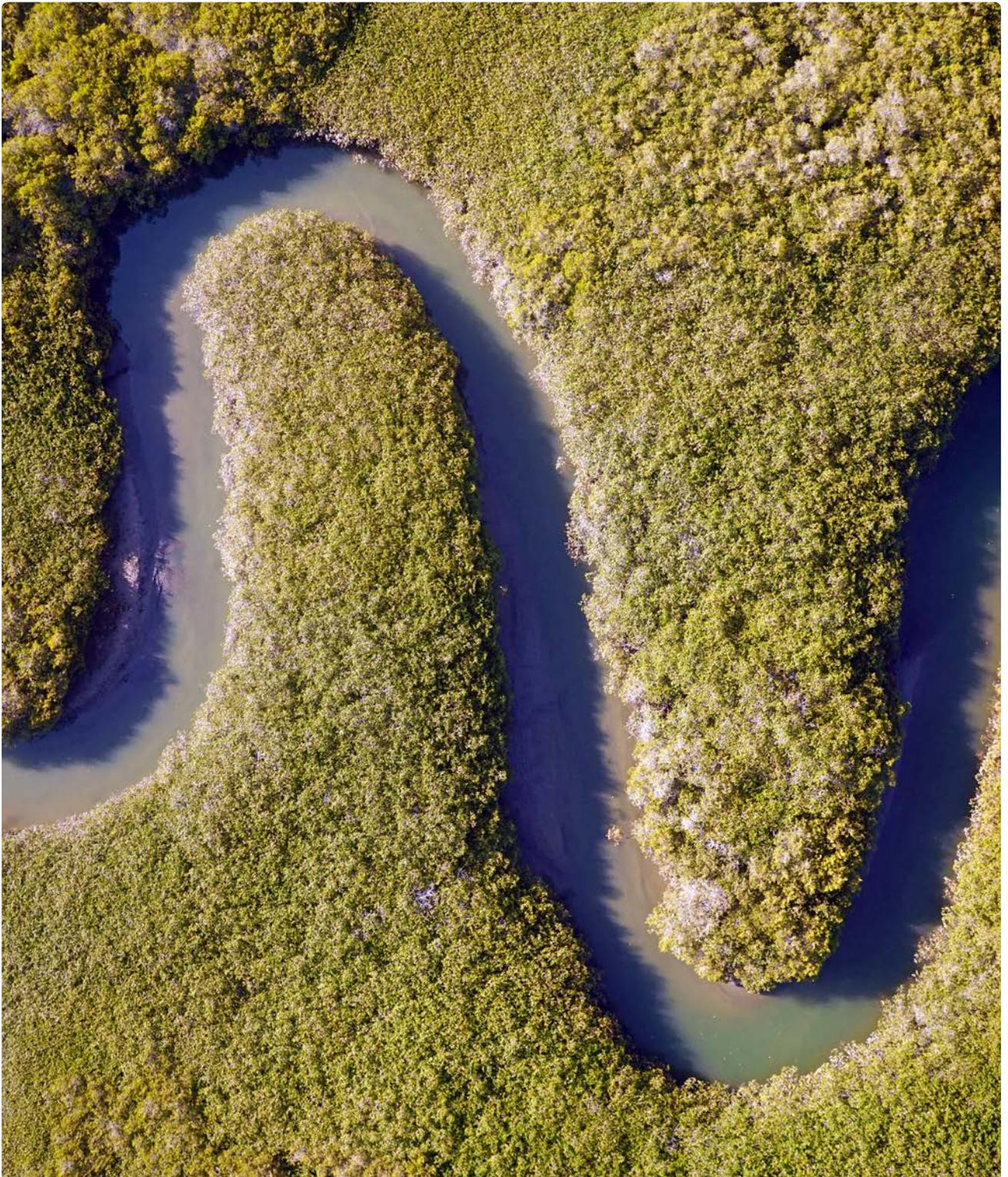


Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Baja California** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Baja California**.

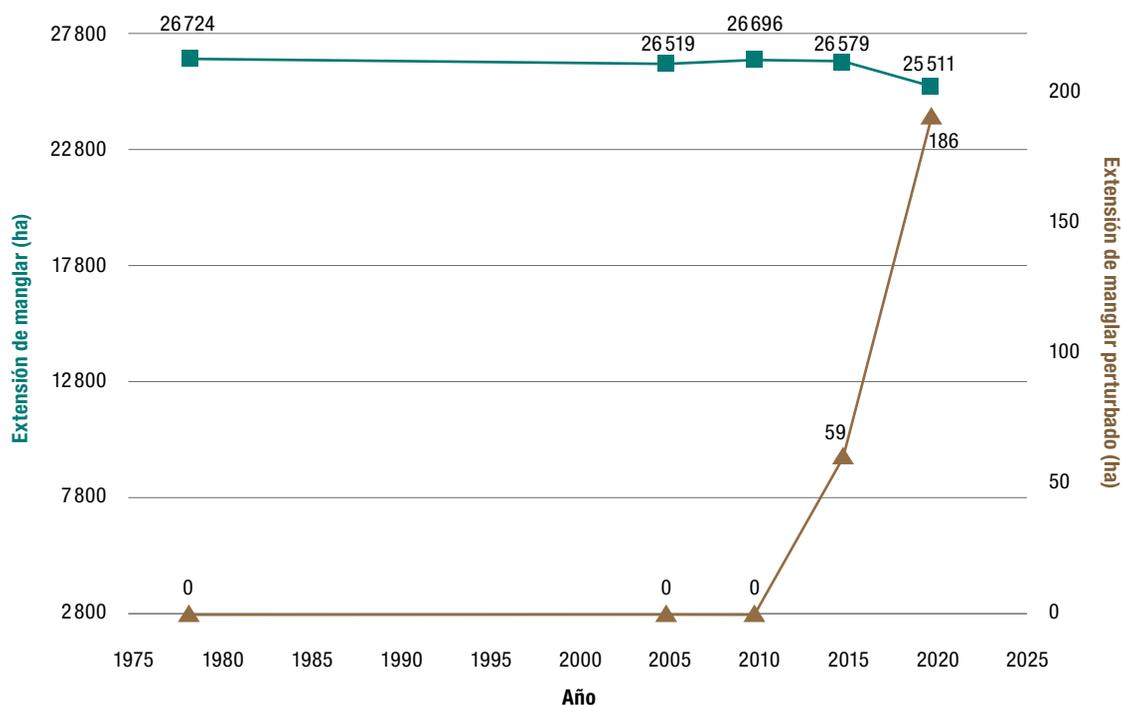
Baja California Sur



Manglar cercano a Adolfo López Mateos, Baja California Sur. FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Baja California Sur

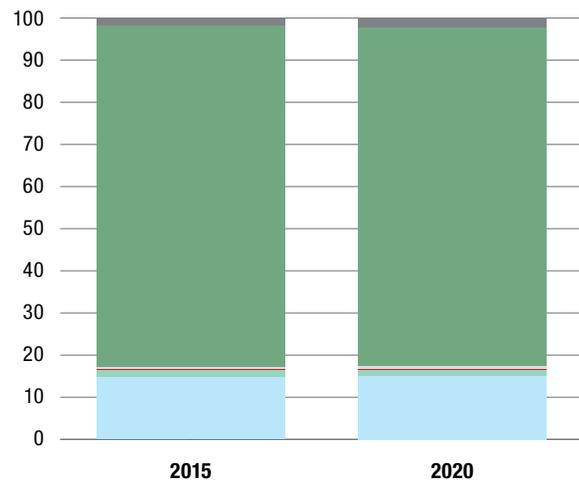
	Superficie (ha)				
	1978	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	26 724	26 519	26 696	26 579	25 511
Extensión del manglar perturbado	0	0	0	59	186
Extensión de la línea de costa (km)	2 087	2 087	2 087	2 087	2 087
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	150	3 080	3 231	3 998	7 822
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	2 044	2 342	2 863	2 722
Total de manglar bajo protección	150	3 081	3 424	4 200	8 011
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	3	3	3	3
Sitios Ramsar con manglar	0	1	3	3	3
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	1	2	3	4	5
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	11	11	11	11	11
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	1	12	13	16	31



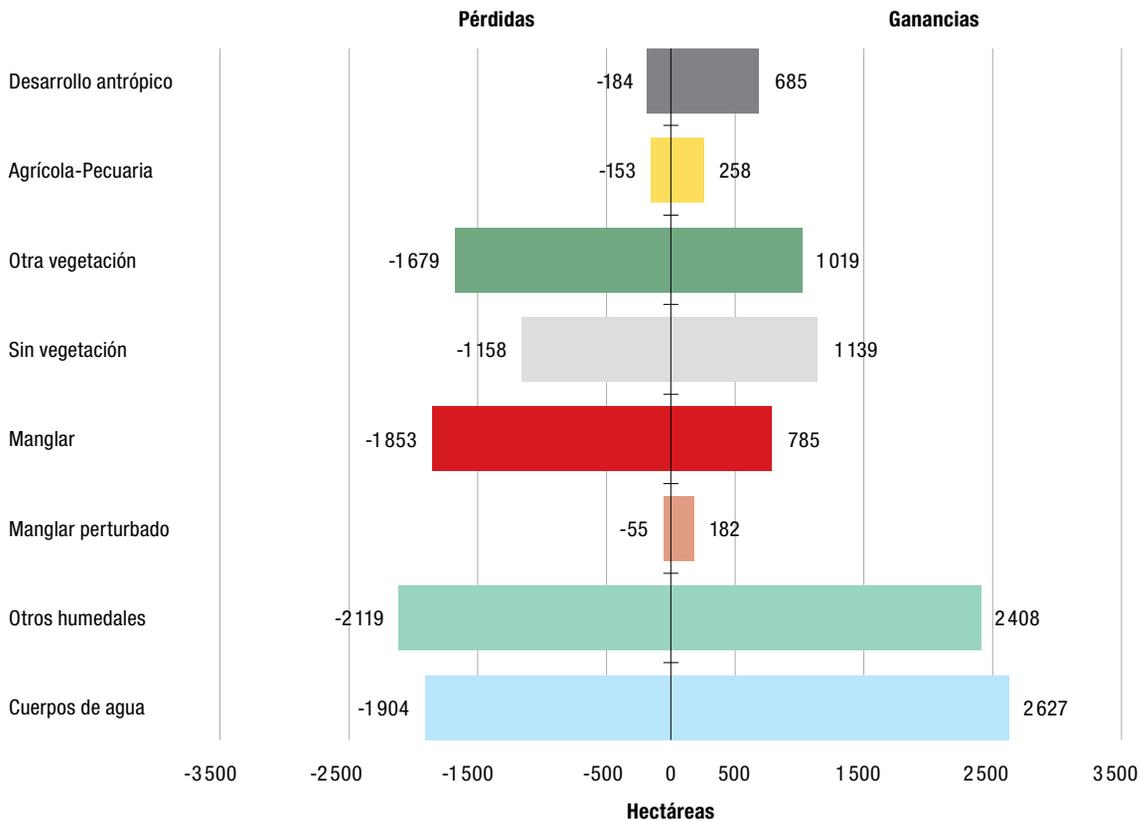
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en Baja California Sur.

Baja California Sur

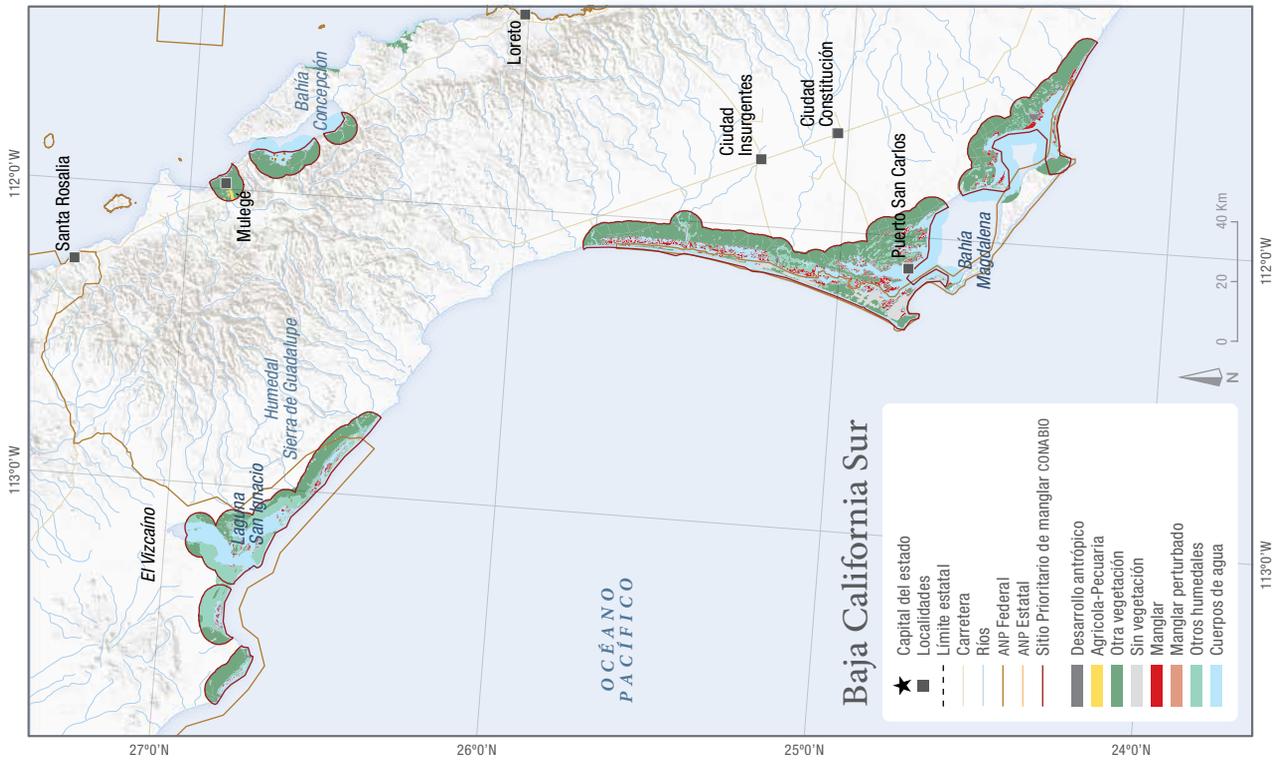
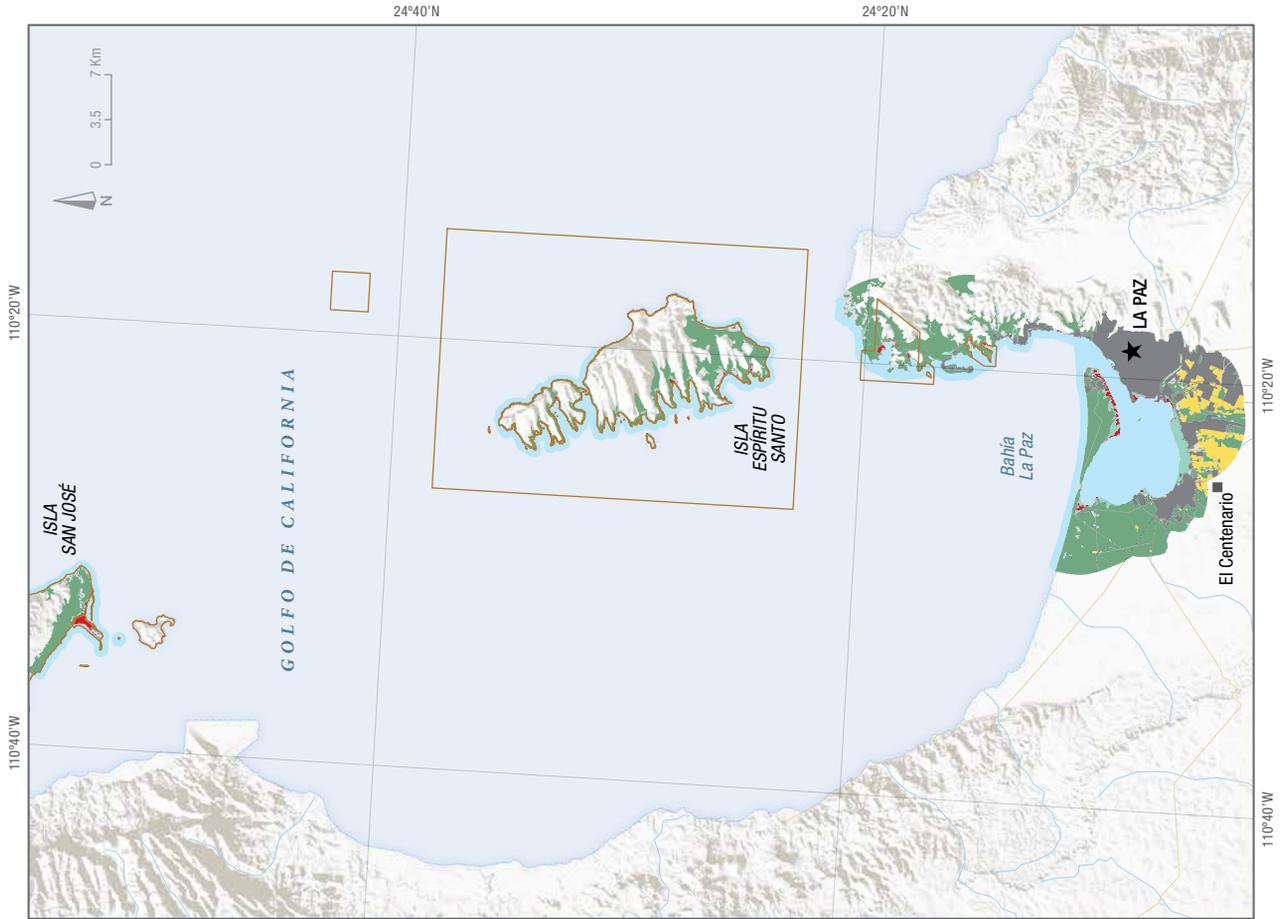
	2015	2020
Desarrollo antrópico	1.86	1.96
Agrícola-Pecuaria	0.44	0.46
Otra vegetación	45.01	44.88
Sin vegetación	3.81	3.81
Manglar	5.22	5.01
Manglar perturbado	0.01	0.04
Otros humedales	10.75	10.80
Cuerpos de agua	32.89	33.03



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en Baja California Sur en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en Baja California Sur.



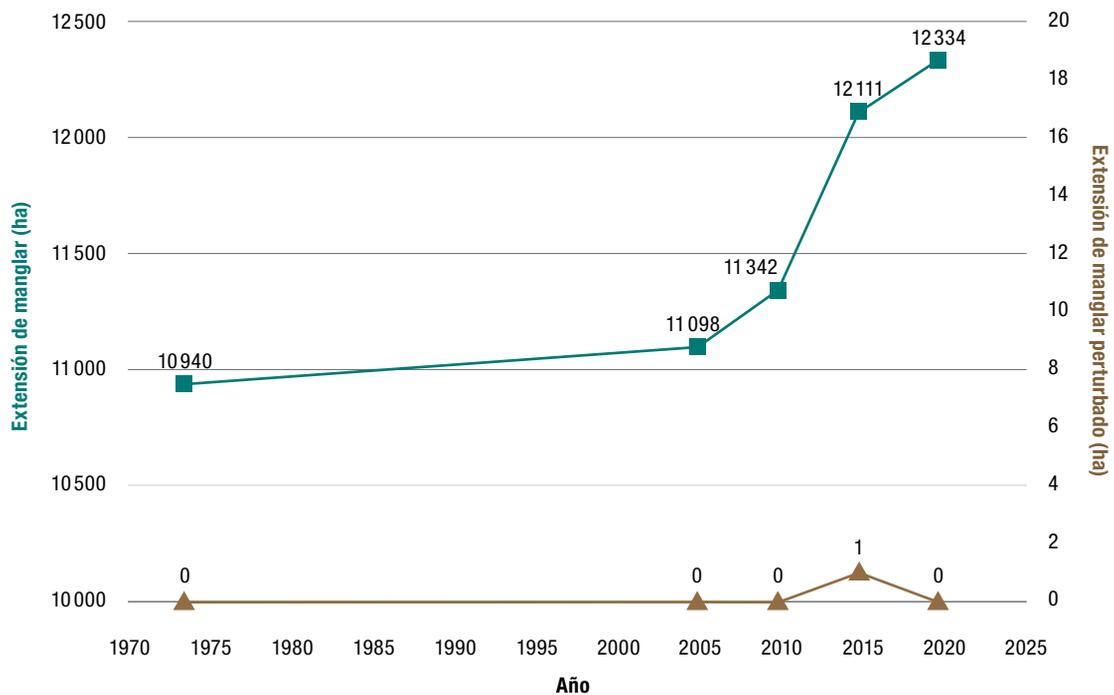
Sonora



Transición de especies de manglar en Estero El Soldado, Sonora. FOTO: S.V.S. CONABIO-SEMAR.

Sonora

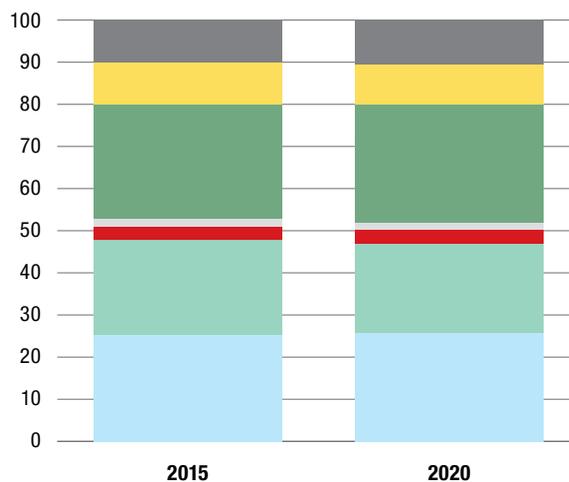
	Superficie (ha)				
	1973	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	10 940	11 098	11 342	12 111	12 334
Extensión del manglar perturbado	0	0	0	1	0
Extensión de la línea de costa (km)	1 186	1 186	1 186	1 186	1 186
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	1 023	1 008	1 424	1 423
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	22	36	35
Manglar en sitios Ramsar	0	0	7 063	9 033	9 153
Total de manglar bajo protección	0	1 023	7 269	9 283	9 403
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	2	2	2	2
Sitios Ramsar con manglar	0	0	5	6	6
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	1	1	1
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	19	19	19	19	20
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	9	64	77	76



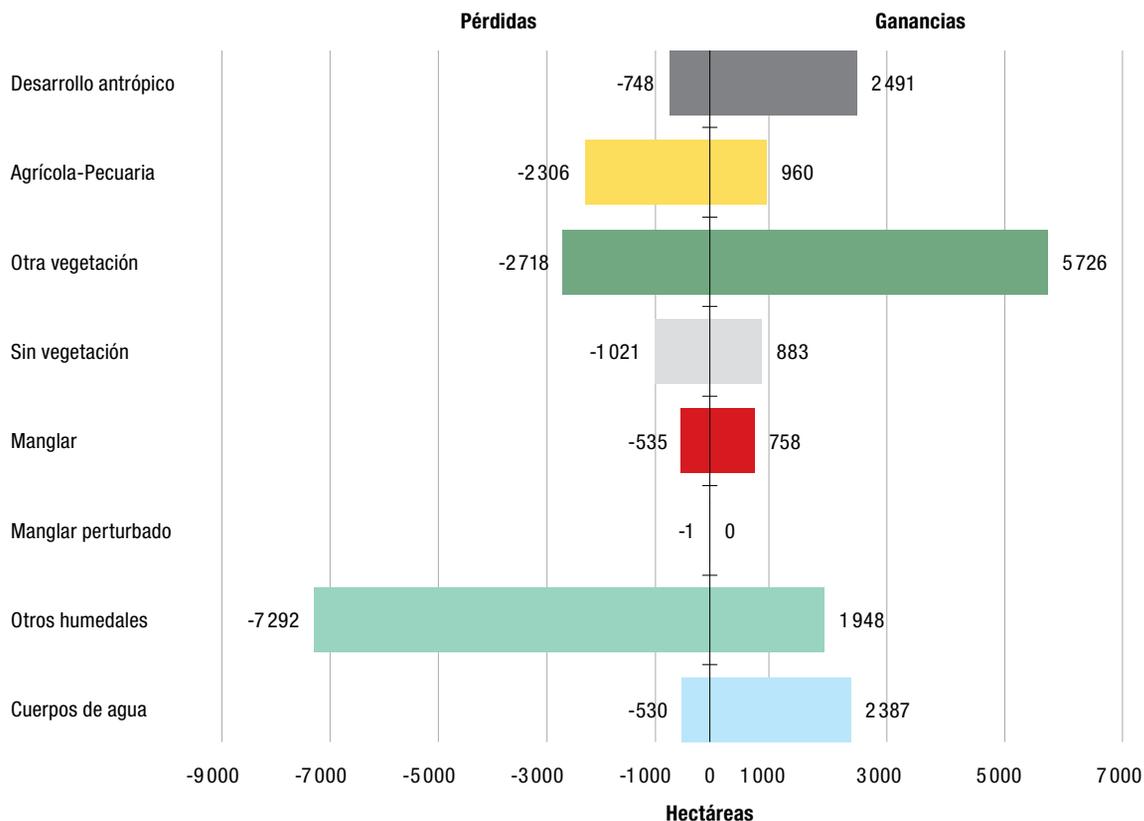
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Sonora**.

Sonora

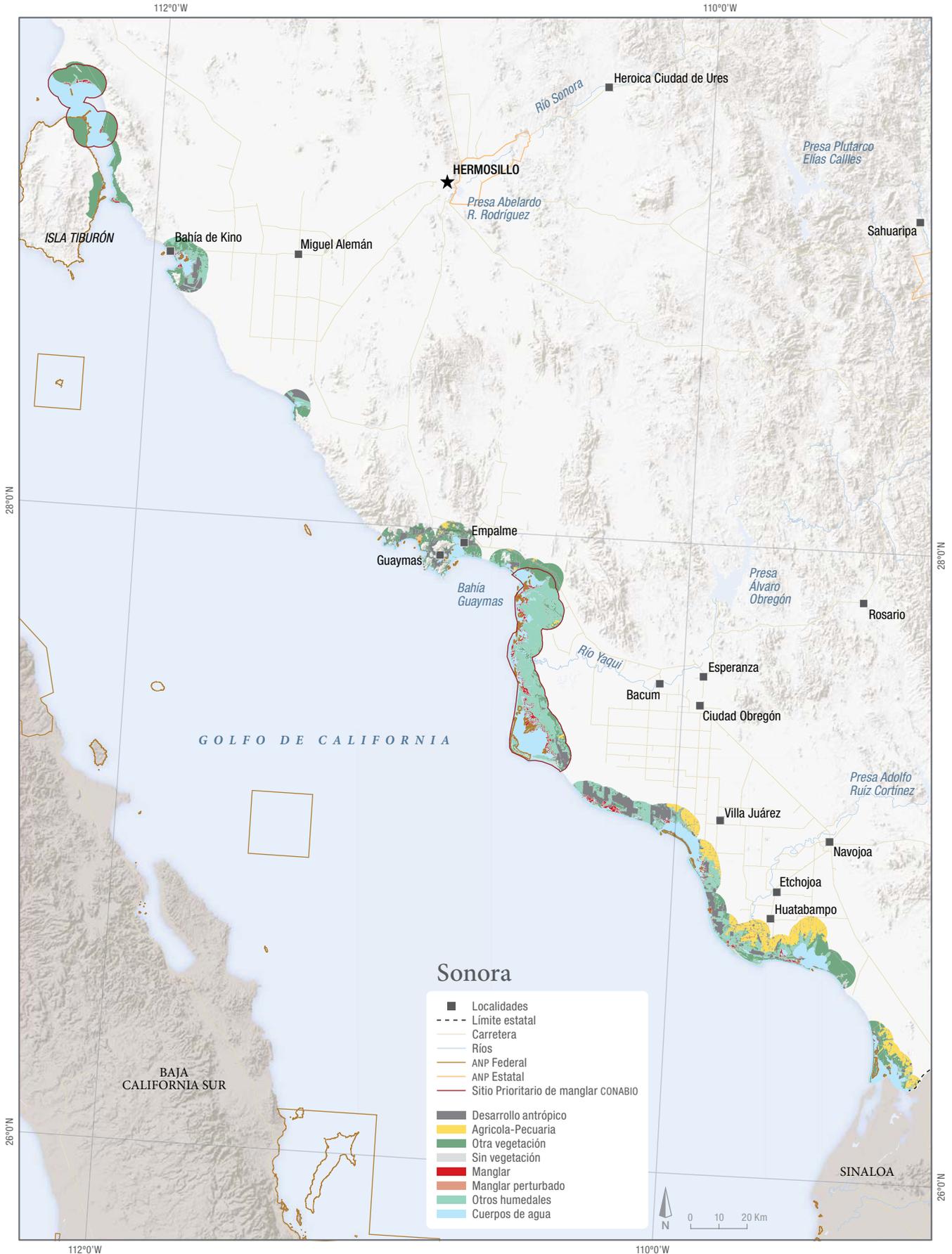
	2015	2020
Desarrollo antrópico	10.04	10.50
Agrícola-Pecuaria	9.98	9.62
Otra vegetación	27.17	27.98
Sin vegetación	1.73	1.69
Manglar	3.26	3.32
Manglar perturbado	0.00	0.00
Otros humedales	22.40	20.96
Cuerpos de agua	25.44	25.94



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Sonora** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Sonora**.



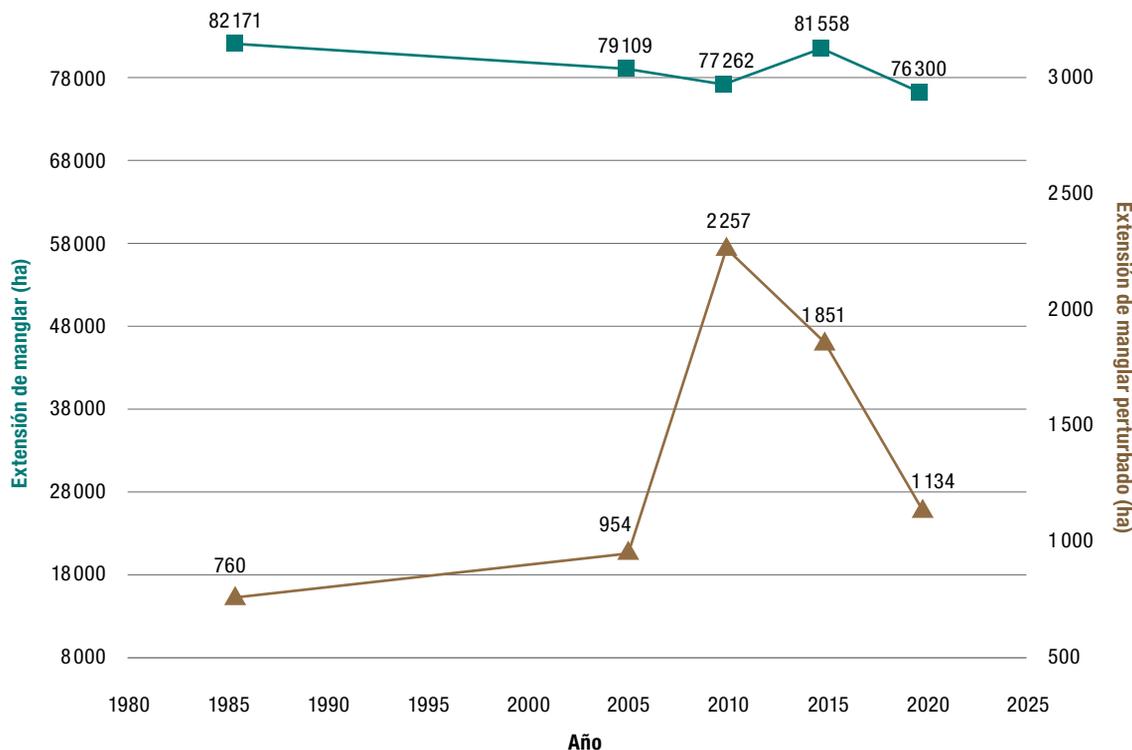
Sinaloa



Manglar en Bahía Altata, Sinaloa. FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Sinaloa

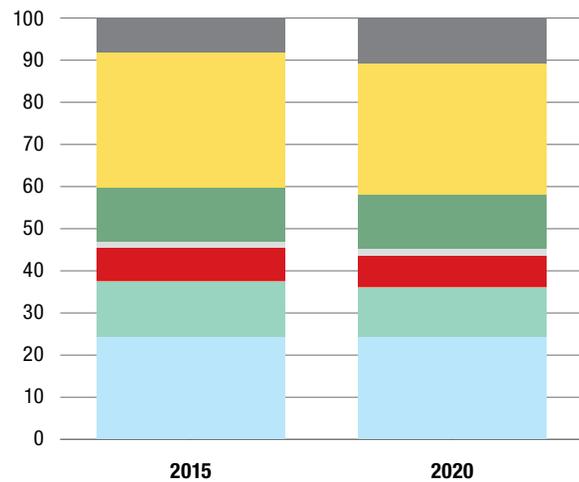
	Superficie (ha)				
	1985	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	82 171	79 109	77 262	81 558	76 300
Extensión del manglar perturbado	760	954	2 257	1 851	1 134
Extensión de la línea de costa (km)	634	634	634	634	634
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	7 724	7 815	7 742	9 116	9 761
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	356	351	414	408
Manglar en sitios Ramsar	0	28 648	53 001	59 037	52 711
Total de manglar bajo protección	7 724	26 805	53 913	60 268	54 053
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	4	4	4	4
Sitios Ramsar con manglar	0	3	9	9	9
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	1	2	2	3	3
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	1	1	1	1
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	65	65	65	66	66
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	9	34	70	74	71



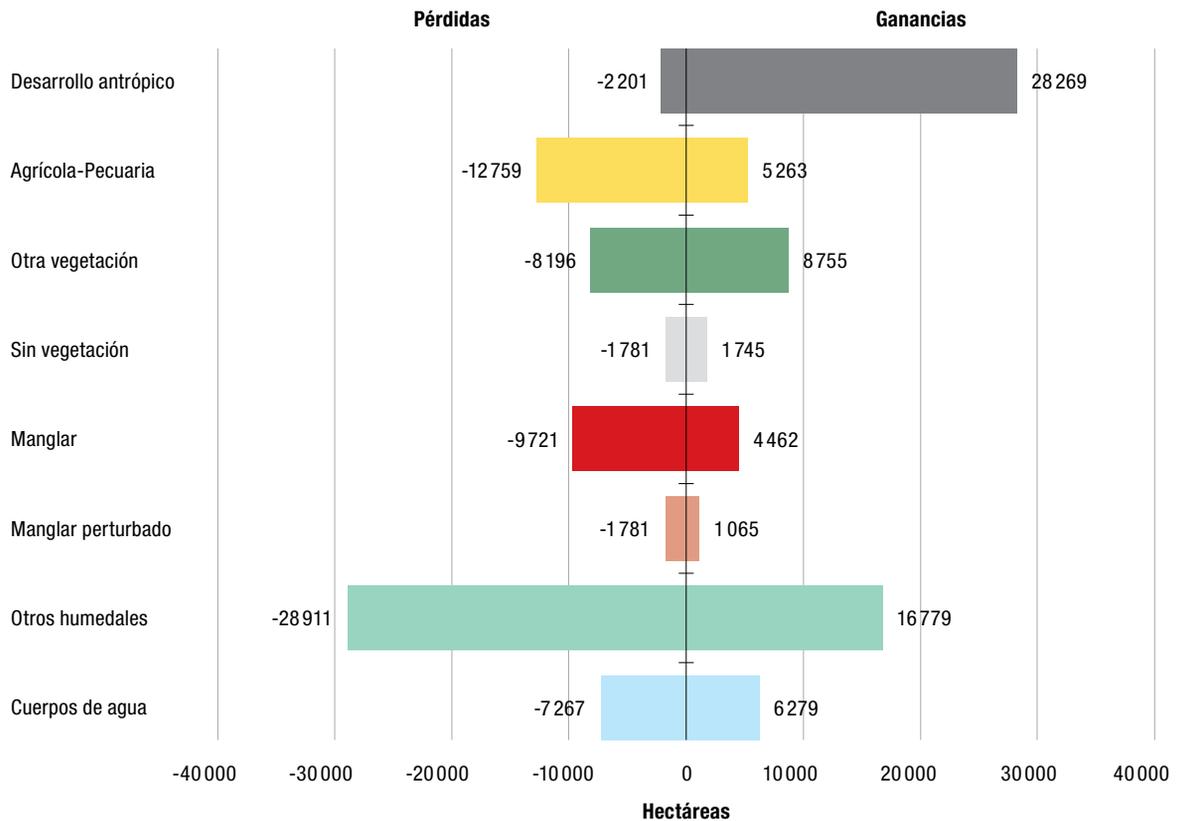
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Sinaloa.

Sinaloa

	2015	2020
Desarrollo antrópico	8.12	10.67
Agrícola-Pecuaria	32.09	31.36
Otra vegetación	12.70	12.76
Sin vegetación	1.53	1.53
Manglar	7.95	7.44
Manglar perturbado	0.18	0.11
Otros humedales	12.94	11.76
Cuerpos de agua	24.48	24.38



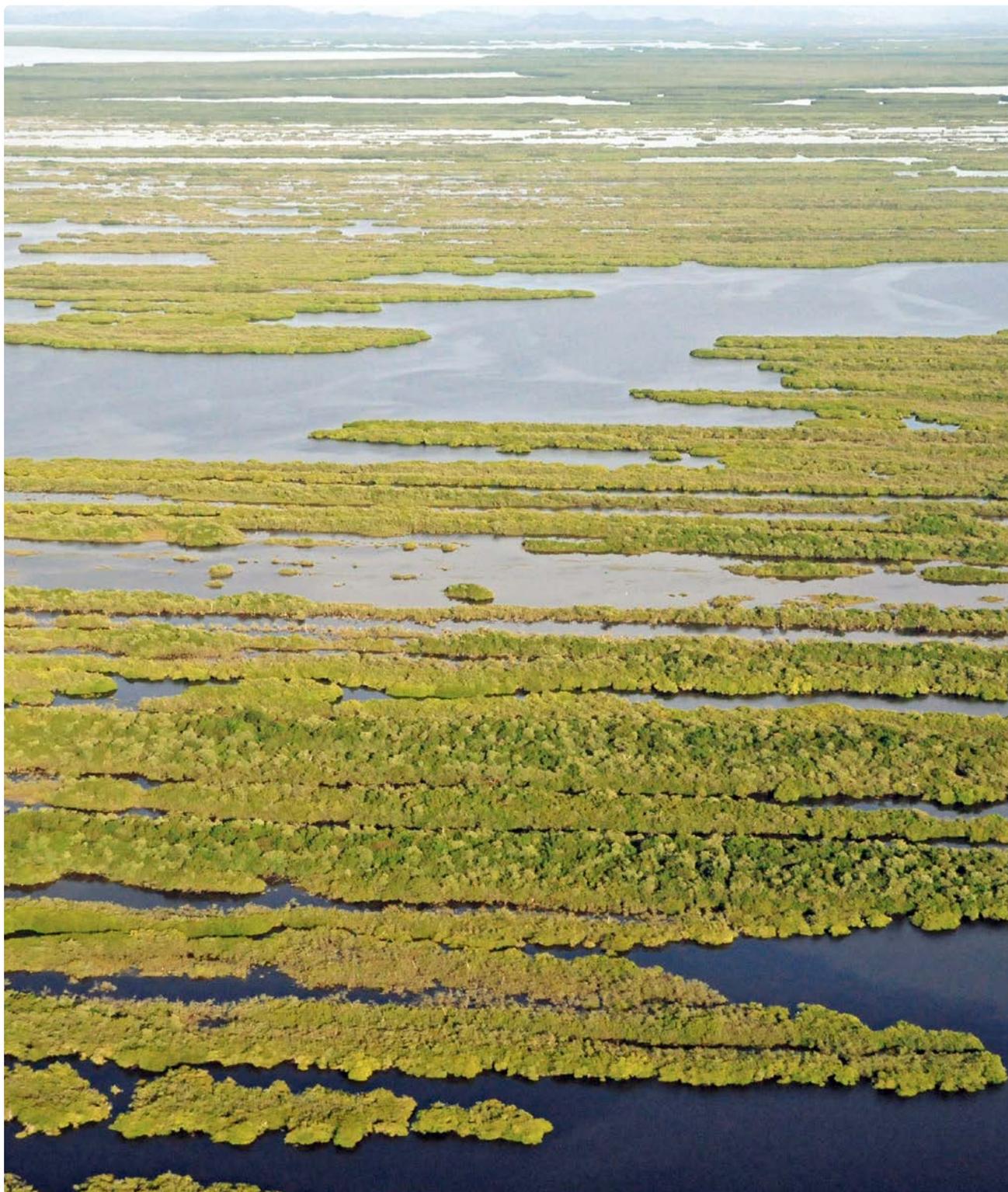
Porcentaje de cobertura en las clases presentes en Sinaloa en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en Sinaloa.



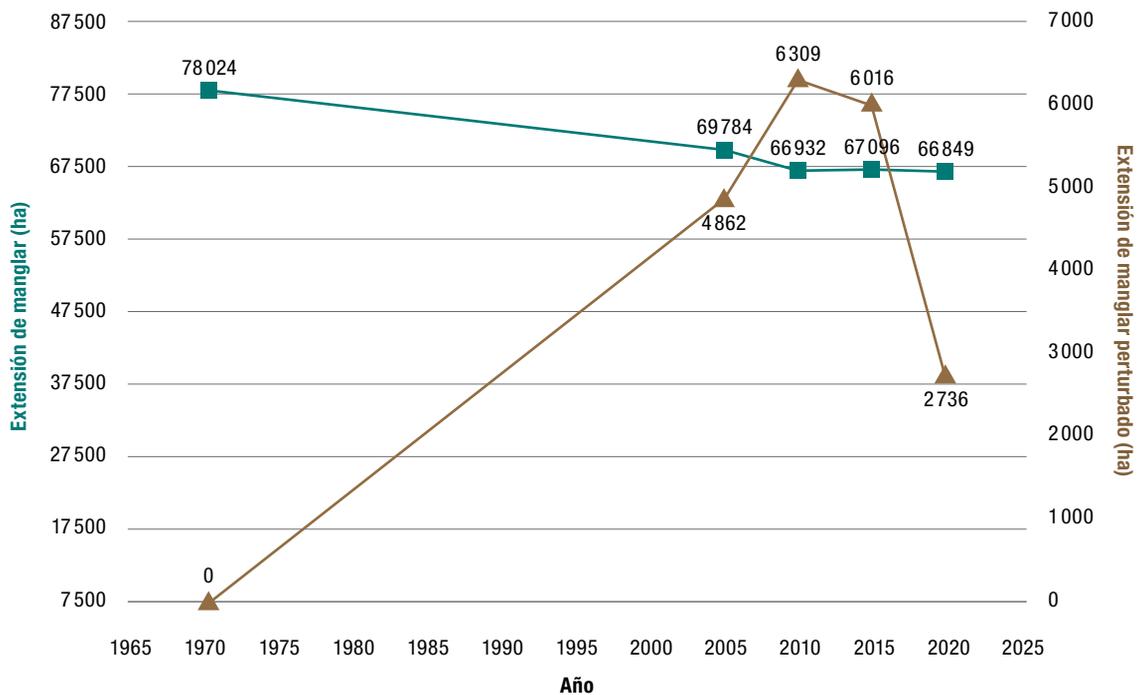
Nayarit



Manglar en Marismas Nacionales, Nayarit. FOTO: E.V.C. CONABIO-SEMAR.

Nayarit

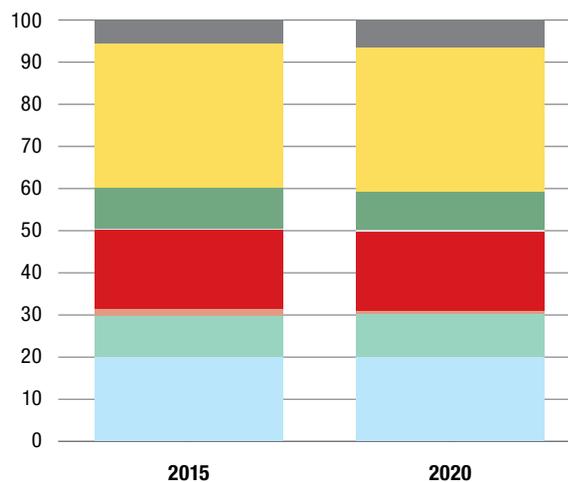
	Superficie (ha)				
	1970	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	78 024	69 784	66 932	67 096	66 849
Extensión del manglar perturbado	0	4 862	6 309	6 016	2 736
Extensión de la línea de costa (km)	299	299	299	299	299
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	0	55 255	55 962	55 876
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	67 316	66 887	65 745	65 450
Total de manglar bajo protección	0	67 316	66 887	65 985	65 704
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	1	1	1	1
Sitios Ramsar con manglar	0	1	2	2	2
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	0	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	57	55	54	54	52
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	96	100	98	98



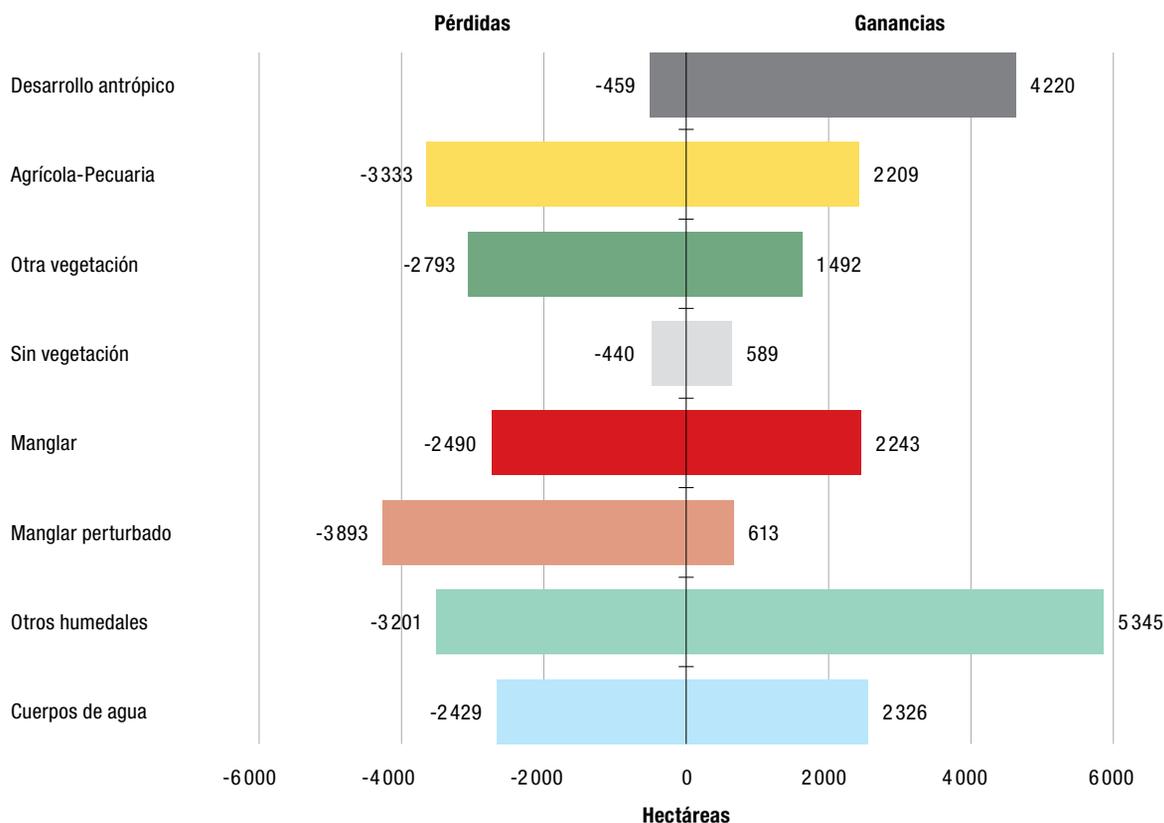
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Nayarit.

Nayarit

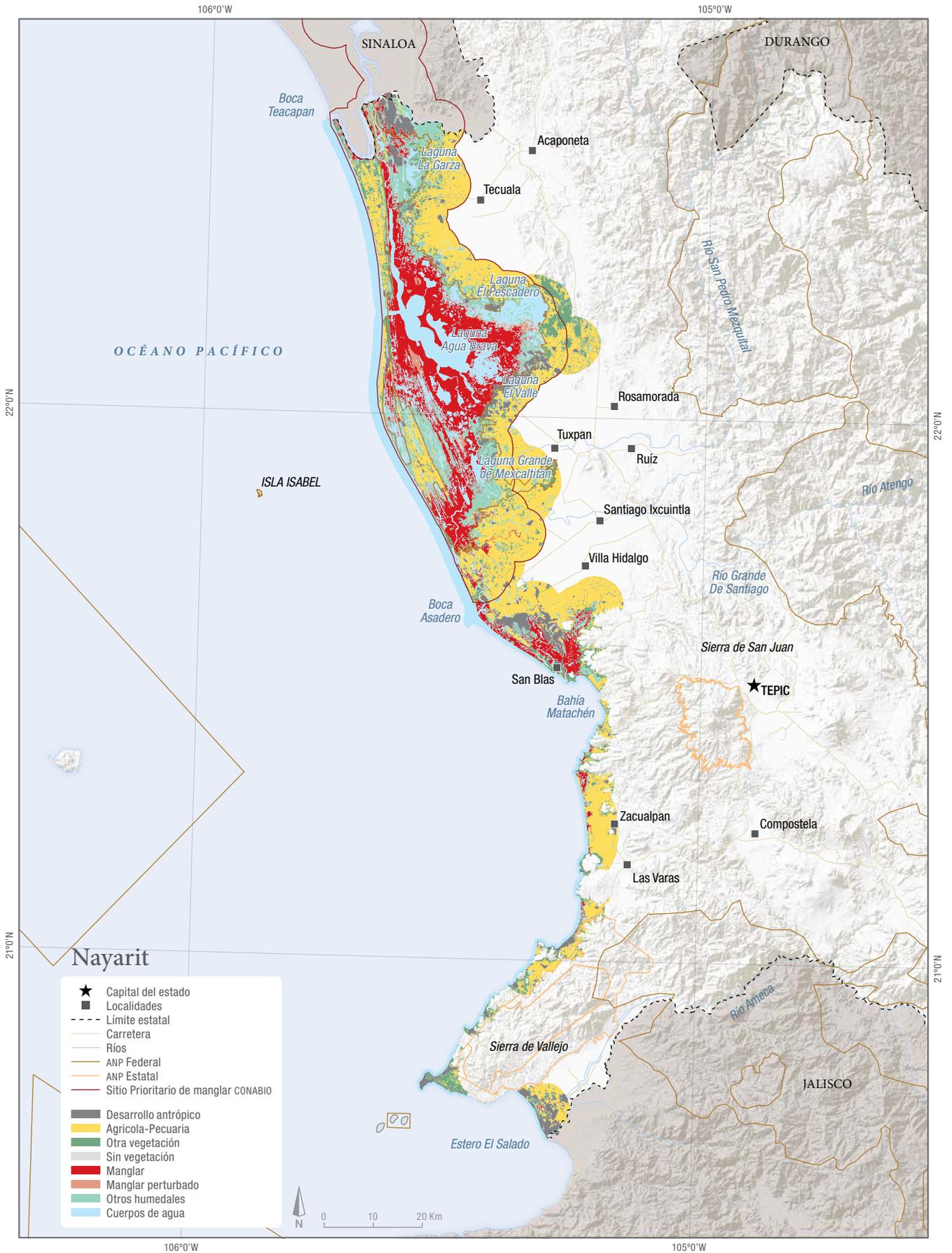
	2015	2020
Desarrollo antrópico	5.42	6.47
Agrícola-Pecuaria	34.39	34.08
Otra vegetación	9.58	9.22
Sin vegetación	0.43	0.47
Manglar	18.71	18.64
Manglar perturbado	1.68	0.76
Otros humedales	9.62	10.22
Cuerpos de agua	20.17	20.14



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Nayarit** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Nayarit**.



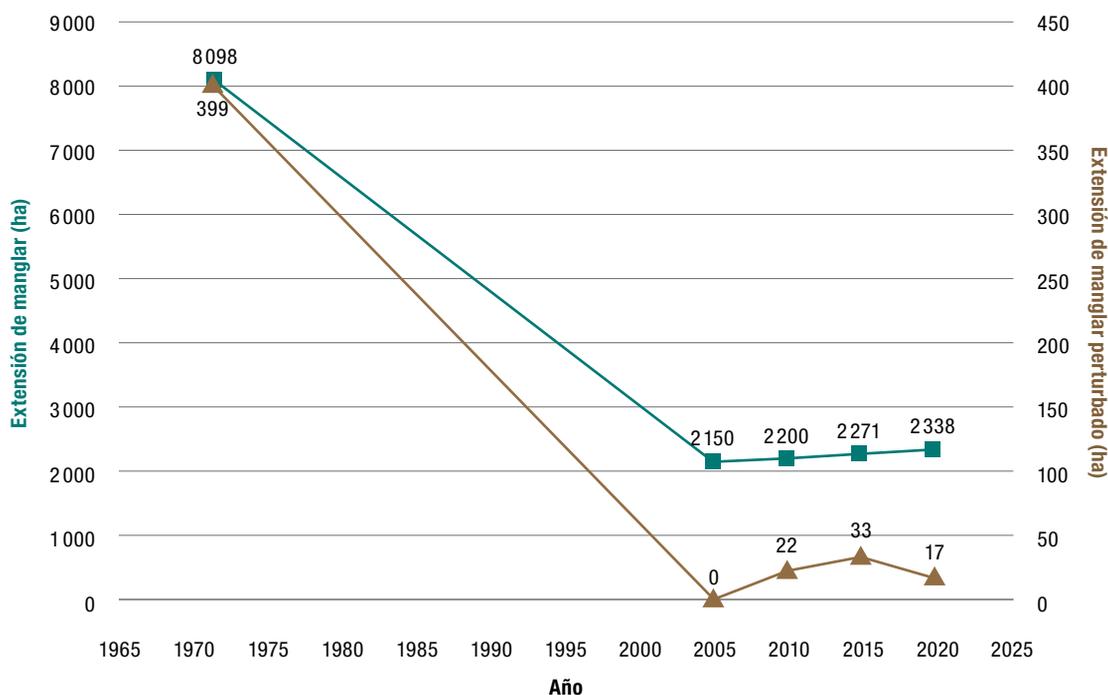
Jalisco



Manglar sobre una laguna costera en La Huerta, Jalisco. FOTO: S.V.S. CONABIO-SEMAR.

Jalisco

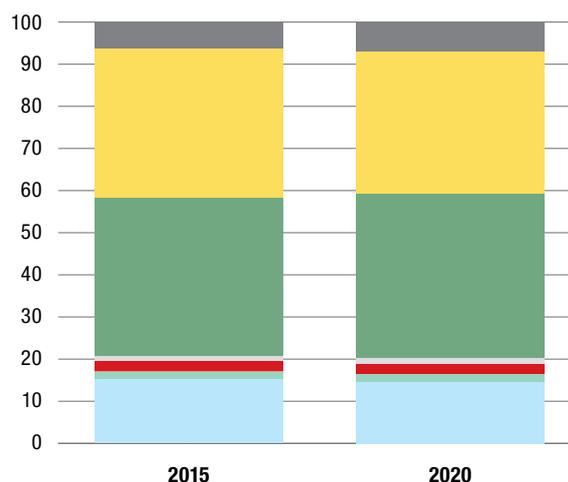
	Superficie (ha)				
	1971	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	8 098	2 150	2 200	2 271	2 338
Extensión del manglar perturbado	399	0	22	33	17
Extensión de la línea de costa (km)	346	346	346	346	346
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	153	132	123	100
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	46	45	101	100
Manglar en sitios Ramsar	0	150	1 474	1 580	1 598
Total de manglar bajo protección	0	199	1 522	1 685	1 701
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	4	4	4	4
Sitios Ramsar con manglar	0	1	7	8	8
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	2	2	3	3
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	1	1	1	1
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	36	20	21	21	24
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	9	69	74	73



Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Jalisco.

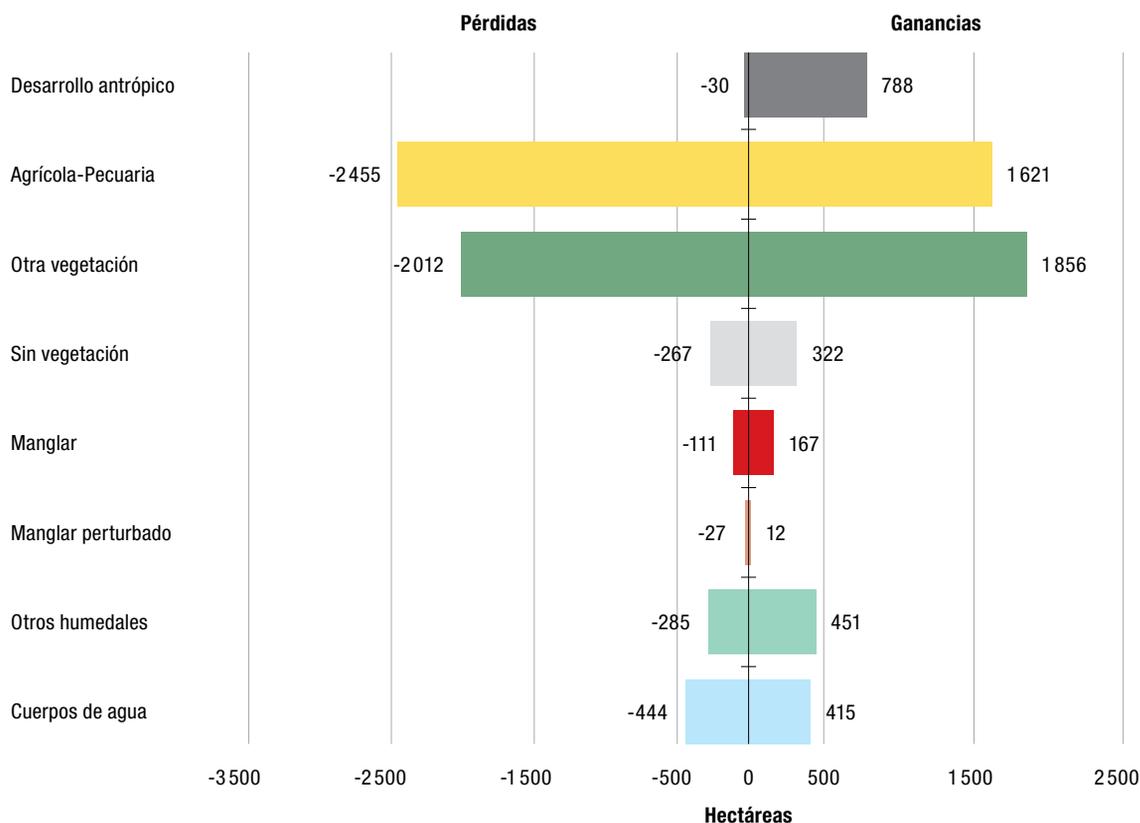
Jalisco

	2015	2020
Desarrollo antrópico	6.20	7.07
Agrícola-Pecuaria	33.90	33.70
Otra vegetación	37.44	38.81
Sin vegetación	1.35	1.50
Manglar	2.33	2.40
Manglar perturbado	0.03	0.02
Otros humedales	1.73	1.92
Cuerpos de agua	14.01	14.59



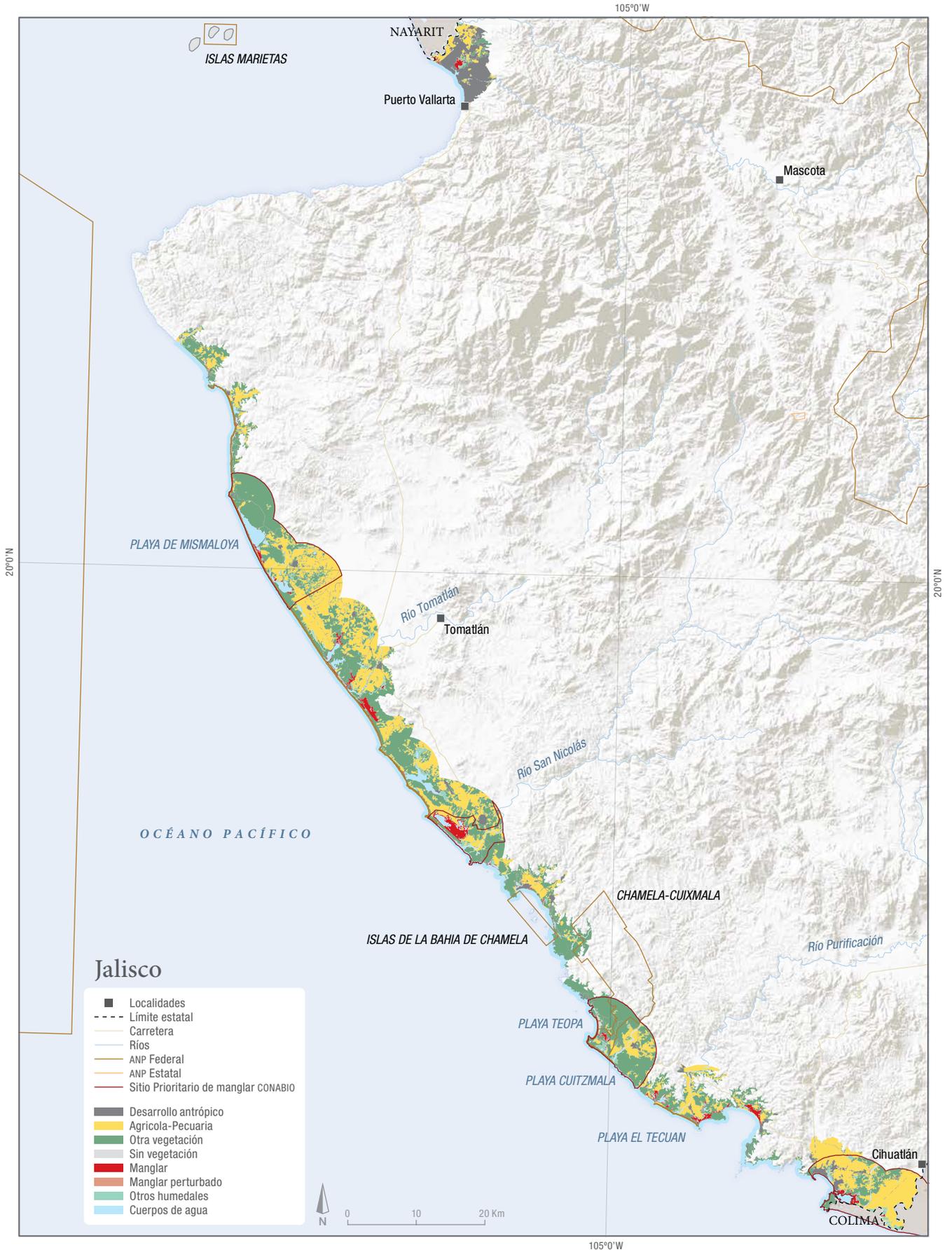
Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Jalisco** en el área de estudio del SMMM.*

* Considerando que la superficie del área de estudio (manglar y clases aledañas) para Jalisco en el año 2020 fue de 97 405 ha (aumentó 2 923 ha).



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Jalisco**.*

* Las superficies de cambio de las clases únicamente representan el área que se superpone entre 2015 y 2020.



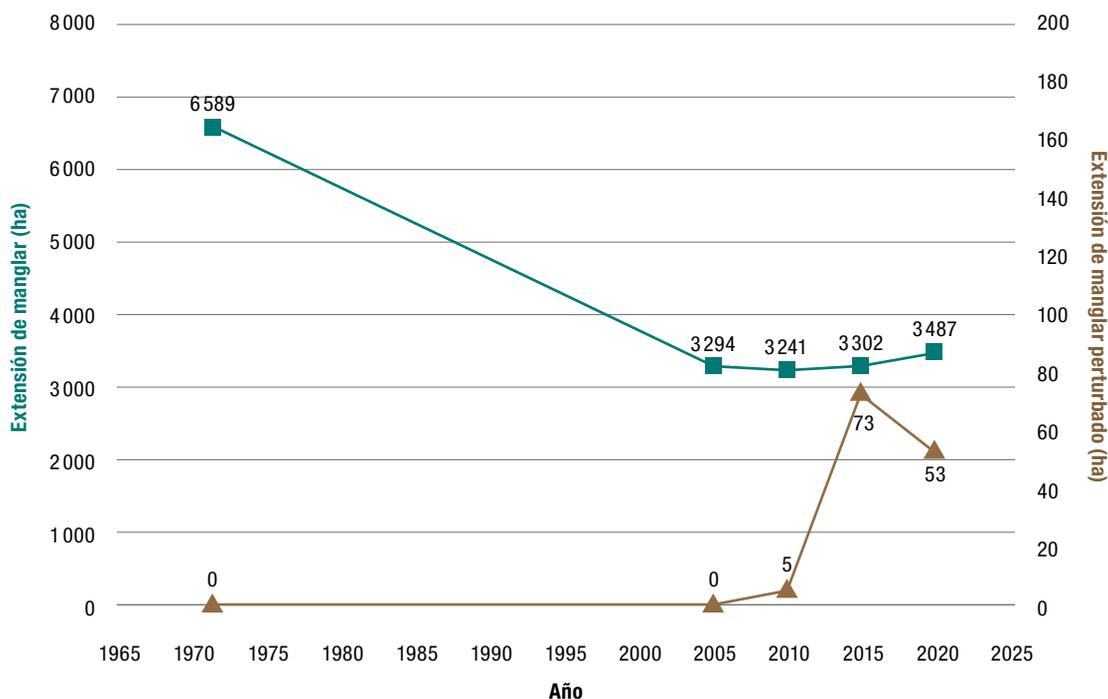
Colima



Vista aérea del manglar en Coyutlán, Colima. FOTO: A.H.S.C UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Colima

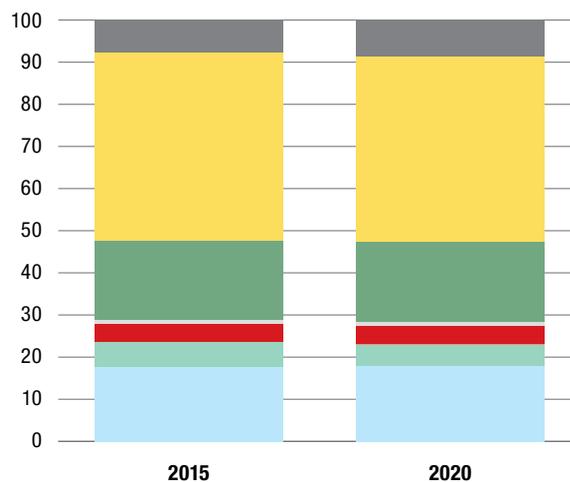
	Superficie (ha)				
	1971	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	6 589	3 294	3 241	3 302	3 487
Extensión del manglar perturbado	0	0	5	73	53
Extensión de la línea de costa (km)	159	159	159	159	159
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	0	0	0	0
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	0	252	1 210	1 248
Total de manglar bajo protección	0	0	0	1 210	1 248
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	2	2	2	2
Sitios Ramsar con manglar	0	0	1	3	3
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	0	0	0	0
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	55	49	49	49	50
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	0	8	37	36



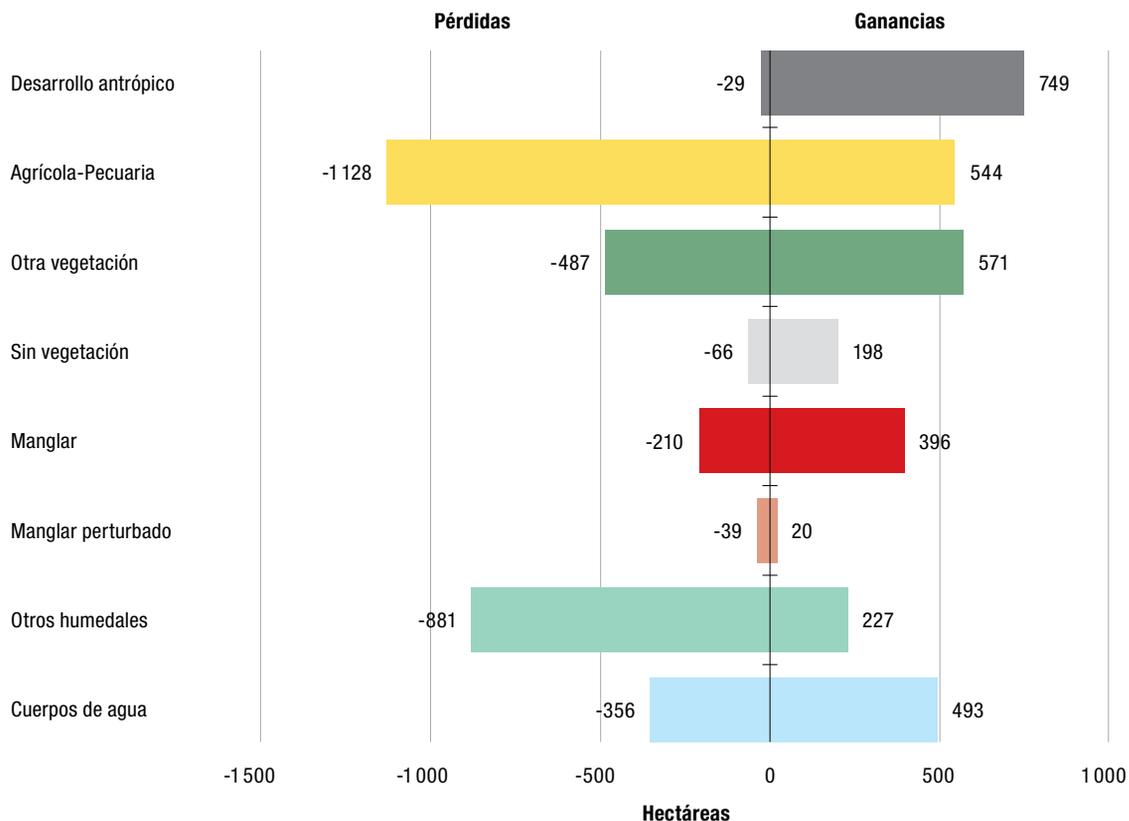
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Colima**.

Colima

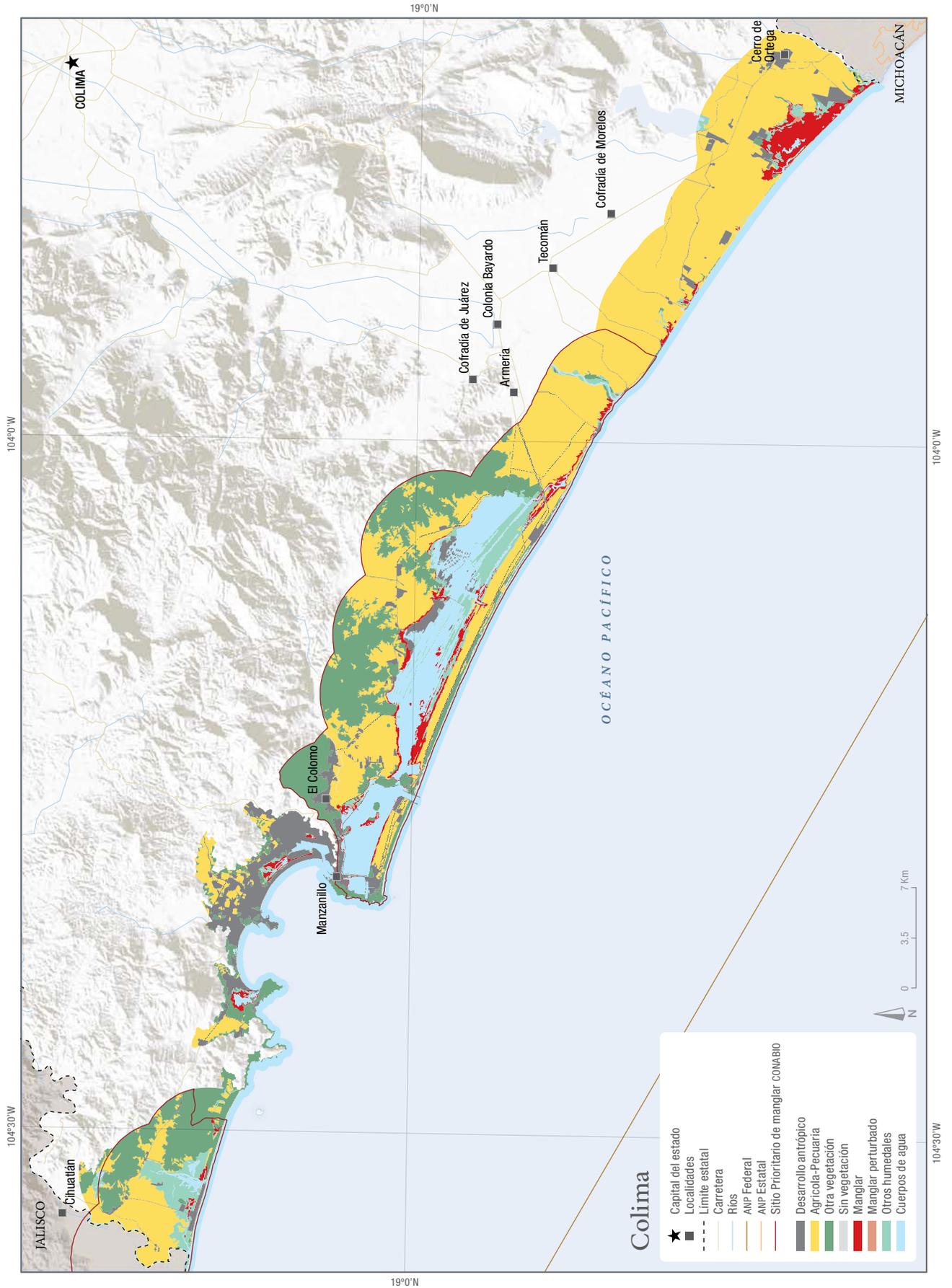
	2015	2020
Desarrollo antrópico	7.80	8.69
Agrícola-Pecuaria	44.49	43.76
Otra vegetación	18.99	19.09
Sin vegetación	0.85	1.01
Manglar	4.08	4.31
Manglar perturbado	0.09	0.07
Otros humedales	6.02	5.21
Cuerpos de agua	17.70	17.87



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en Colima en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en Colima.



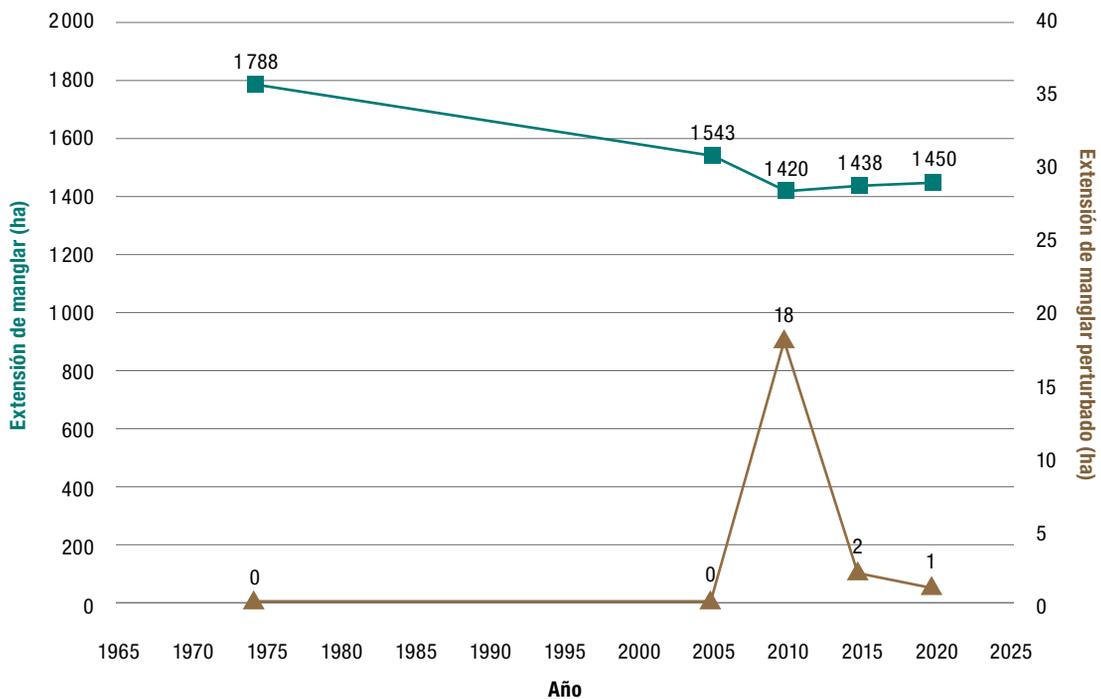
Michoacán



Lagunas costeras cercanas al puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán. FOTO: A.H.S.C. CONABIO-SEMAR.

Michoacán

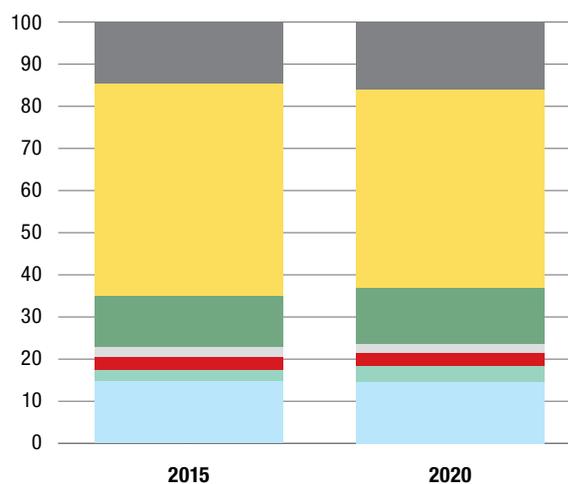
	Superficie (ha)				
	1974	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	1 788	1 543	1 420	1 438	1 450
Extensión del manglar perturbado	0	0	18	2	1
Extensión de la línea de costa (km)	243	243	243	243	243
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	0	0	0	0
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	404	321	333	1 159
Manglar en sitios Ramsar	0	724	715	741	759
Total de manglar bajo protección	0	1 128	1 036	1 074	1 204
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	1	1	1	1
Sitios Ramsar con manglar	0	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	0	0	0	0
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	1	1	1	2
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	16	14	14	14	14
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	73	73	75	83



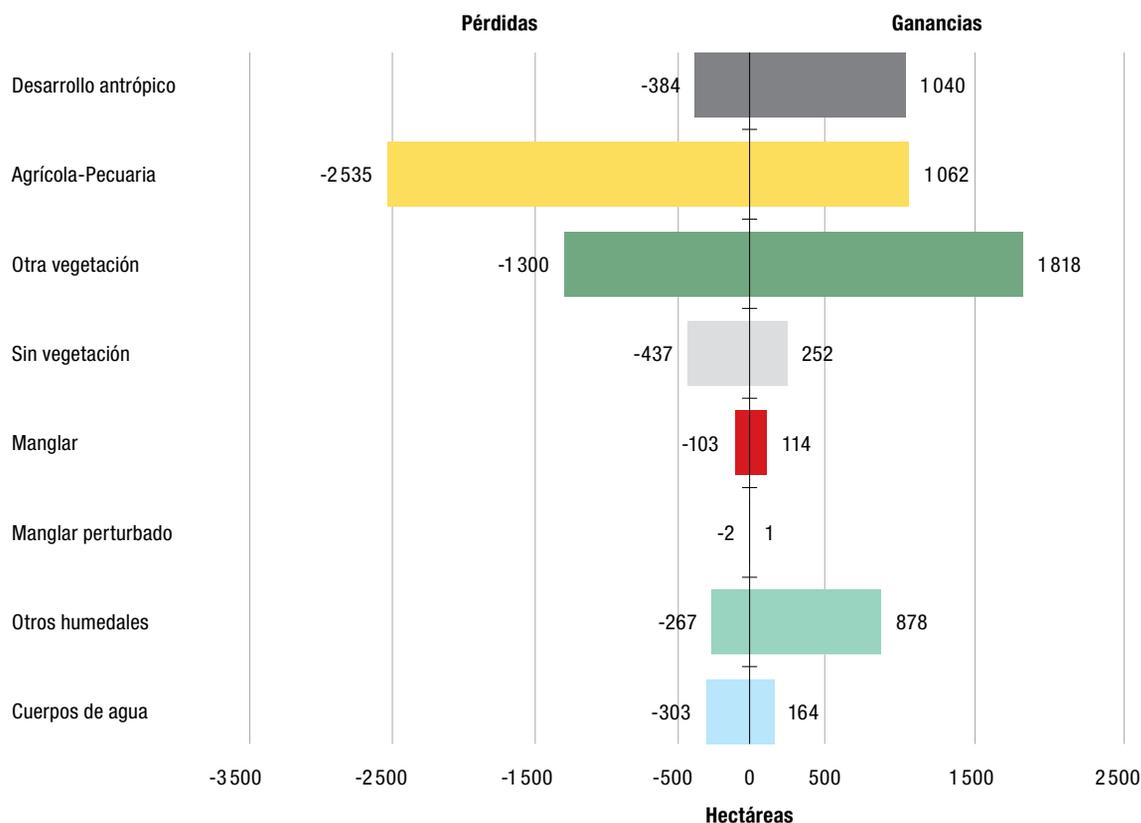
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en Michoacán.

Michoacán

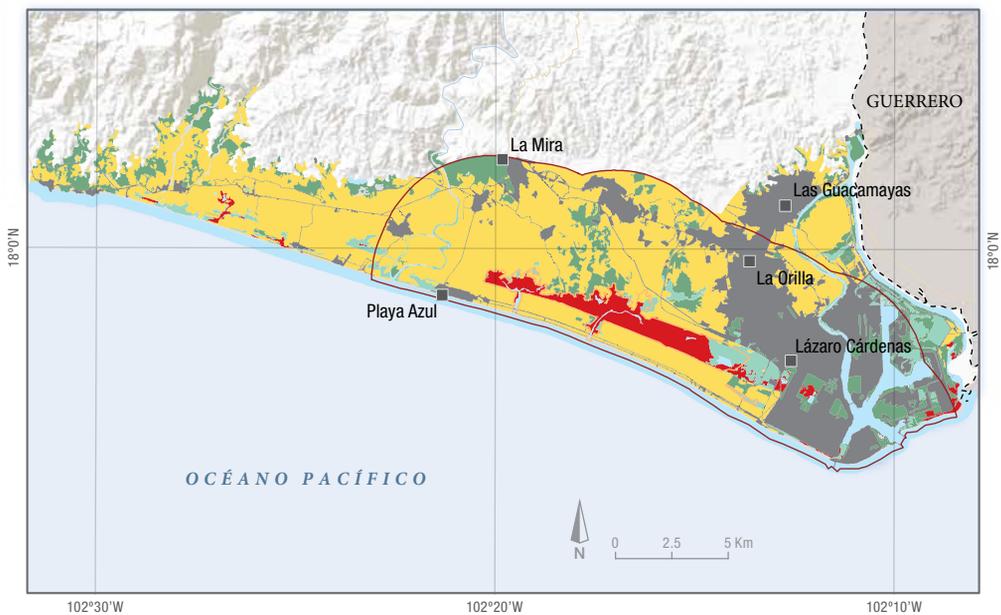
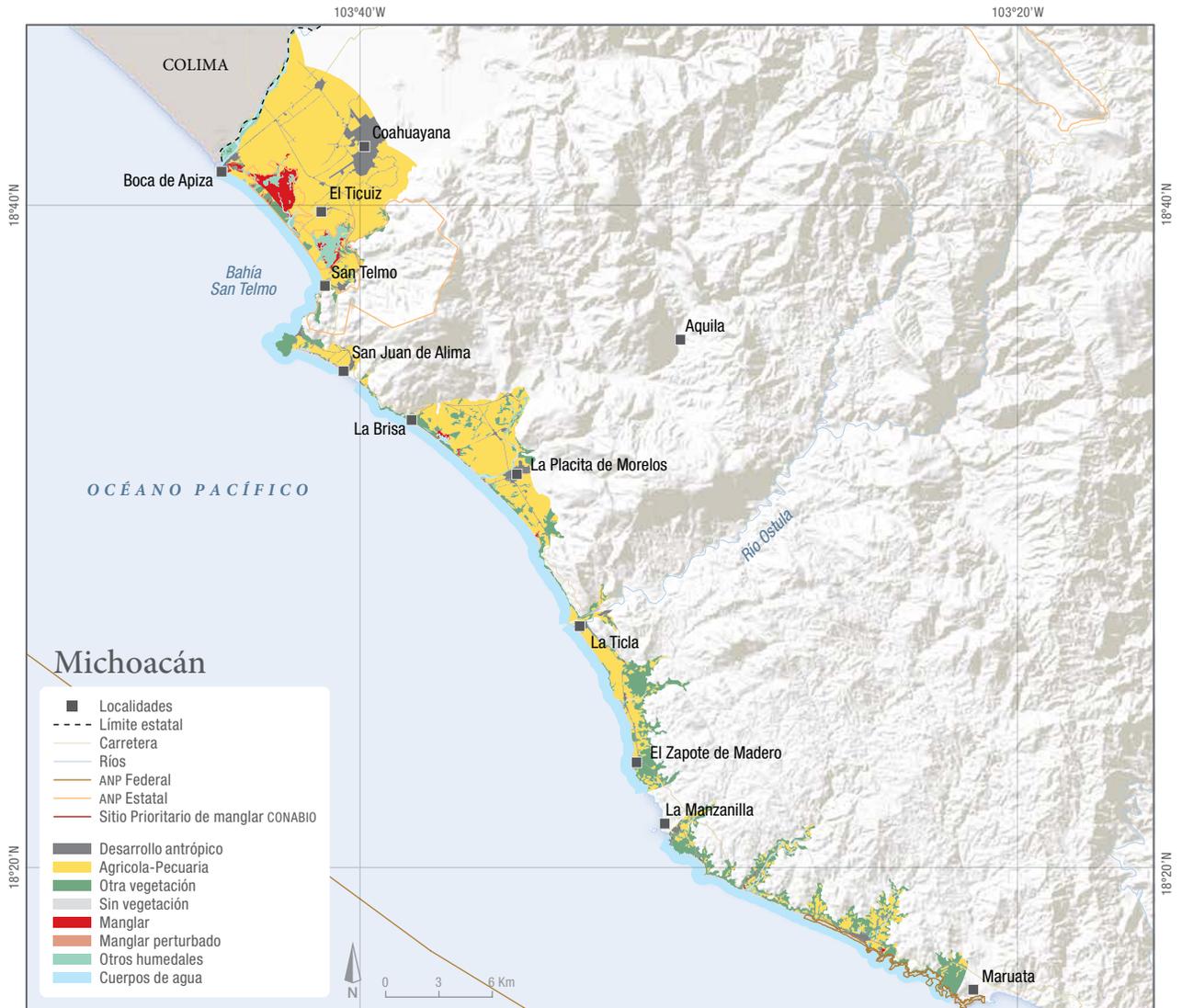
	2015	2020
Desarrollo antrópico	14.56	16.01
Agrícola-Pecuaria	50.26	47.01
Otra vegetación	12.26	13.40
Sin vegetación	2.32	1.91
Manglar	3.18	3.21
Manglar perturbado	0.00	0.00
Otros humedales	2.54	3.89
Cuerpos de agua	14.88	14.57



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Michoacán** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Michoacán**.



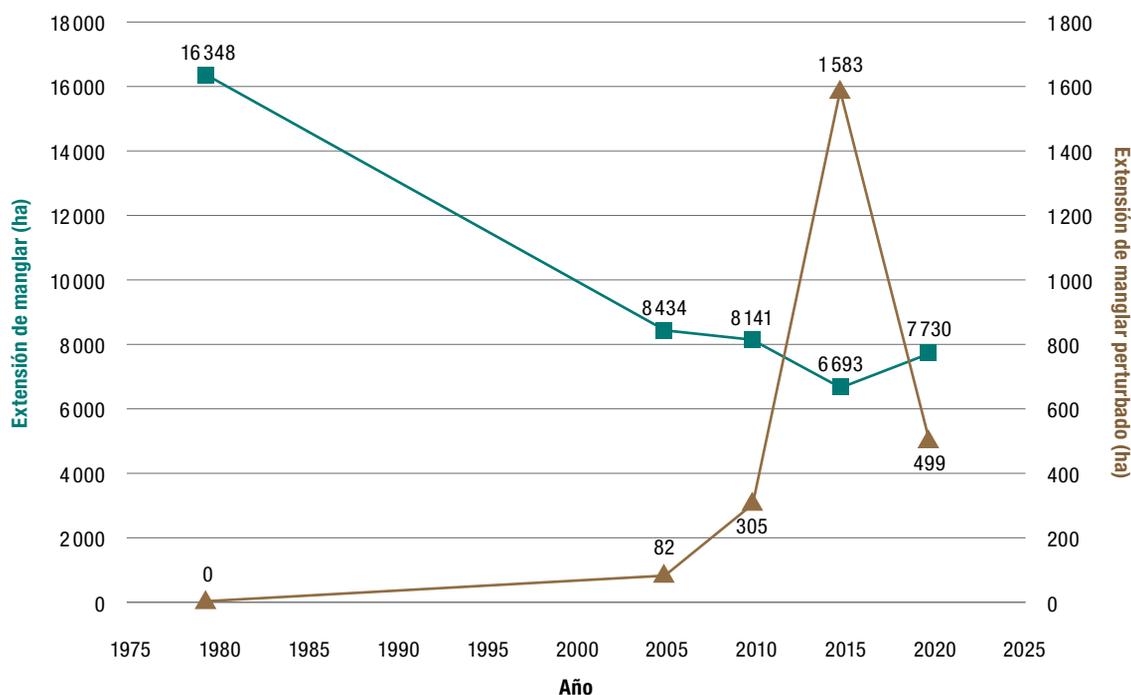
Guerrero



Manglares y humedales en Ixtapa, Guerrero. FOTO: C.T.S. CONABIO-SEMAR.

Guerrero

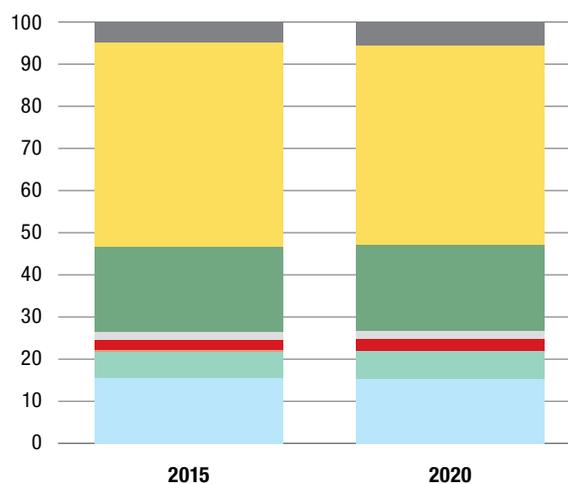
	Superficie (ha)				
	1979	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	16 348	8 434	8 141	6 693	7 730
Extensión del manglar perturbado	0	82	305	1 583	499
Extensión de la línea de costa (km)	524	524	524	524	524
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	0	0	0	0
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	0	0	0	0
Total de manglar bajo protección	0	0	0	0	0
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	7	7	7	7
Sitios Ramsar con manglar	0	0	0	0	0
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	0	0	0	0
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	51	44	44	43	43
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	0	0	0	0



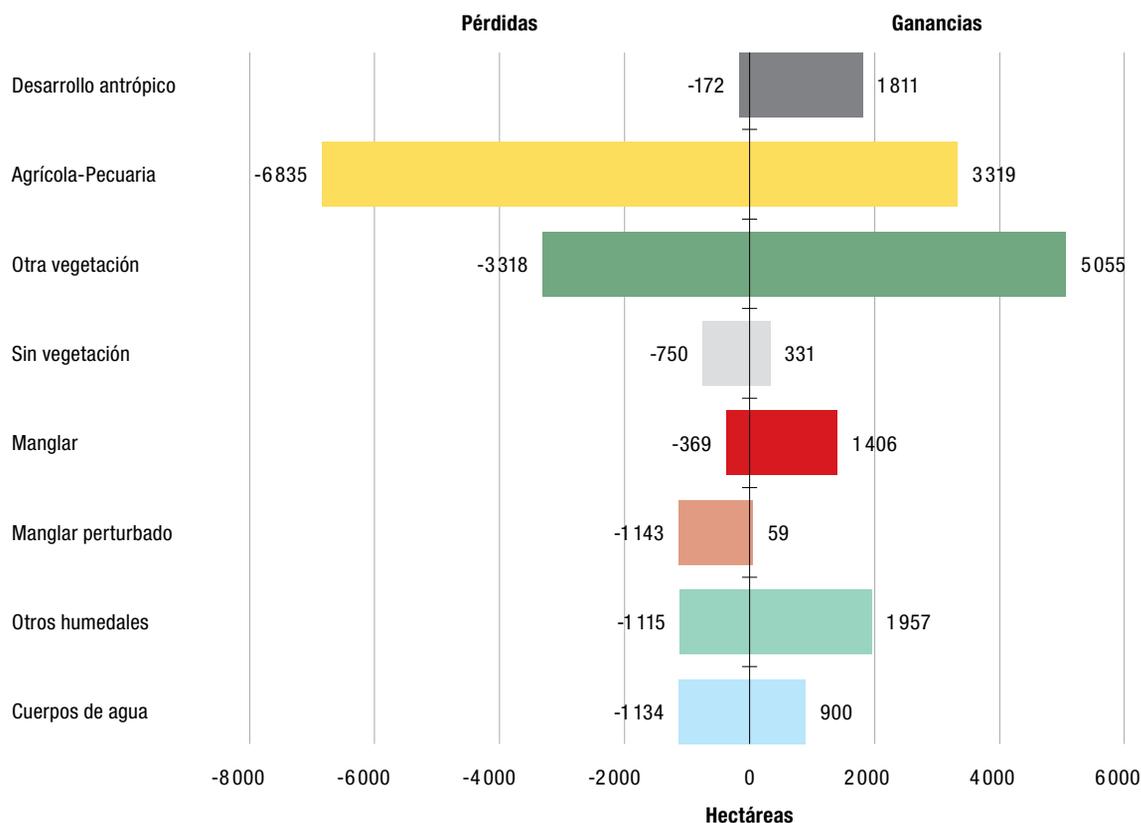
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Guerrero.

Guerrero

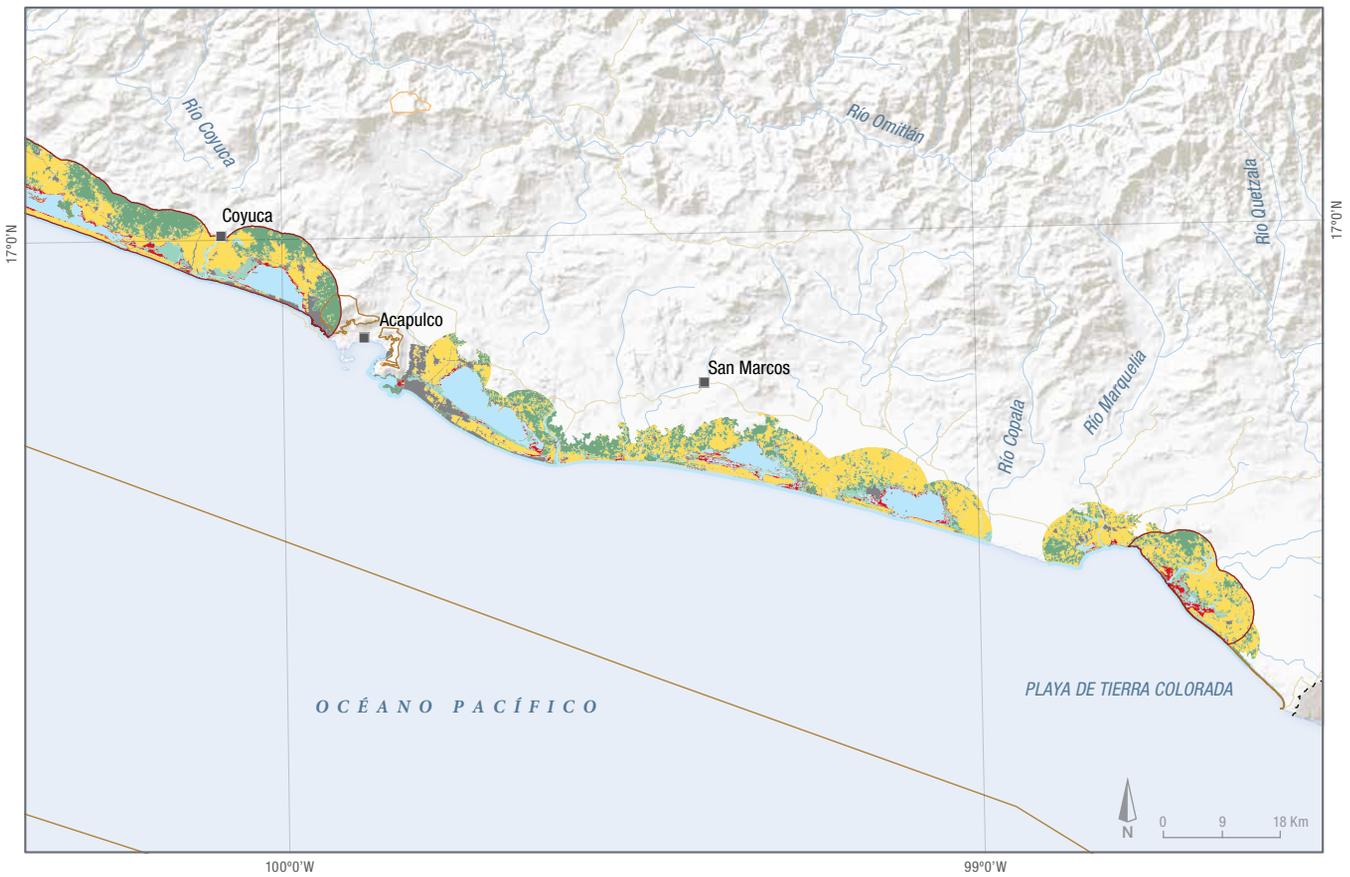
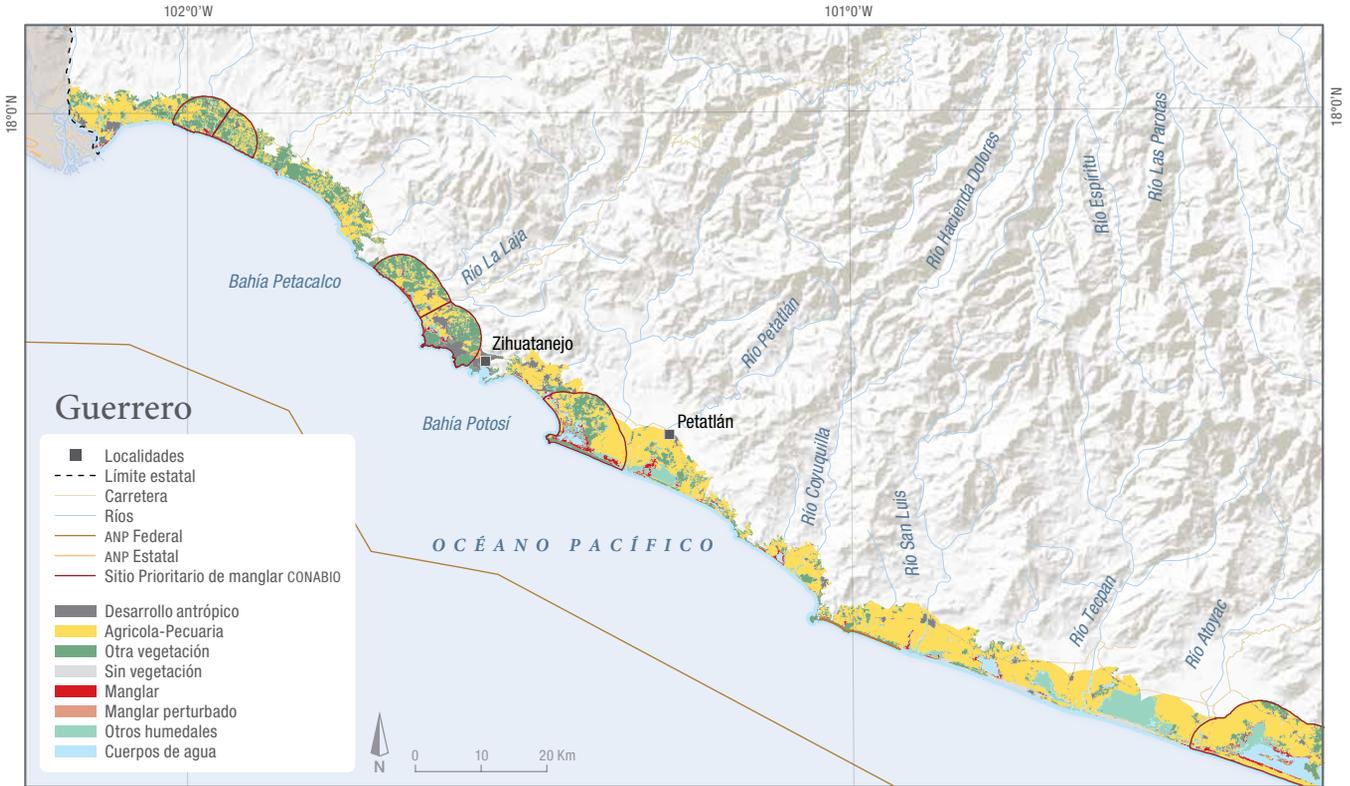
	2015	2020
Desarrollo antrópico	4.93	5.51
Agrícola-Pecuaria	48.42	47.18
Otra vegetación	20.02	20.63
Sin vegetación	2.05	1.90
Manglar	2.36	2.72
Manglar perturbado	0.56	0.18
Otros humedales	6.12	6.42
Cuerpos de agua	15.55	15.46



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Guerrero** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Guerrero**.



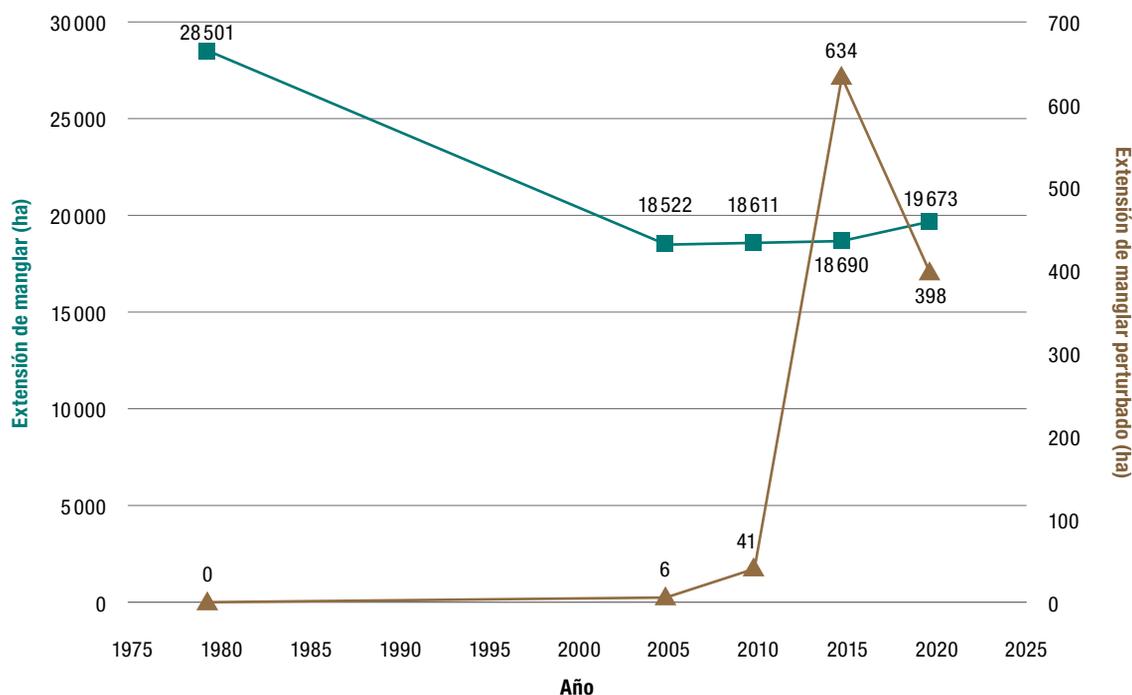
Oaxaca



Mosaico multiespecífico de manglares en la costa de Tututepec, Oaxaca. FOTO: E.V.C. CONABIO-SEMAR.

Oaxaca

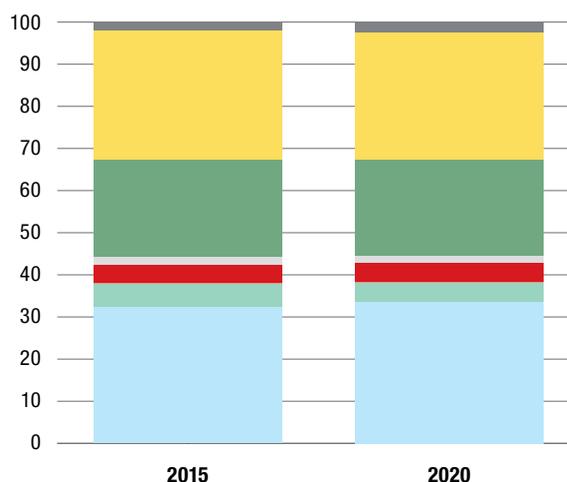
	Superficie (ha)				
	1979	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	28 501	18 522	18 611	18 690	19 673
Extensión del manglar perturbado	0	6	41	634	398
Extensión de la línea de costa (km)	588	588	588	588	588
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	1 761	1 331	1 413	2 044	2 274
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	55	1 553	2 115	2 376
Total de manglar bajo protección	1 761	1 386	1 553	2 115	2 376
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	2	2	2	2
Sitios Ramsar con manglar	0	1	3	3	3
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	1	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	53	51	52	50	53
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	6	7	8	11	12



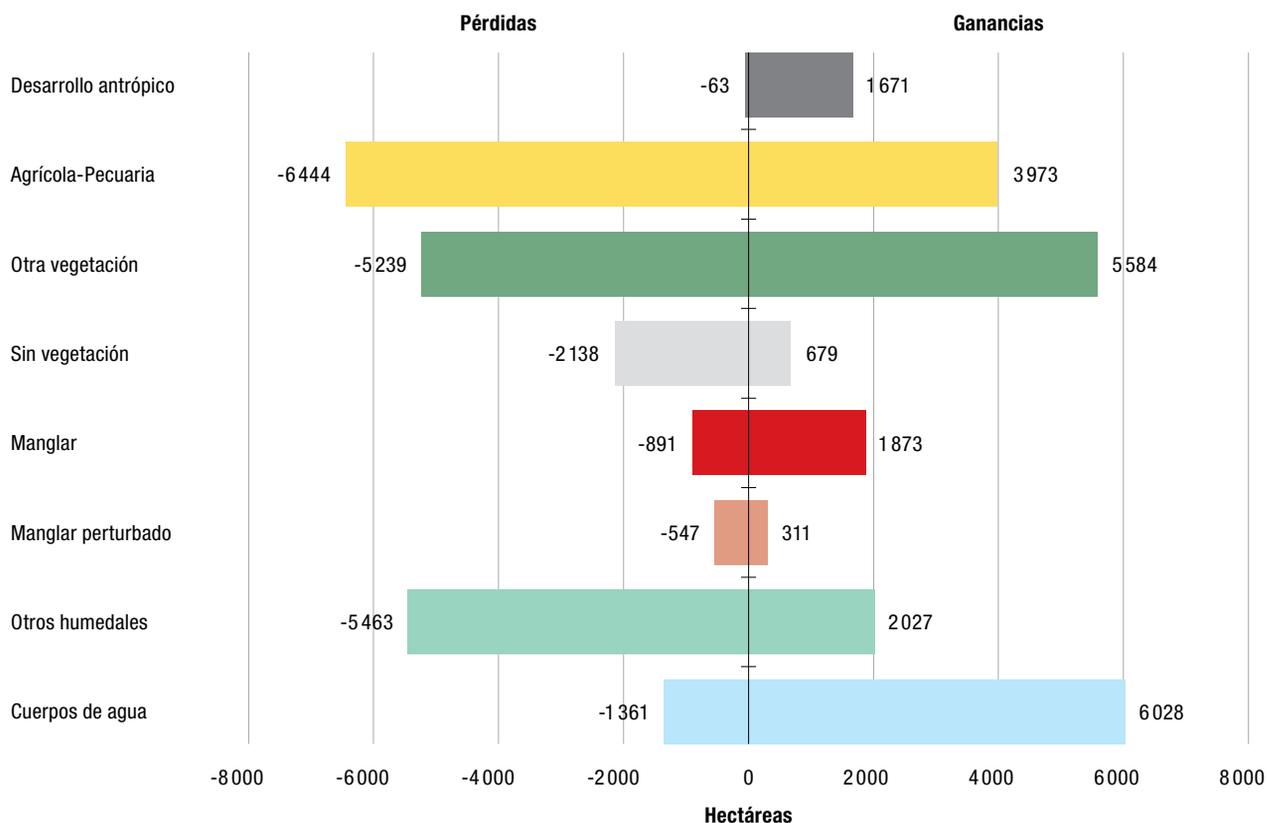
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Oaxaca.

Oaxaca

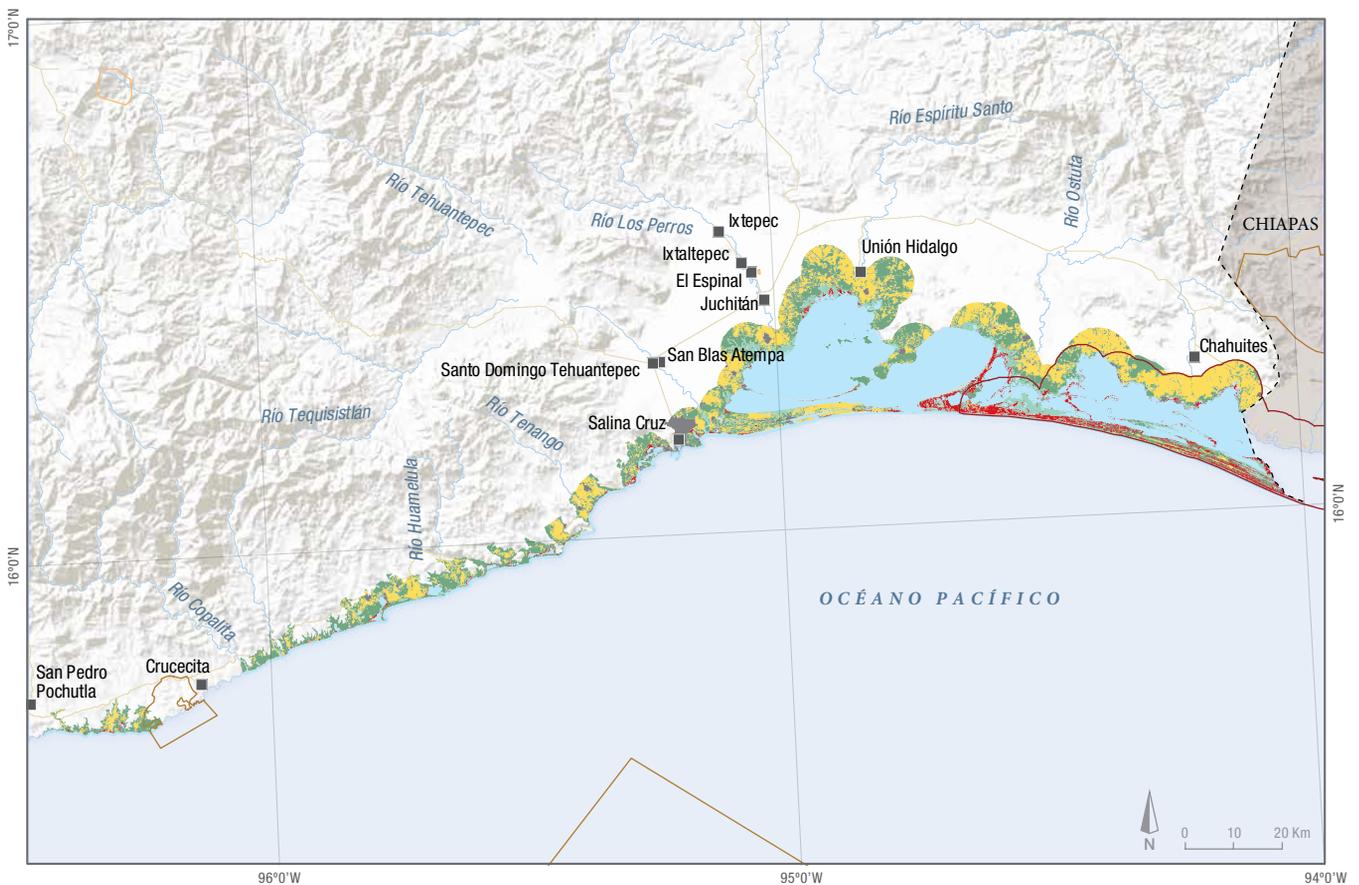
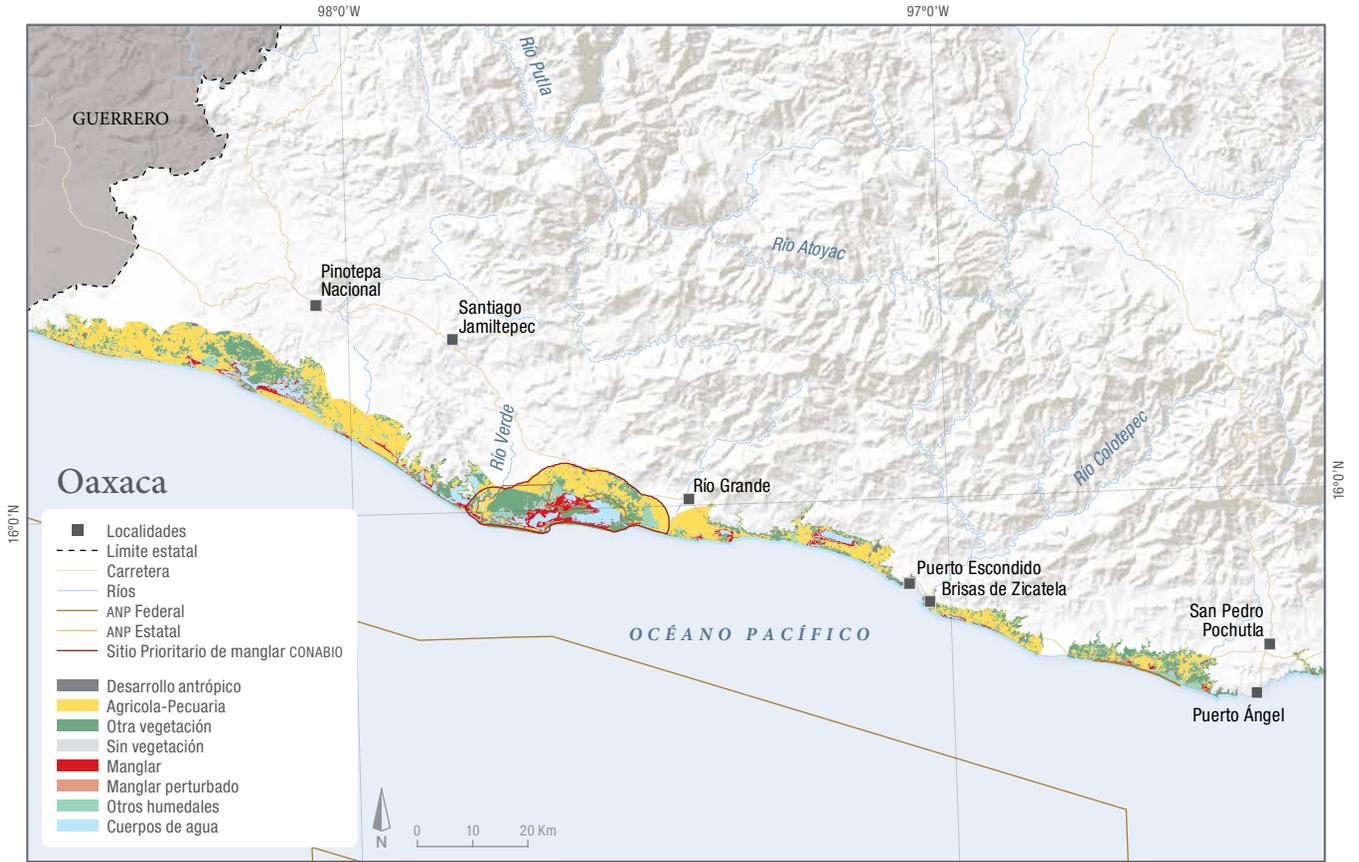
	2015	2020
Desarrollo antrópico	2.08	2.44
Agrícola-Pecuaria	30.65	30.08
Otra vegetación	22.92	23.00
Sin vegetación	1.98	1.65
Manglar	4.28	4.51
Manglar perturbado	0.15	0.09
Otros humedales	5.48	4.69
Cuerpos de agua	32.47	33.54



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Oaxaca** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Oaxaca**.



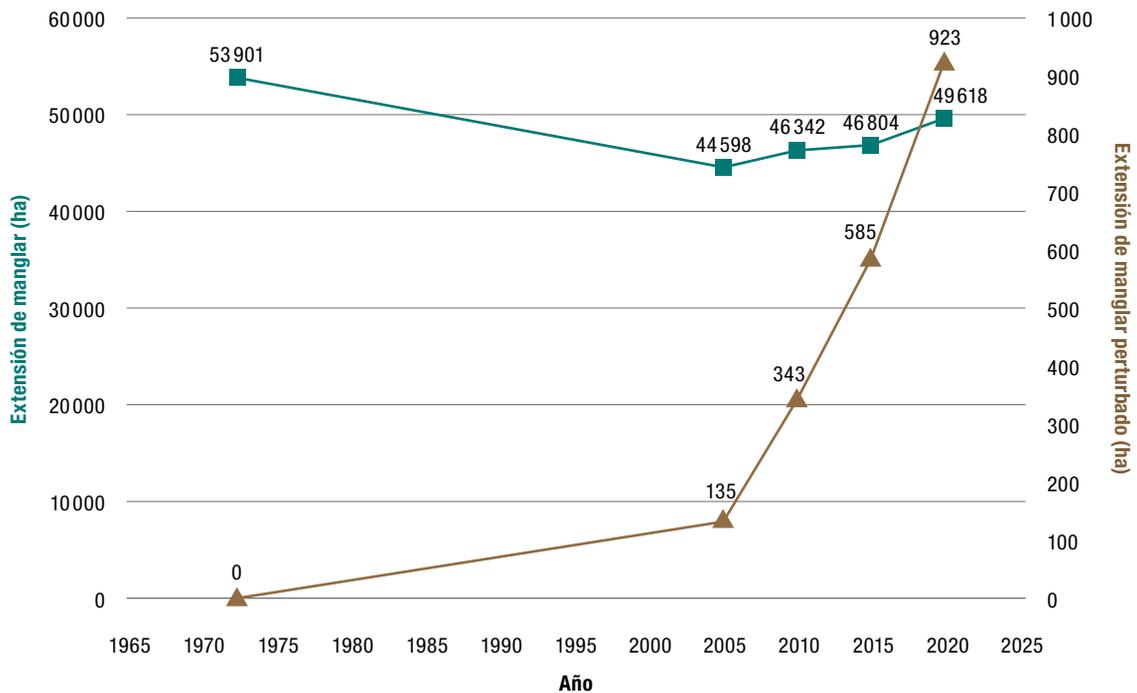
Chiapas



Ecotono de especies de manglar (*R. mangle* arriba y *L. racemosa* abajo) en Las Garzas, RB La Encrucijada, Chiapas. FOTO: A.H.S.C UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Chiapas

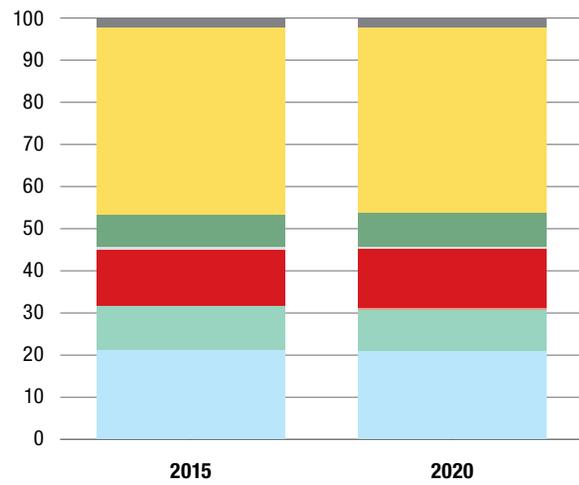
	Superficie (ha)				
	1972	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	53 901	44 598	46 342	46 804	49 618
Extensión del manglar perturbado	0	135	343	585	923
Extensión de la línea de costa (km)	256	256	256	256	256
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	28 135	28 476	29 522	30 819
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	30 304	30 822	2 455	2 738
Manglar en sitios Ramsar	0	28 135	38 952	40 715	42 496
Total de manglar bajo protección	0	30 325	38 990	40 753	42 535
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	5	5	5	5
Sitios Ramsar con manglar	0	1	5	5	5
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	1	1	1	2
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	3	3	2	2
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	98	95	95	95	95
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	68	84	87	86



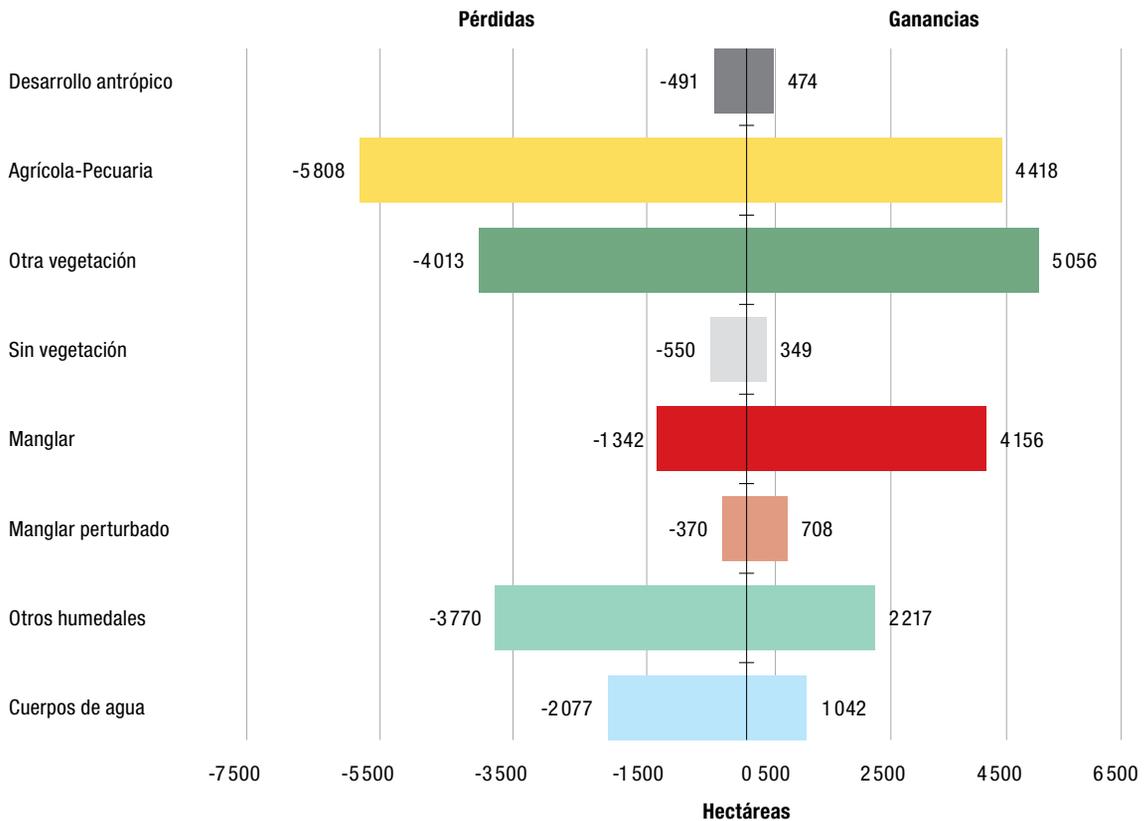
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Chiapas**.

Chiapas

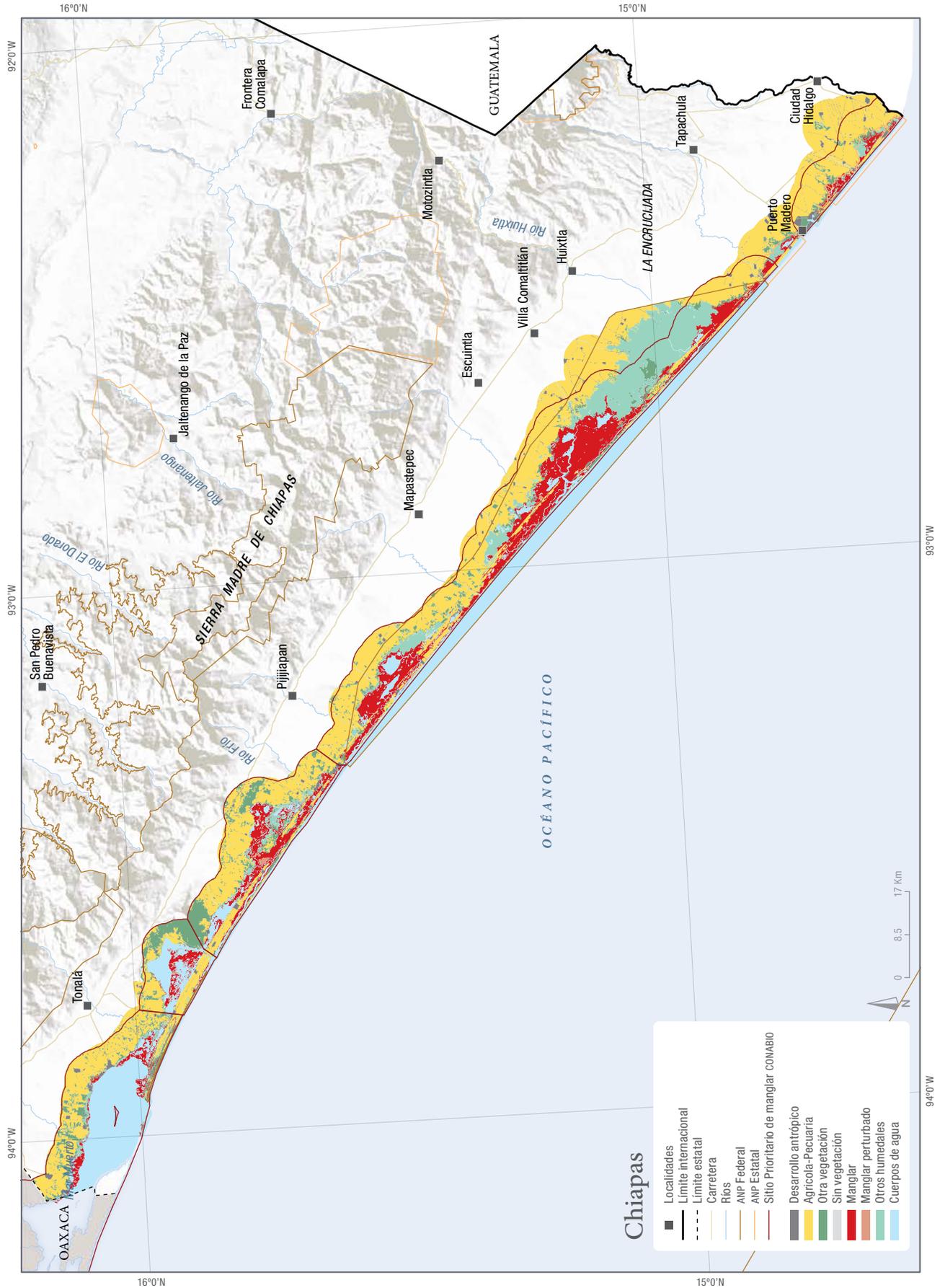
	2015	2020
Desarrollo antrópico	2.13	2.13
Agrícola-Pecuaria	44.50	44.10
Otra vegetación	7.65	7.94
Sin vegetación	0.56	0.51
Manglar	13.34	14.14
Manglar perturbado	0.17	0.26
Otros humedales	10.29	9.85
Cuerpos de agua	21.36	21.06



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Chiapas** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Chiapas**.



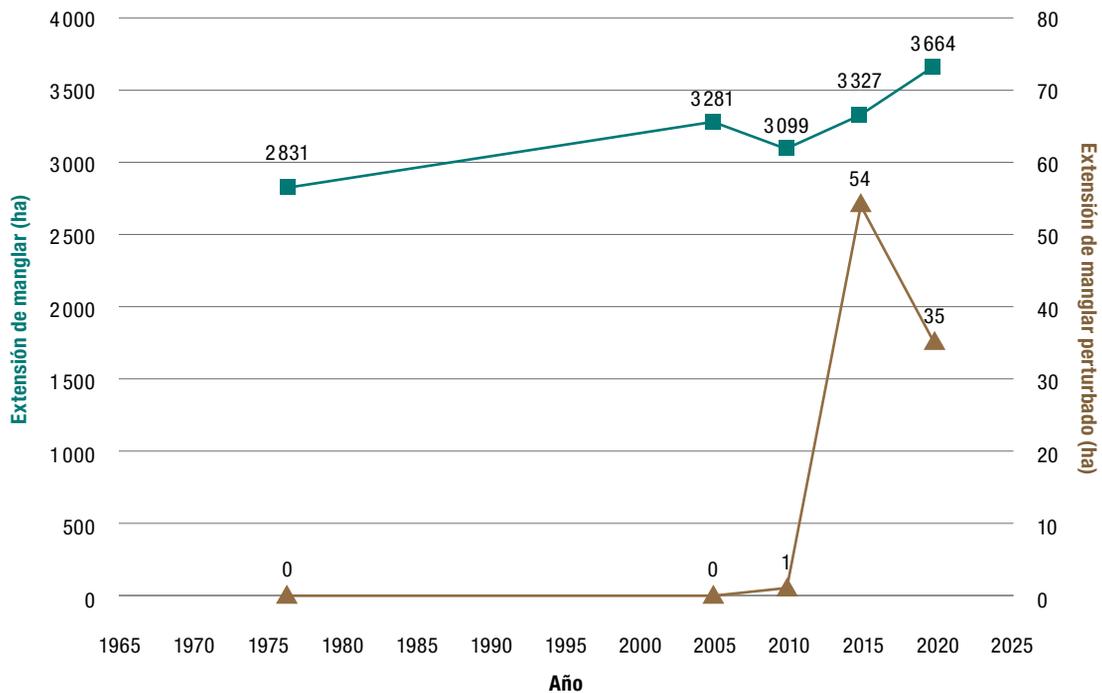
Tamaulipas



Manglar en la desembocadura del Río Soto La Marina, Tamaulipas. FOTO: A.H.S.C. CONABIO-SEMAR.

Tamaulipas

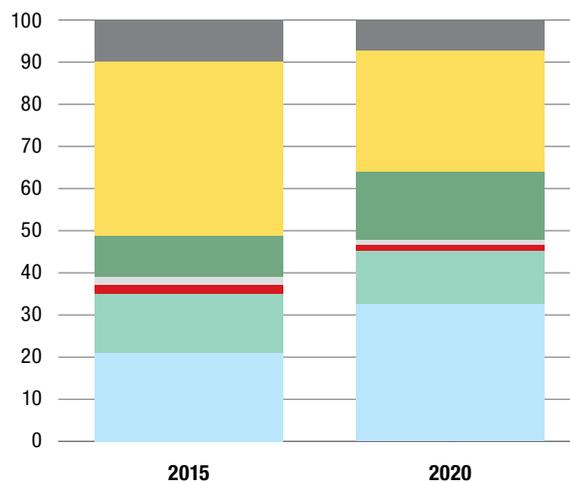
	Superficie (ha)				
	1976	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	2831	3281	3099	3327	3664
Extensión del manglar perturbado	0	0	1	54	35
Extensión de la línea de costa (km)	428	428	428	428	428
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	348	344	404	712
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	446	436
Manglar en sitios Ramsar	0	0	0	0	146
Total de manglar bajo protección	0	348	344	850	1148
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	9	9	9	9
Sitios Ramsar con manglar	0	0	0	0	1
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	1	1	2	2
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	1	1
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	22	25	24	24	30
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	11	11	26	31



Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en Tamaulipas.

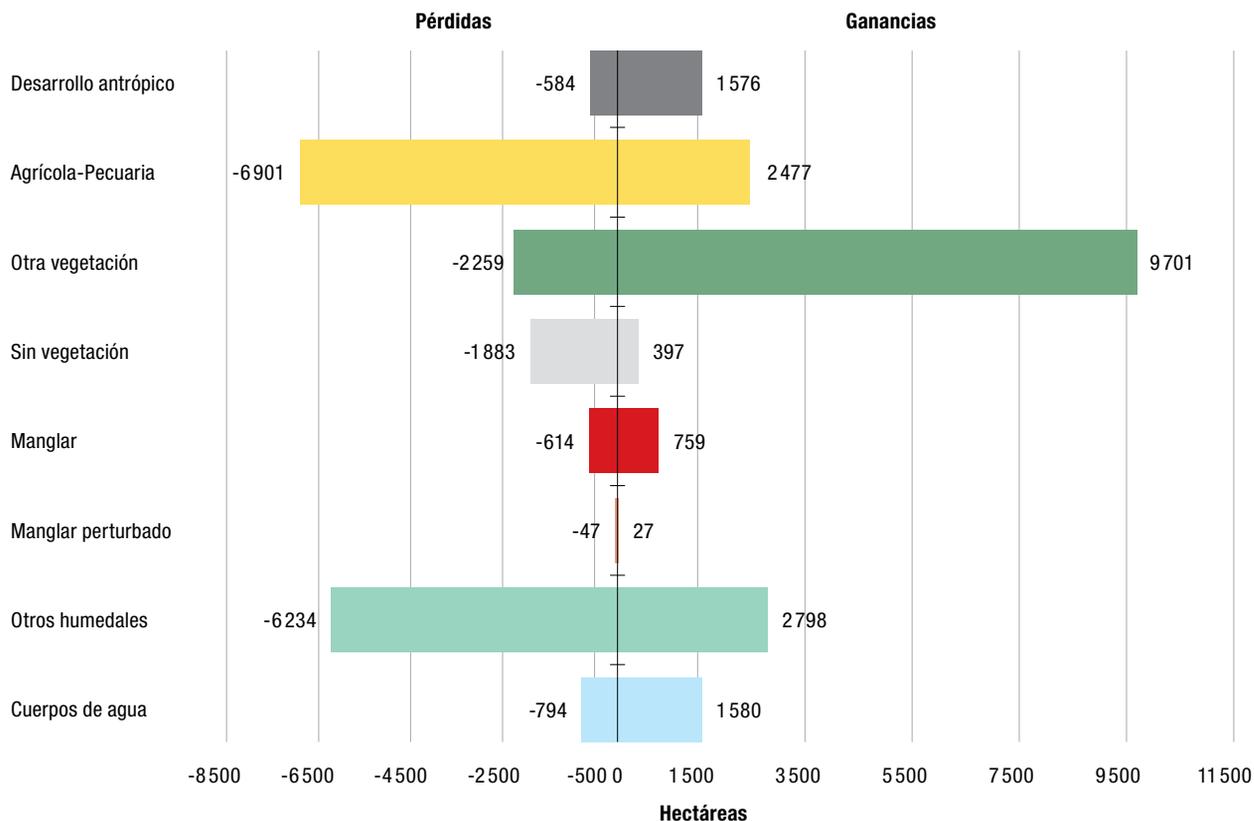
Tamaulipas

	2015	2020
Desarrollo antrópico	9.95	7.11
Agrícola-Pecuaria	41.26	28.96
Otra vegetación	9.56	15.96
Sin vegetación	1.99	1.22
Manglar	2.16	1.45
Manglar perturbado	0.04	0.01
Otros humedales	14.08	12.54
Cuerpos de agua	20.97	32.75



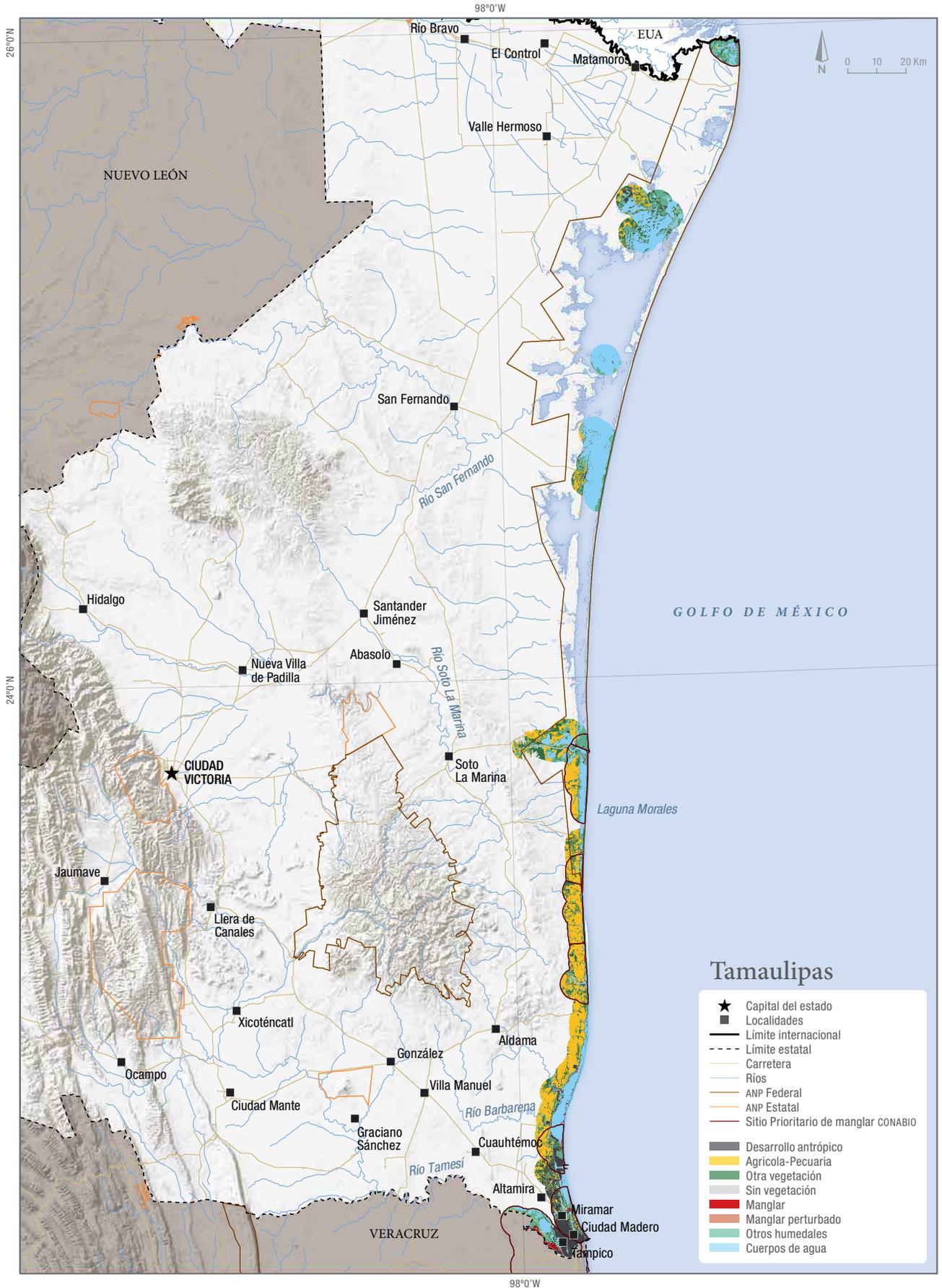
Porcentaje de cobertura en las clases presentes en Tamaulipas en el área de estudio del SMMM.*

* Considerando que la superficie del área de estudio (manglares y clases aledañas) para Tamaulipas en el año 2020 fue de 253 371 ha (aumentó 99 626 ha).

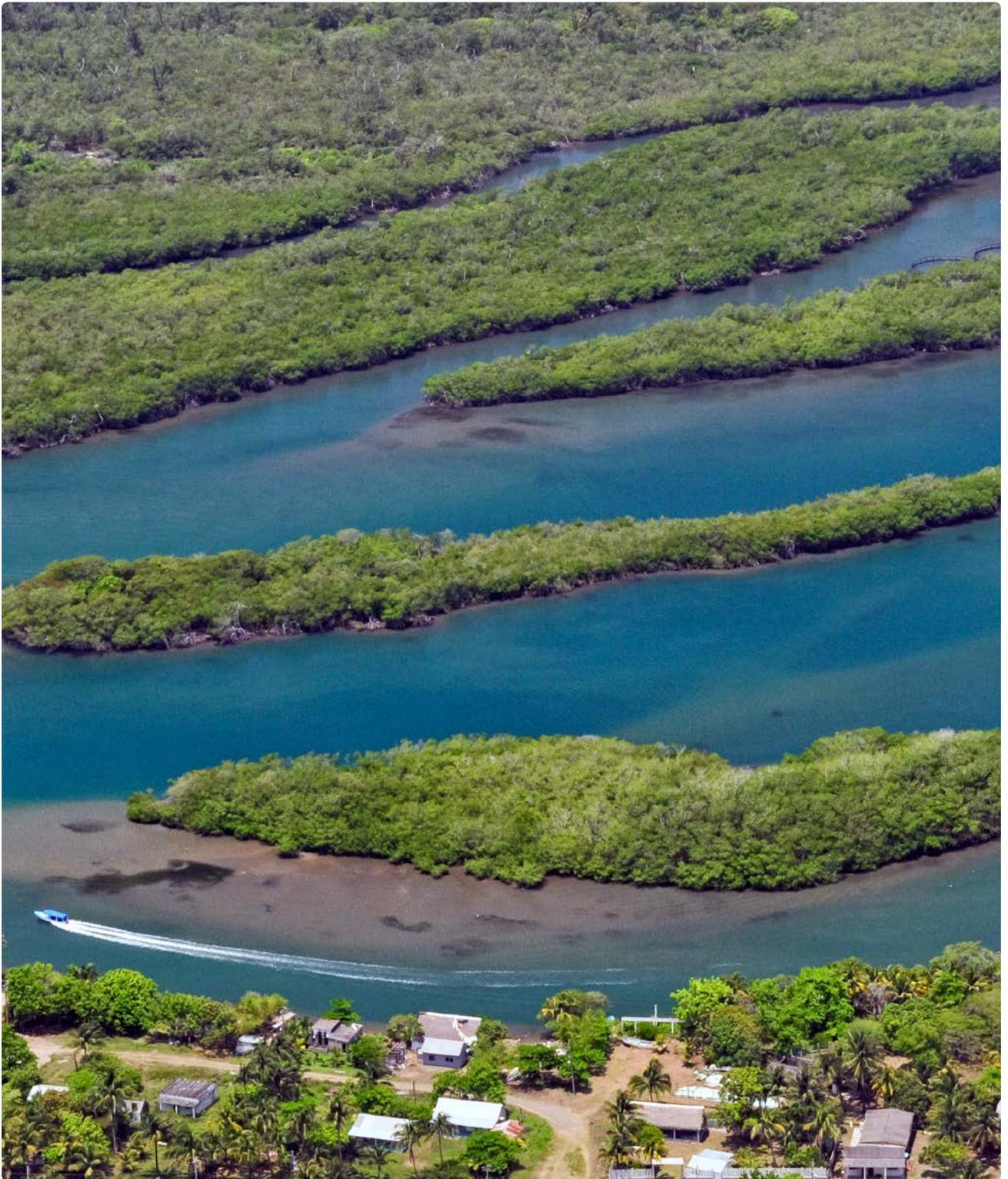


Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en Tamaulipas.*

* Las superficies de cambio de las clases únicamente representan el área que se superpone entre 2015 y 2020.



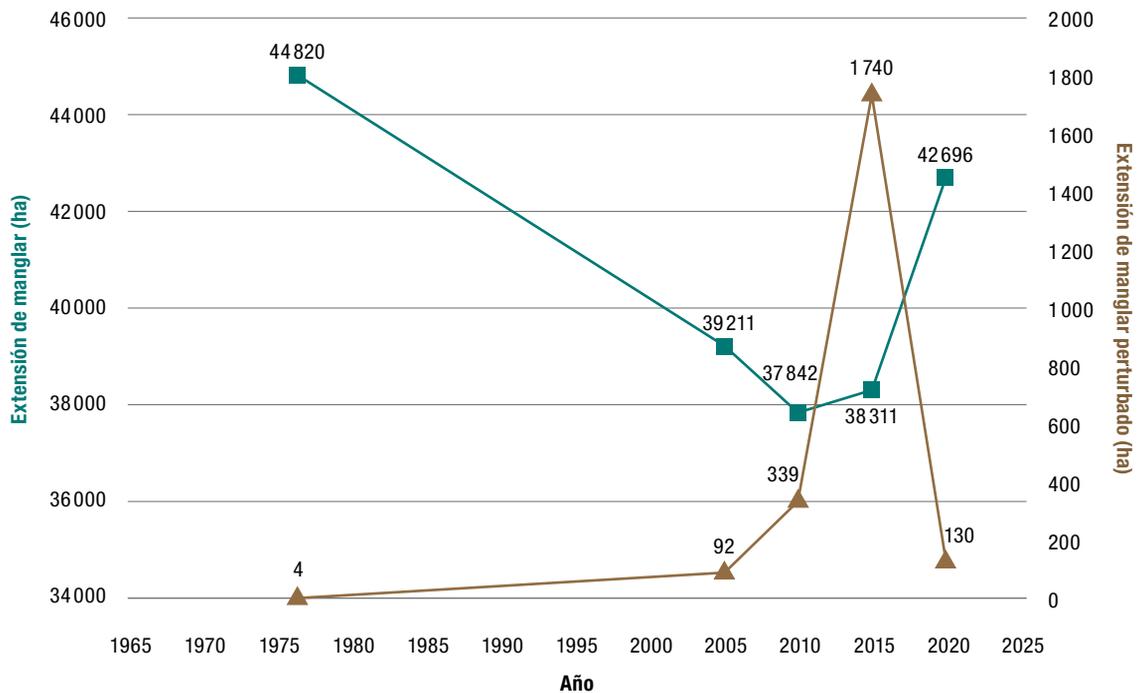
Veracruz



Manglar en Laguna del Ostión, Veracruz. FOTO: C.T.S. CONABIO-SEMAR.

Veracruz

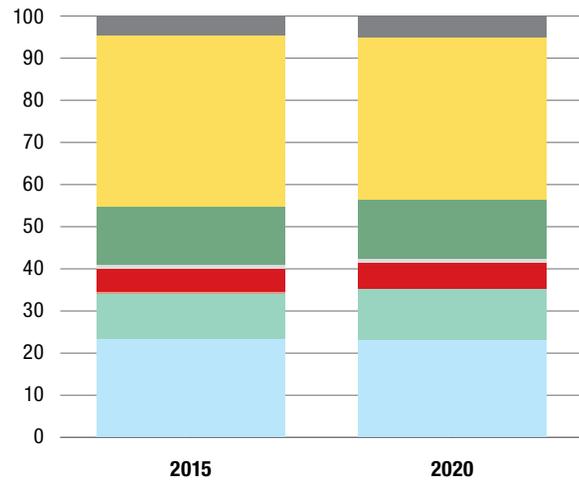
	Superficie (ha)				
	1976	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	44 820	39 211	37 842	38 311	42 696
Extensión del manglar perturbado	4	92	339	1 740	130
Extensión de la línea de costa (km)	751	751	751	751	751
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	699	681	777	829
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	1 398	1 355	1 363	1 381
Manglar en sitios Ramsar	0	20 176	23 681	24 027	26 533
Total de manglar bajo protección	0	21 583	25 047	25 404	27 936
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	15	15	15	15
Sitios Ramsar con manglar	0	4	5	5	5
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	1	1	1	1
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	1	2	2	4
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	34	34	34	34	35
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	55	66	66	65



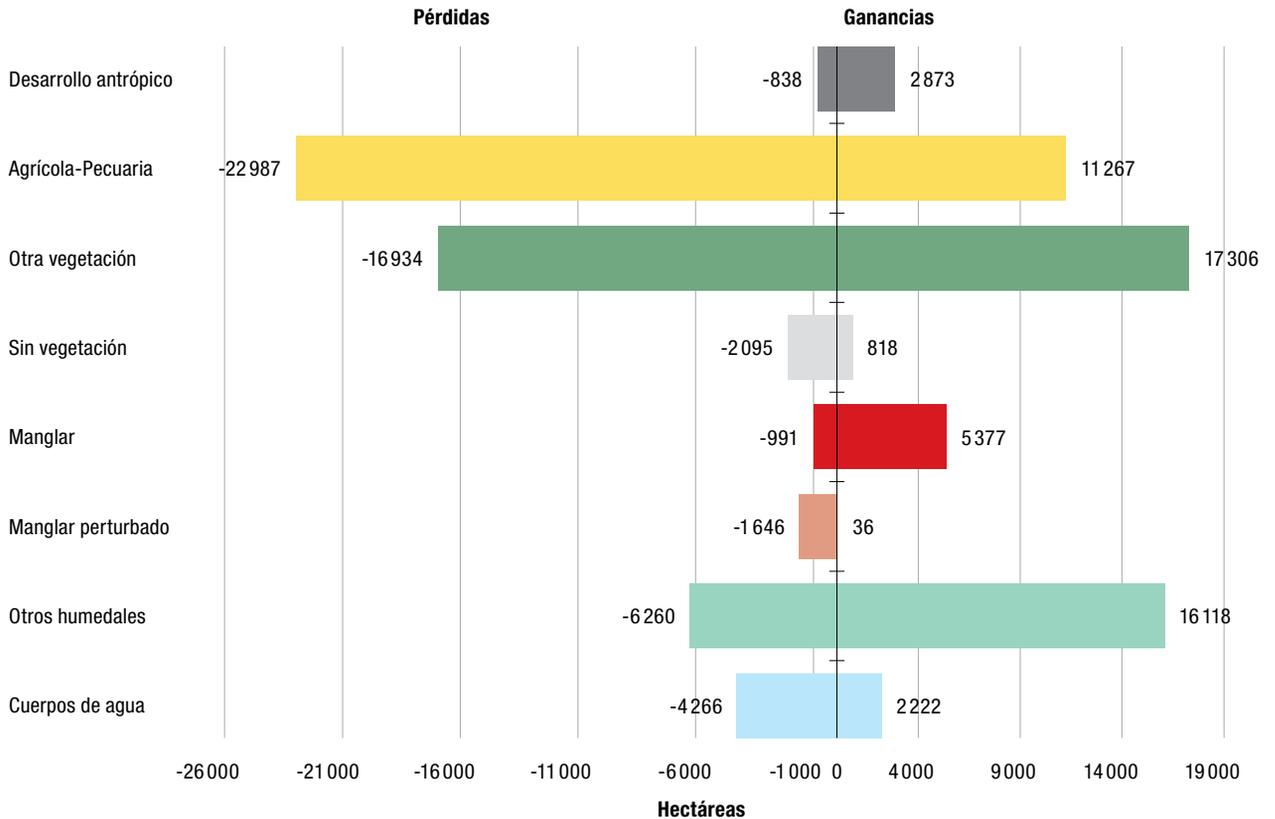
Cambios en la superficie de manglar y manglar perturbado en las cinco fechas de estudio en Veracruz.

Veracruz

	2015	2020
Desarrollo antrópico	4.65	4.95
Agrícola-Pecuaría	40.42	38.72
Otra vegetación	13.96	14.01
Sin vegetación	0.91	0.72
Manglar	5.57	6.21
Manglar perturbado	0.25	0.02
Otros humedales	10.75	12.18
Cuerpos de agua	23.49	23.19



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en Veracruz en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en Veracruz.



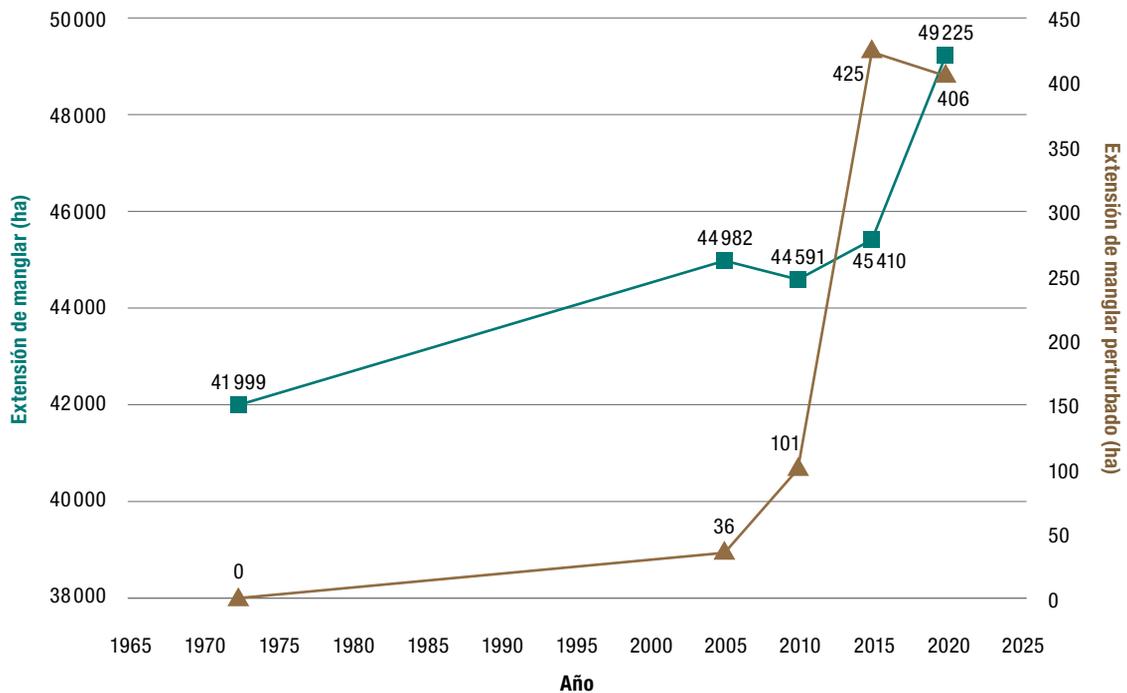
Tabasco



Manglar en Paraíso, Tabasco. FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Tabasco

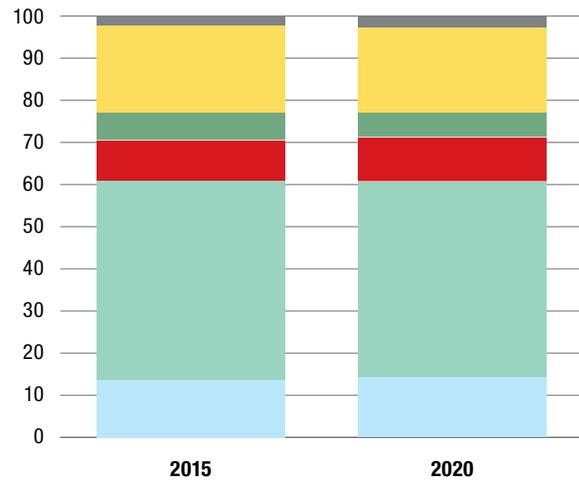
	Superficie (ha)				
	1972	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	41 999	44 982	44 591	45 410	49 225
Extensión del manglar perturbado	0	36	101	425	406
Extensión de la línea de costa (km)	201	201	201	201	201
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	10 064	9 835	9 858	9 811
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	0	0	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	10 064	9 835	9 862	9 818
Total de manglar bajo protección	0	10 064	9 835	9 863	9 818
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	7	7	7	7
Sitios Ramsar con manglar	0	2	2	2	2
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	2	2	2	2
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	0	0	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	70	66	66	66	68
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	22	22	22	20



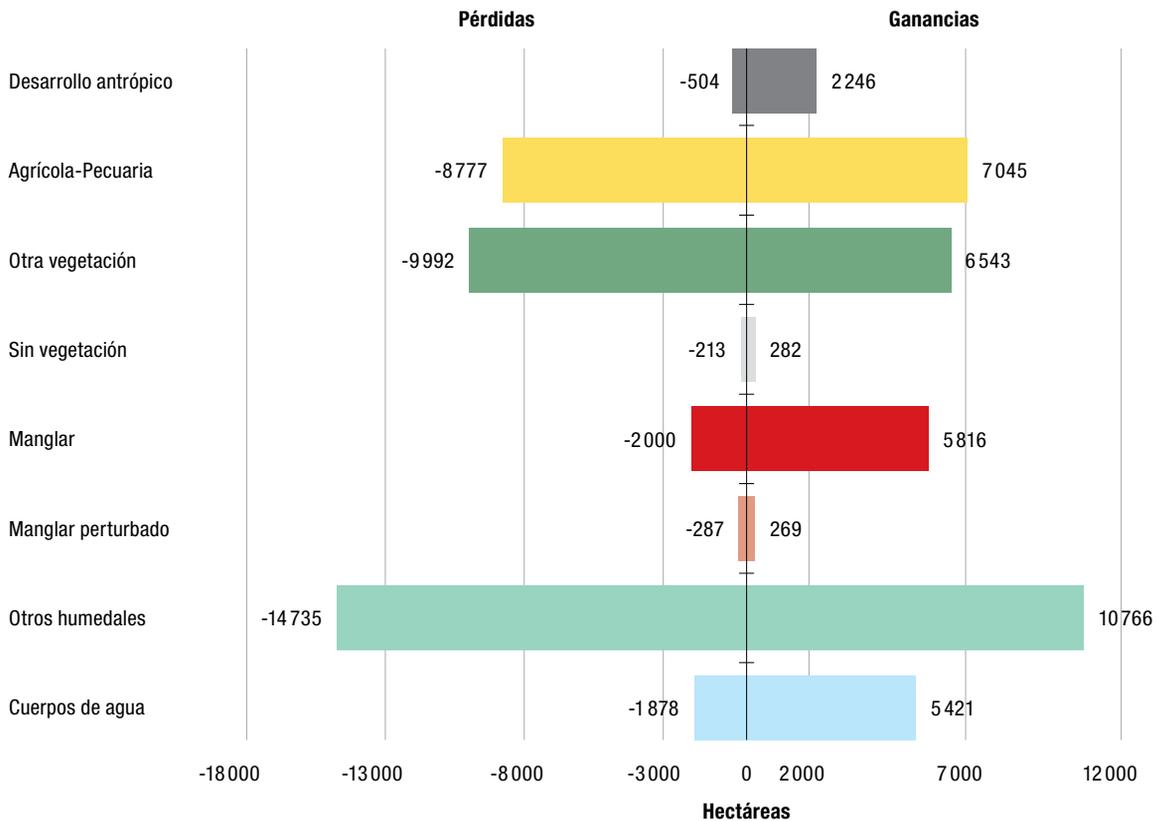
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Tabasco**.

Tabasco

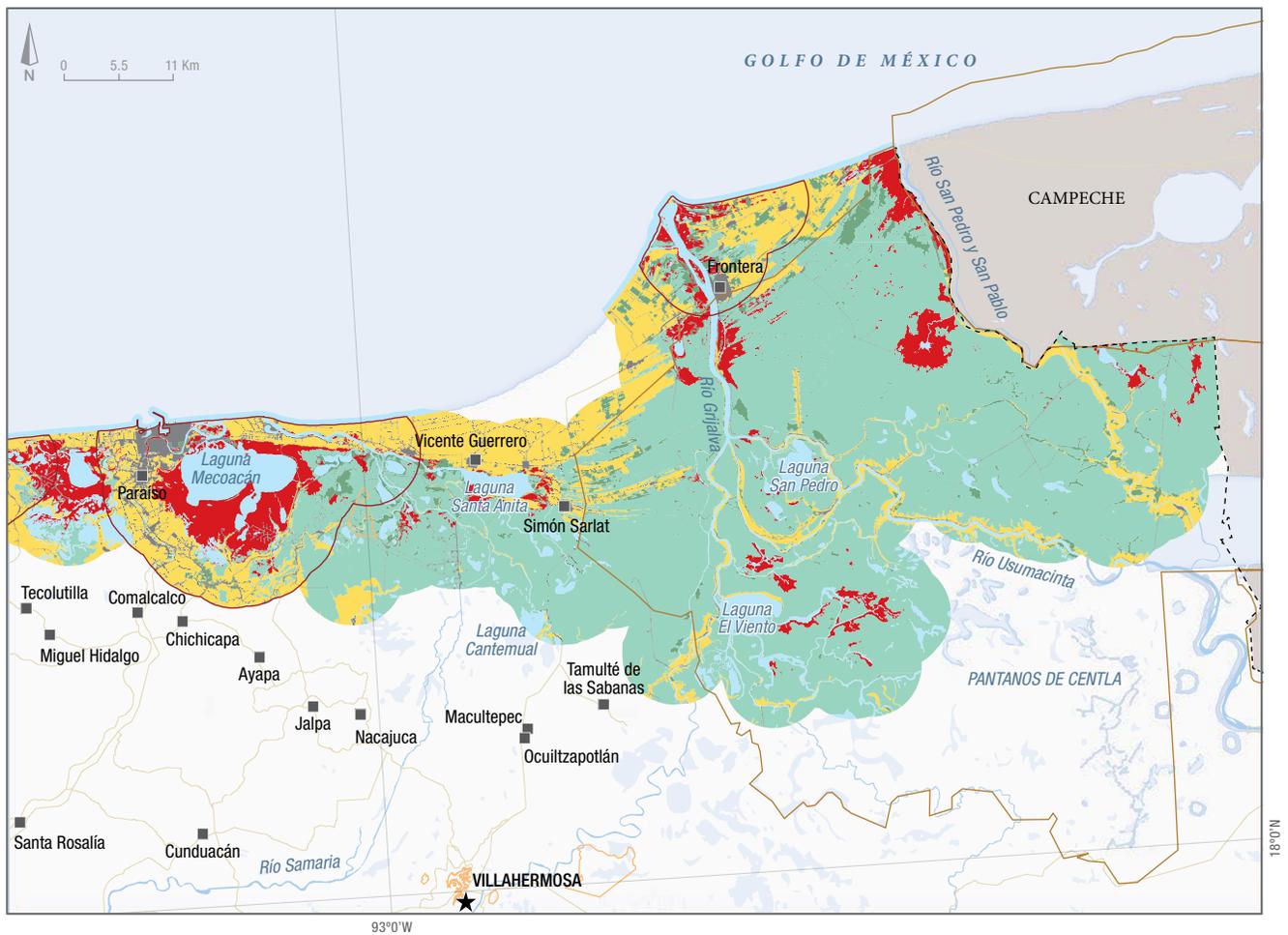
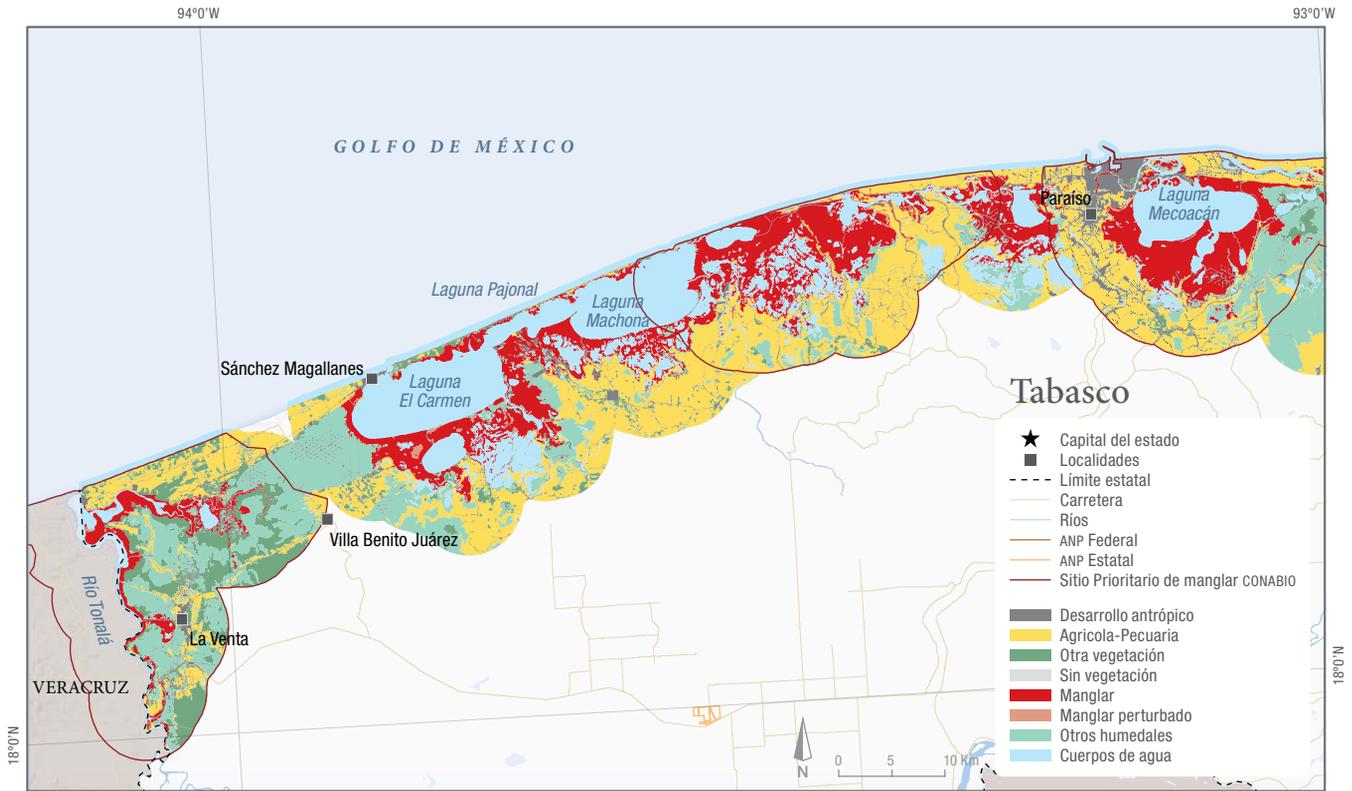
	2015	2020
Desarrollo antrópico	2.23	2.60
Agrícola-Pecuaria	20.58	20.22
Otra vegetación	6.53	5.81
Sin vegetación	0.16	0.17
Manglar	9.50	10.30
Manglar perturbado	0.09	0.08
Otros humedales	47.24	46.41
Cuerpos de agua	13.67	14.42



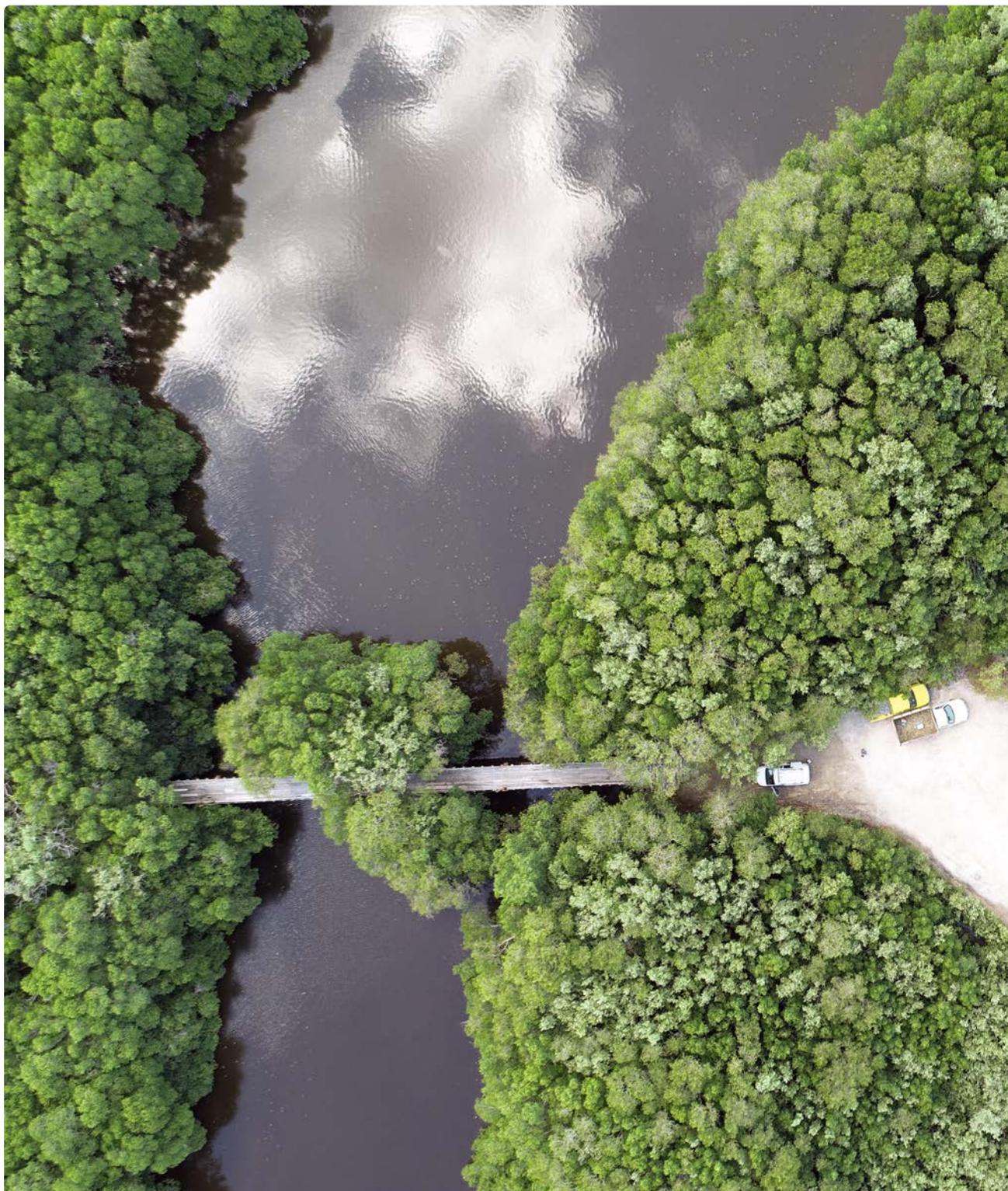
Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Tabasco** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Tabasco**.



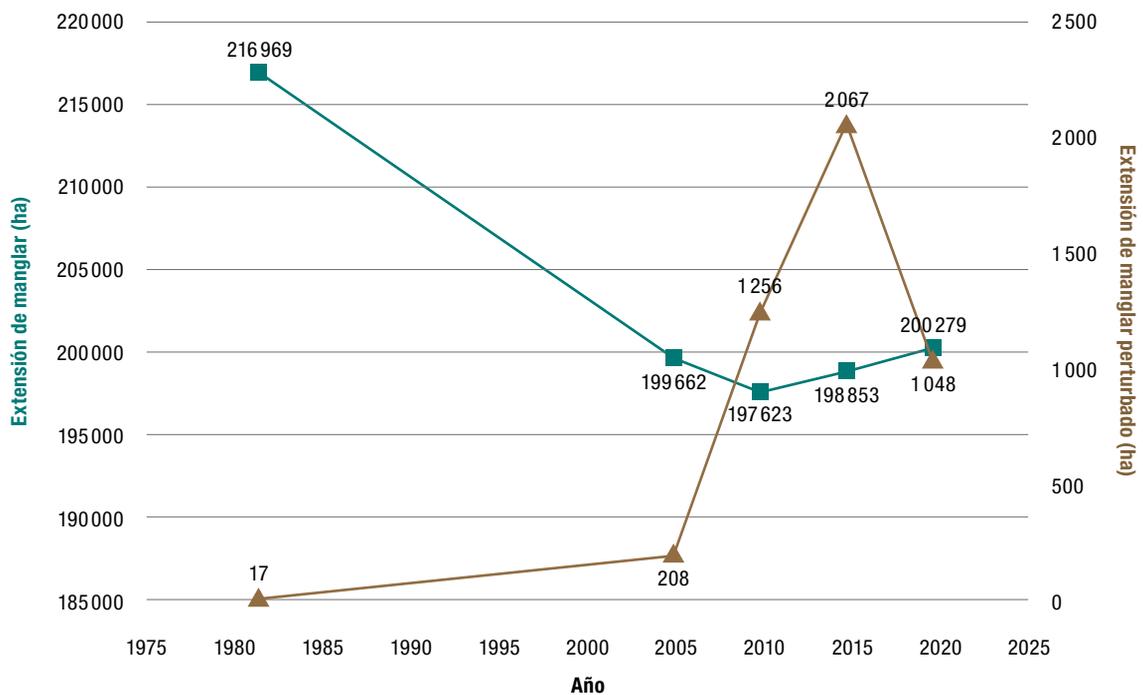
Campeche



Manglares con presencia de caminos en Jaina, Campeche. FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Campeche

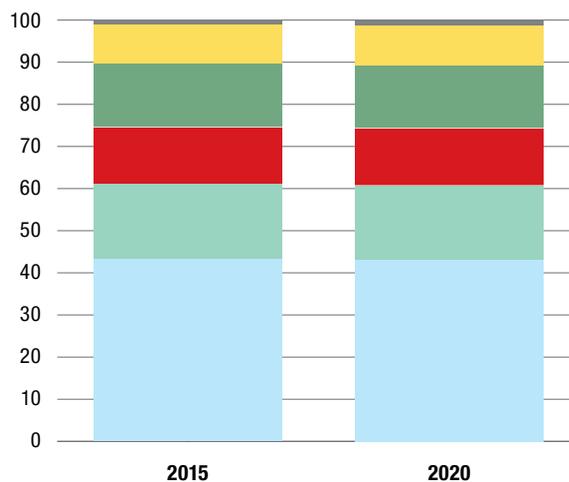
	Superficie (ha)				
	1981	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	216 969	199 662	197 623	198 853	200 279
Extensión del manglar perturbado	17	208	1 256	2 067	1 048
Extensión de la línea de costa (km)	434	434	434	434	434
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	177 091	175 962	180 620	182 877
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	70 834	69 349	0	0
Manglar en sitios Ramsar	0	177 099	175 972	180 605	182 863
Total de manglar bajo protección	0	177 109	175 972	180 622	182 879
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	10	10	10	10
Sitios Ramsar con manglar	0	4	5	5	5
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	4	4	4	4
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	1	1	0	0
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	81	77	77	79	79
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	89	89	90	91



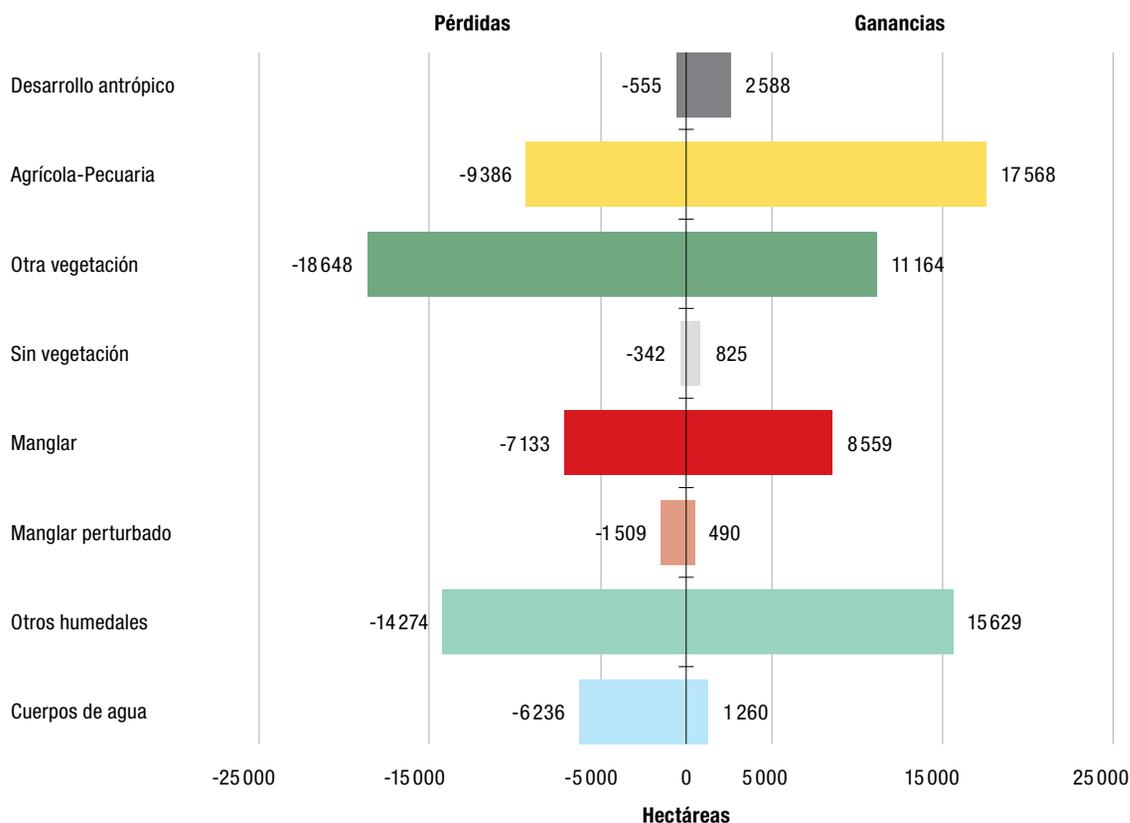
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Campeche**.

Campeche

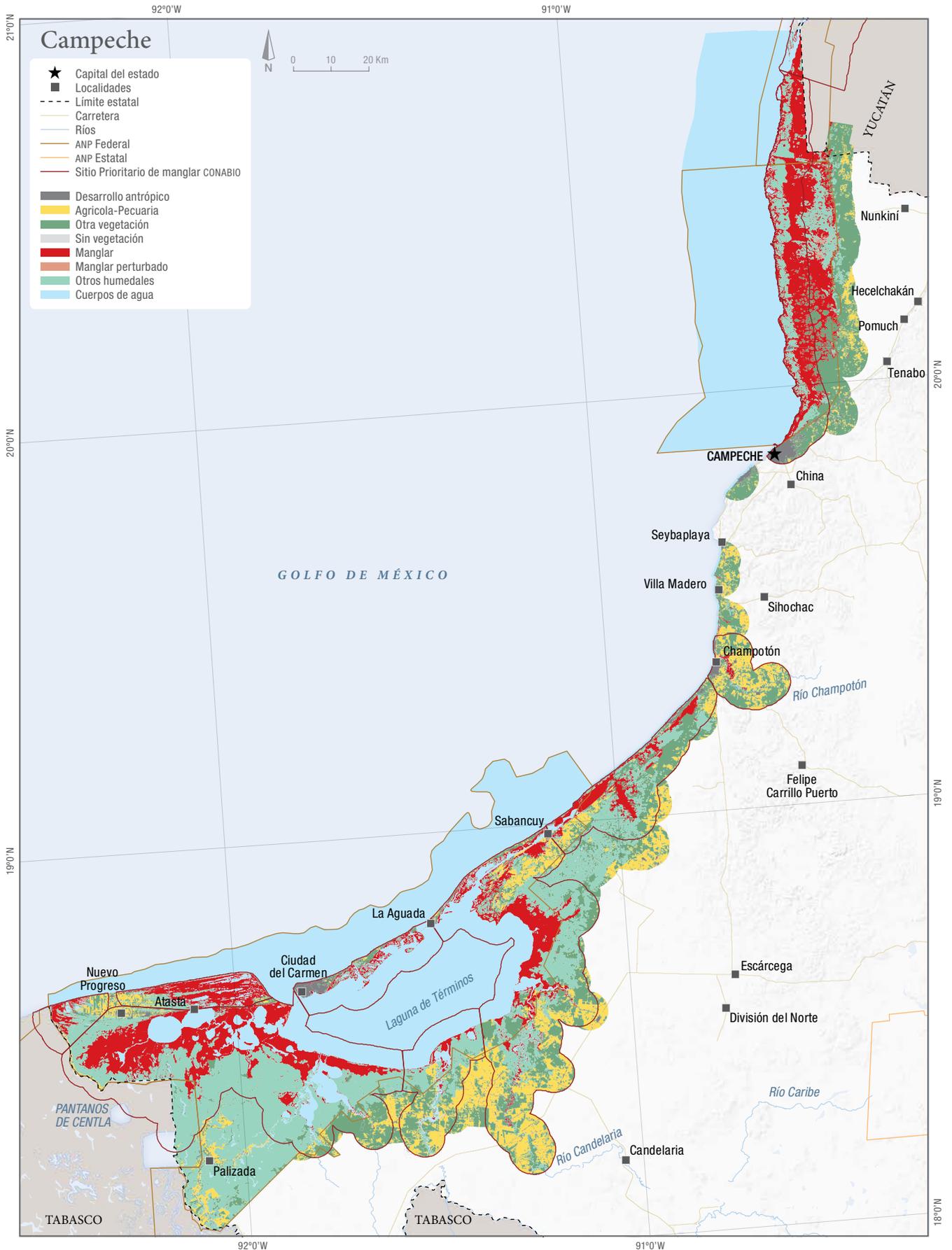
	2015	2020
Desarrollo antrópico	1.02	1.16
Agrícola-Pecuaria	9.14	9.69
Otra vegetación	15.15	14.65
Sin vegetación	0.08	0.11
Manglar	13.37	13.47
Manglar perturbado	0.14	0.07
Otros humedales	17.62	17.71
Cuerpos de agua	43.48	43.14



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Campeche** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Campeche**.



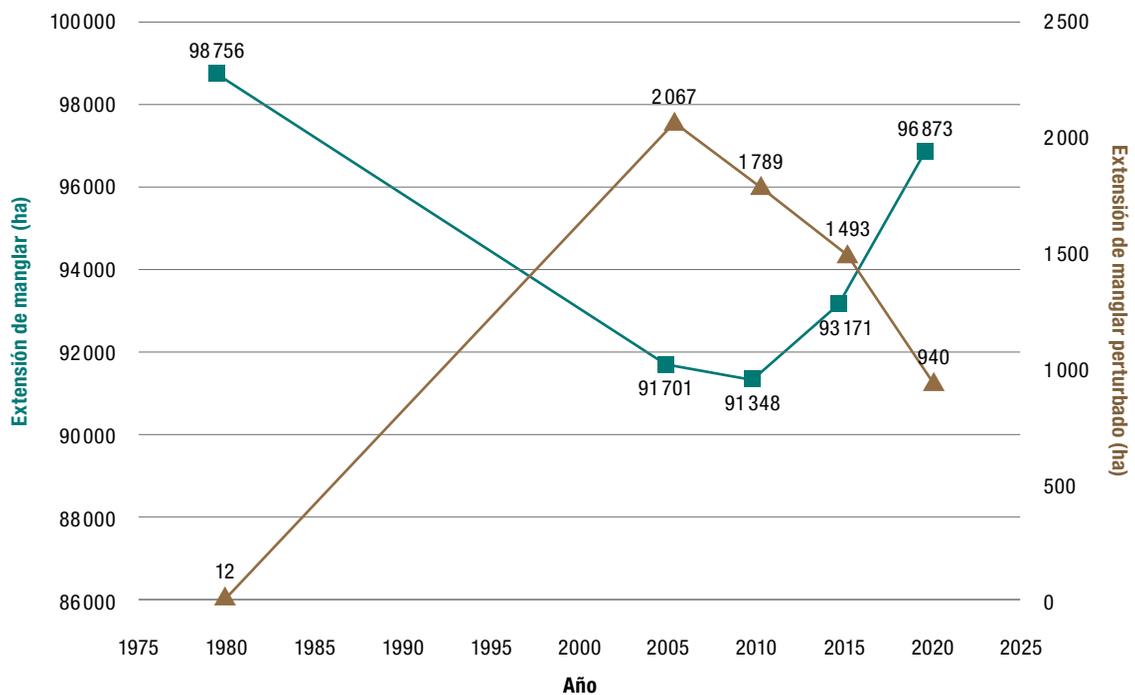
Yucatán



Vista aérea del manglar en Chuburná, Yucatán. FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO.

Yucatán

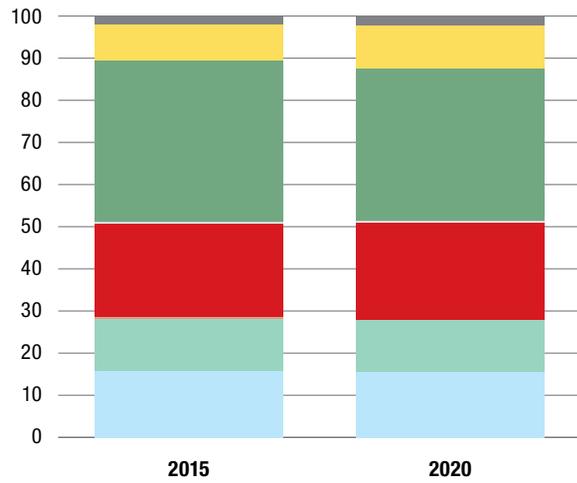
	Superficie (ha)				
	1979	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	98 756	91 701	91 348	93 171	96 873
Extensión del manglar perturbado	12	2 067	1 789	1 493	940
Extensión de la línea de costa (km)	370	370	370	370	370
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	31 336	31 364	31 120	33 402
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	20 937	43 361	55 048	56 445
Manglar en sitios Ramsar	0	71 938	71 833	72 330	75 518
Total de manglar bajo protección	0	71 997	71 846	86 195	89 863
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	10	10	10	10
Sitios Ramsar con manglar	0	4	4	4	4
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	2	3	3	2
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	2	3	3	3
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	93	91	91	92	92
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	79	79	93	93



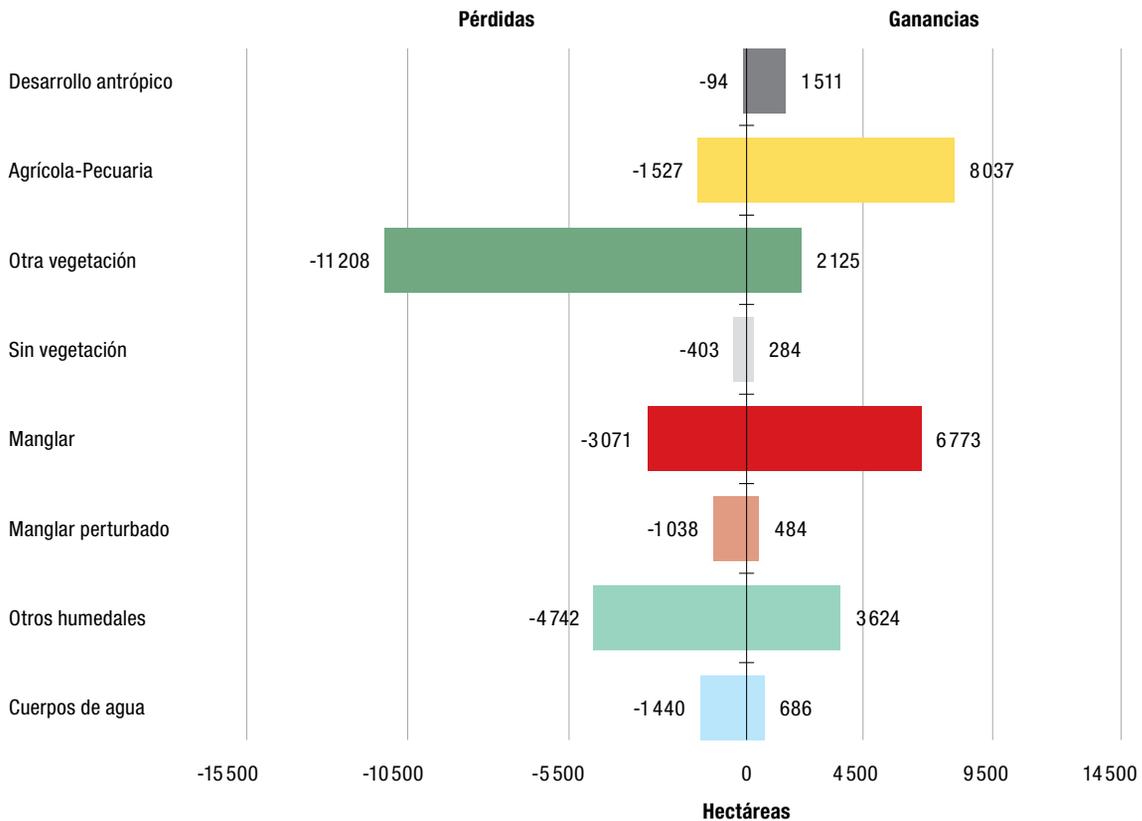
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en Yucatán.

Yucatán

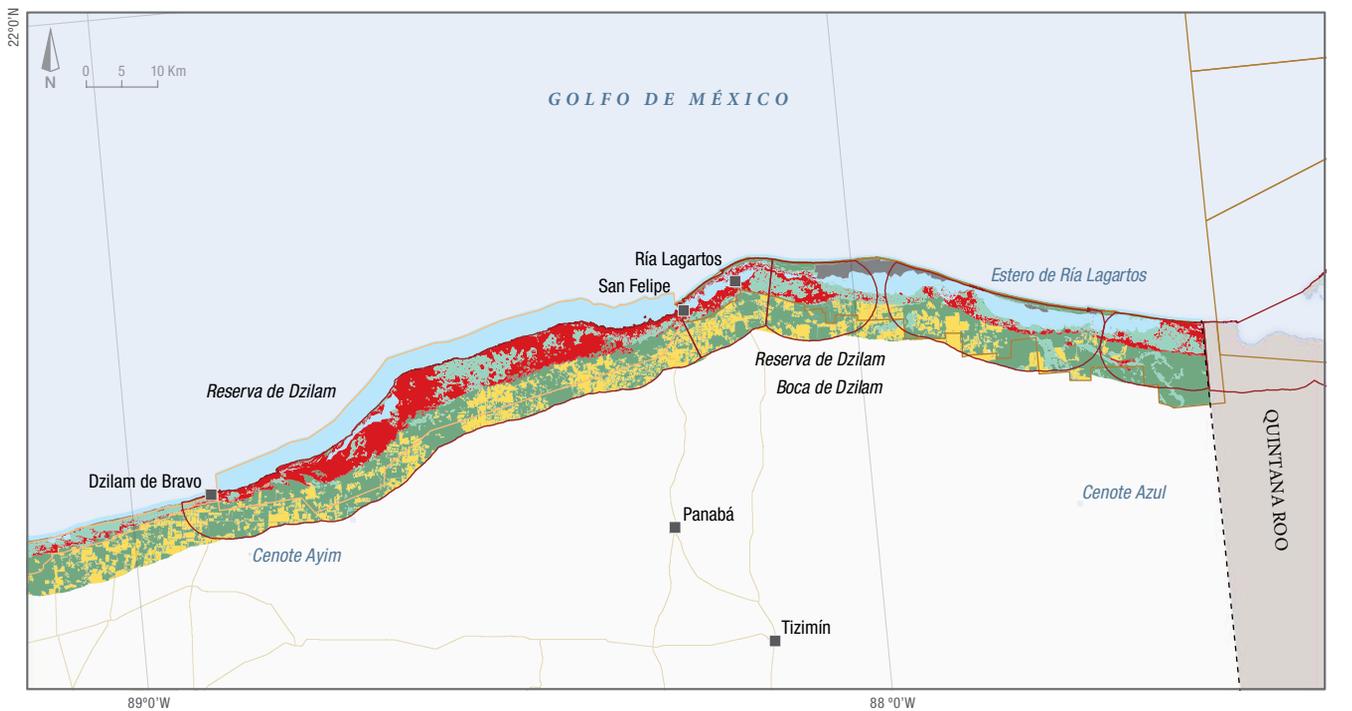
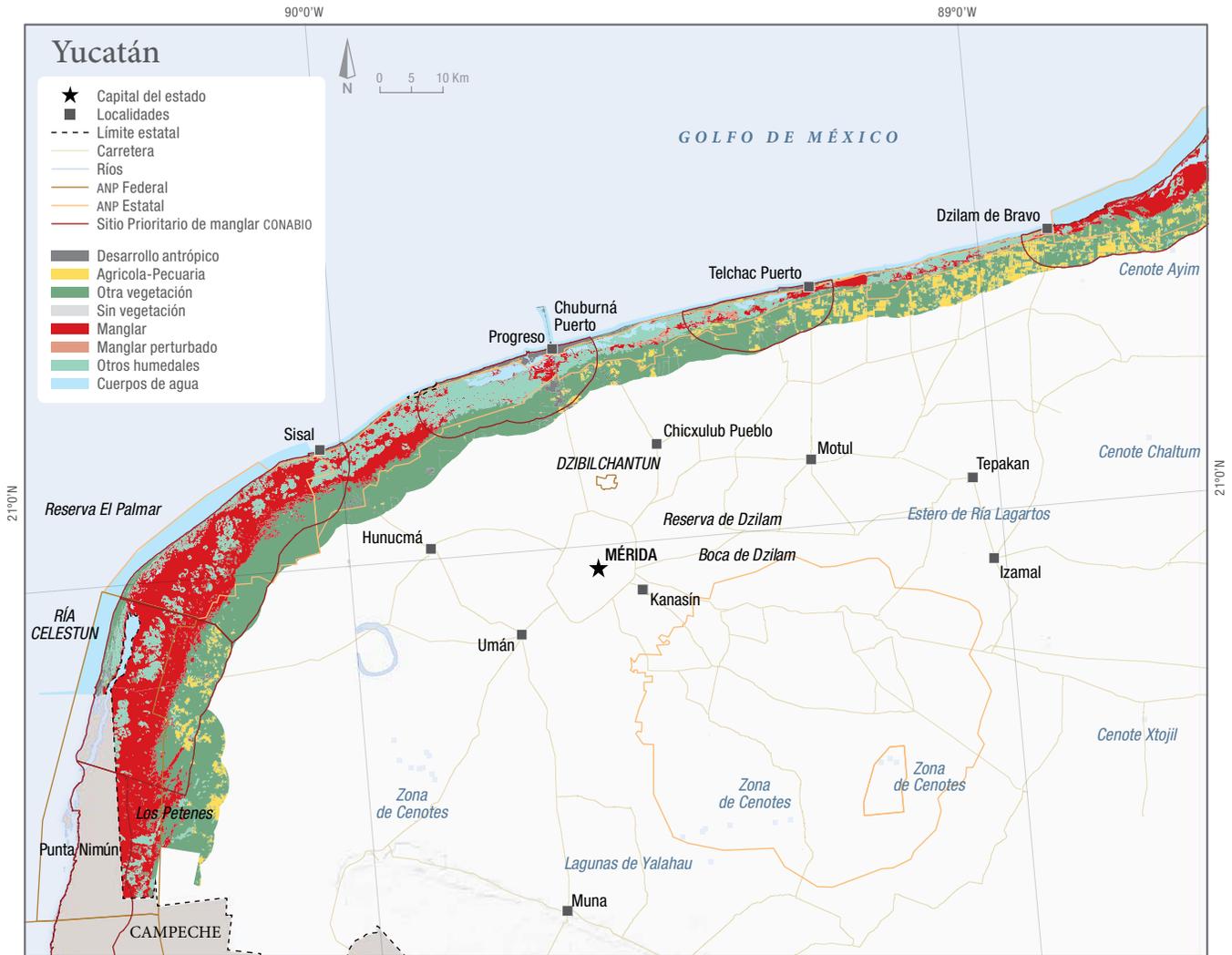
	2015	2020
Desarrollo antrópico	1.88	2.22
Agrícola-Pecuaria	8.56	10.11
Otra vegetación	38.44	36.27
Sin vegetación	0.30	0.27
Manglar	22.19	23.07
Manglar perturbado	0.36	0.22
Otros humedales	12.53	12.27
Cuerpos de agua	15.75	15.57



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Yucatán** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Yucatán**.



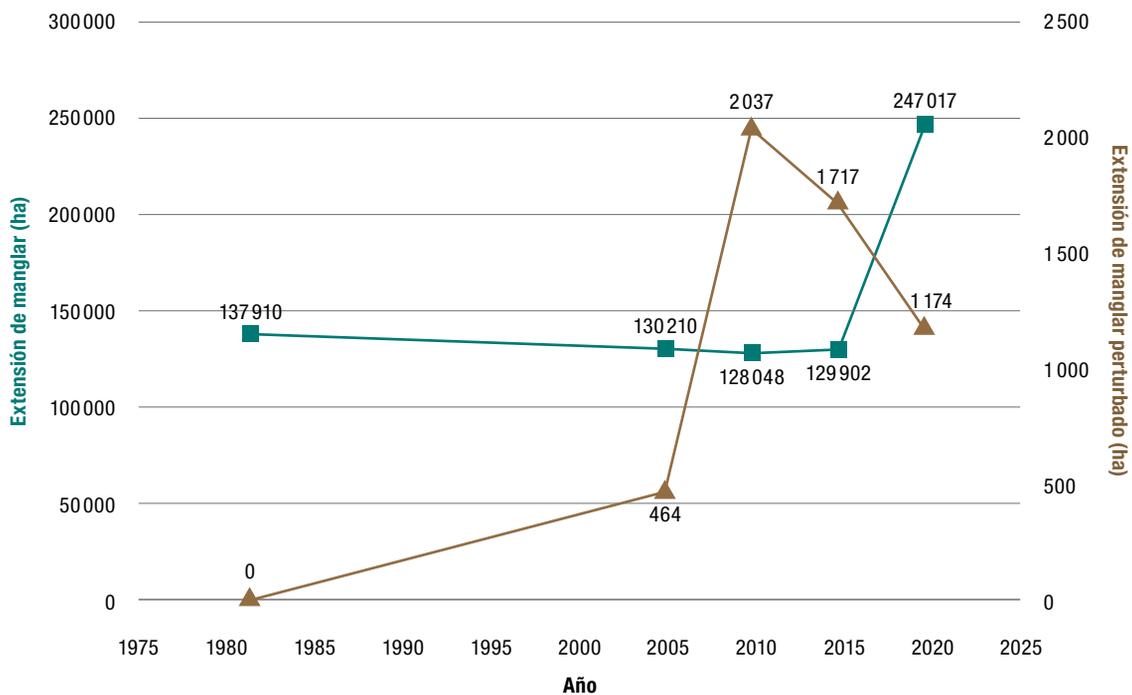
Quintana Roo



Manglares de Sian Ka'an, Quintana Roo. FOTO: J.A.A.M. CONABIO.

Quintana Roo

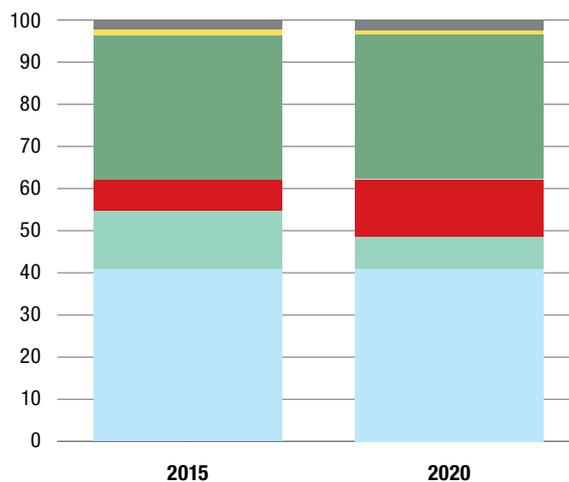
	Superficie (ha)				
	1981	2005	2010	2015	2020
Extensión del manglar	137 910	130 210	128 048	129 902	247 017
Extensión del manglar perturbado	0	464	2 037	1 717	1 174
Extensión de la línea de costa (km)	1 398	1 398	1 398	1 398	1 398
Manglar en Áreas Naturales Protegidas federales	0	79 307	81 315	84 621	183 949
Manglar en Áreas Naturales Protegidas estatales	0	18 811	18, 580	19 074	33 863
Manglar en sitios Ramsar	0	66 013	68 803	84 241	175 876
Total de manglar bajo protección	0	98 130	100 764	103 796	216 658
	Número				
Sitios prioritarios de manglar	-	7	7	8	8
Sitios Ramsar con manglar	0	6	9	10	11
Áreas Naturales Protegidas federales con manglar	0	11	11	14	15
Áreas Naturales Protegidas estatales con manglar	0	5	6	6	7
	Porcentaje				
Línea de costa ocupada por manglar	76	74	73	75	83
Manglar protegido del estado (en ANP federal, estatal y/o Ramsar)	0	75	79	80	88



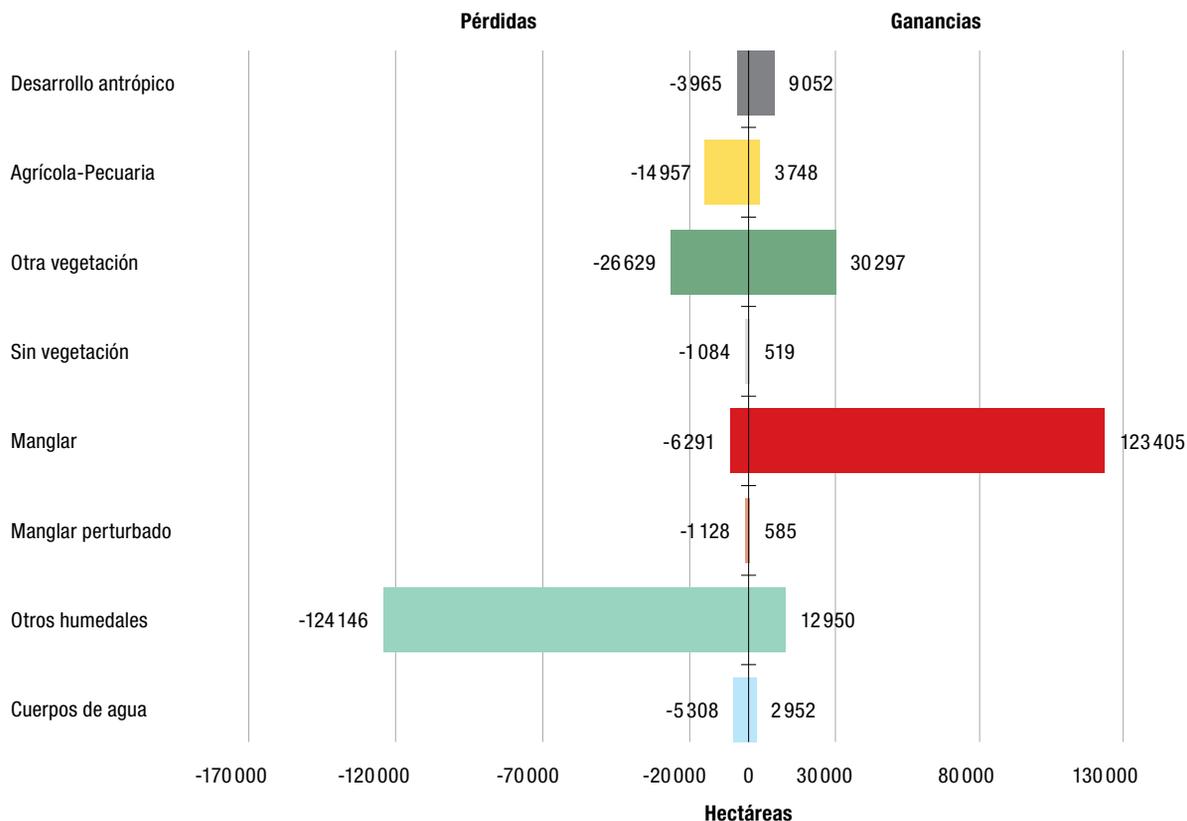
Cambios en la superficie de *manglar* y *manglar perturbado* en las cinco fechas de estudio en **Quintana Roo**.

Quintana Roo

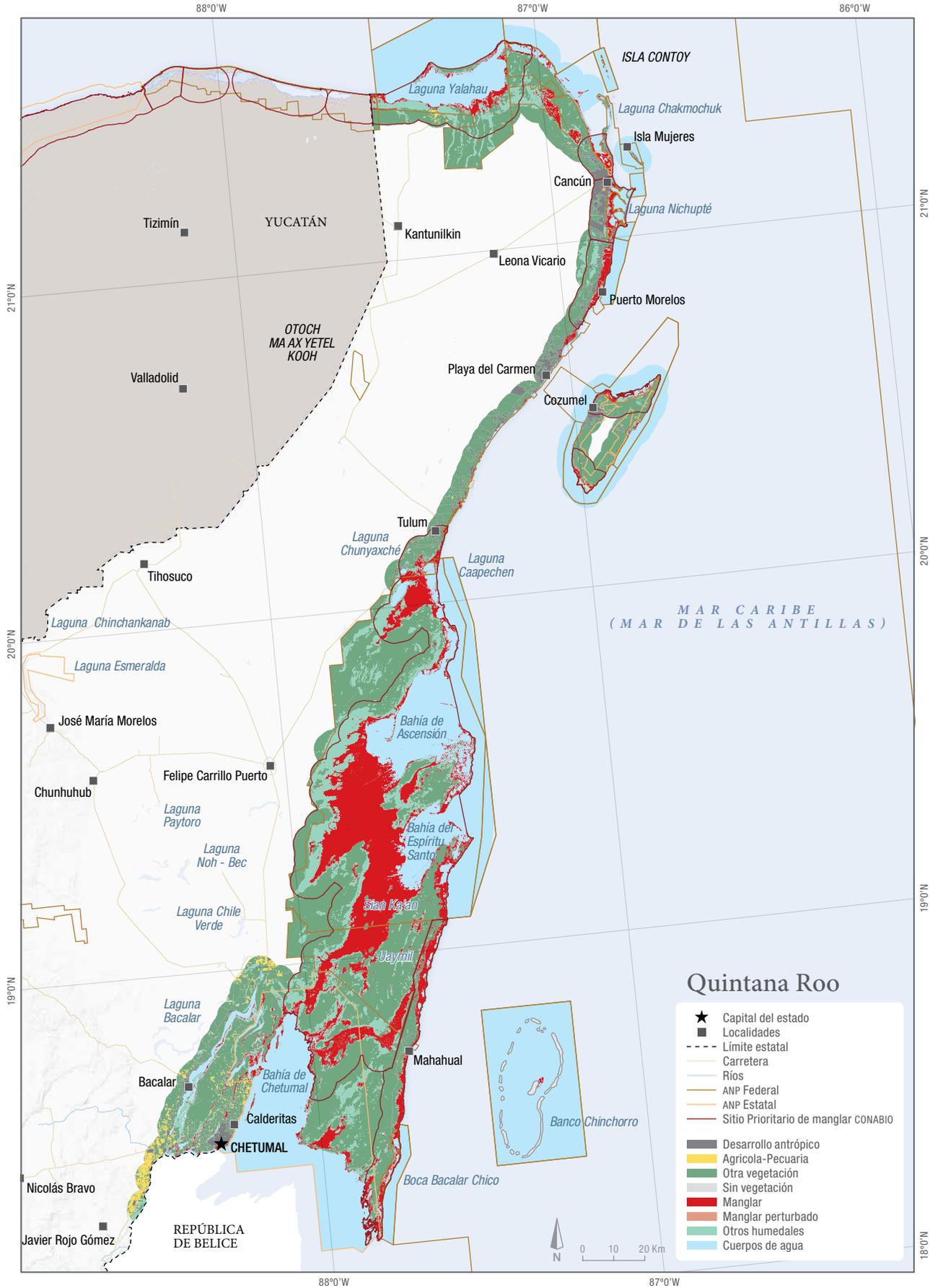
	2015	2020
Desarrollo antrópico	2.10	2.38
Agrícola-Pecuaria	1.61	0.99
Otra vegetación	34.07	34.28
Sin vegetación	0.14	0.11
Manglar	7.14	13.58
Manglar perturbado	0.09	0.06
Otros humedales	13.80	7.69
Cuerpos de agua	41.05	40.92



Porcentaje de cobertura en las clases presentes en **Quintana Roo** en el área de estudio del SMMM.



Hectáreas de pérdidas y ganancias según clase de cobertura o uso de suelo de 2015 a 2020 en **Quintana Roo**.





Manglar arbustivo en Mahahual, Quintana Roo.
FOTO: A.H.S.C. UASMÉXICO-FMCN-CONABIO

ANÁLISIS DE DATOS Y CASOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS MANGLARES DE MÉXICO

3.1 Dinámica de cambios de manglares

A pesar de la importancia de los manglares, el ecosistema está altamente amenazado. La pérdida mundial de manglares se ha atribuido principalmente a la actividad humana como la deforestación, la conversión a la acuicultura y el desarrollo urbano (Alongi *et al.* 2015). Estos procesos tienen como una de sus consecuencias, la liberación a la atmósfera de grandes cantidades de carbono previamente almacenado, contribuyendo sustancialmente al calentamiento global (Simard 2019; Goldberg 2020).

Además de los impactos directos por las actividades humanas, existen eventos naturales que inciden en los manglares. Eventos climáticos naturales como nortes y huracanes así como la transgresión y regresión de la costa debido al aumento relativo del nivel del mar, representan un constante factor de cambio, pues tienen la capacidad de provocar perturbación o renovación en estos ecosistemas, ya sea directamente (defoliación por impacto de fuertes vientos) o indirectamente (como cambios en la dinámica de hídrica y de sedimentos), además de generar un constante cambio de materia y energía (sedimentos, biomasa, sólidos disueltos y suspendidos, etc.) entre los ecosistemas adyacentes (Ken y Osland 2020).

La dinámica de cambios de los manglares se entiende como la variación espacial y temporal de su superficie, derivada de factores antrópicos y naturales, y está representada por los usos de suelo y otras coberturas. El objetivo de esta

sección es analizar las diferentes dinámicas de cambio que han ocurrido con la superficie del ecosistema, en función de los datos del SMMM.

La cartografía del SMMM consta hasta el momento de cinco fechas a lo largo de un periodo de estudio de aproximadamente 50 años, generadas con el método interdependiente excepto la línea base (2005), como se explica en el capítulo 2. Una de las ventajas de este método es la reducción de errores representados por falsos cambios, pues se enfoca únicamente en la interpretación de los cambios observables en las coberturas. Considerando lo anterior, la comparación de la cartografía expresa de forma óptima las clases que intervienen en las trayectorias y dinámicas de cambio que han ocurrido con el ecosistema de manglar desde 1970/1980 hasta 2020.

Se utilizó la cartografía de la distribución de manglares generada en las cinco fechas para conformar un nuevo mapa que representa la distribución histórica del manglar, es decir, las áreas en donde por lo menos en una fecha se ha reportado su presencia. Con este nuevo mapa de distribución histórica del manglar se sobrepusieron los mapas de usos de suelo y vegetación dentro del área de estudio del SMMM a nivel nacional, para todas las evaluaciones, obteniendo así cinco recortes de las coberturas de manglar y clases circundantes. Estos últimos recortes de los mapas de uso de suelo y vegetación se intersecaron entre sí, obteniendo como resultado un mapa denominado *Cambios históricos del manglar*, que representa las áreas y las clases que intervienen en los procesos de cambio a lo largo del tiempo (figura 3.1).

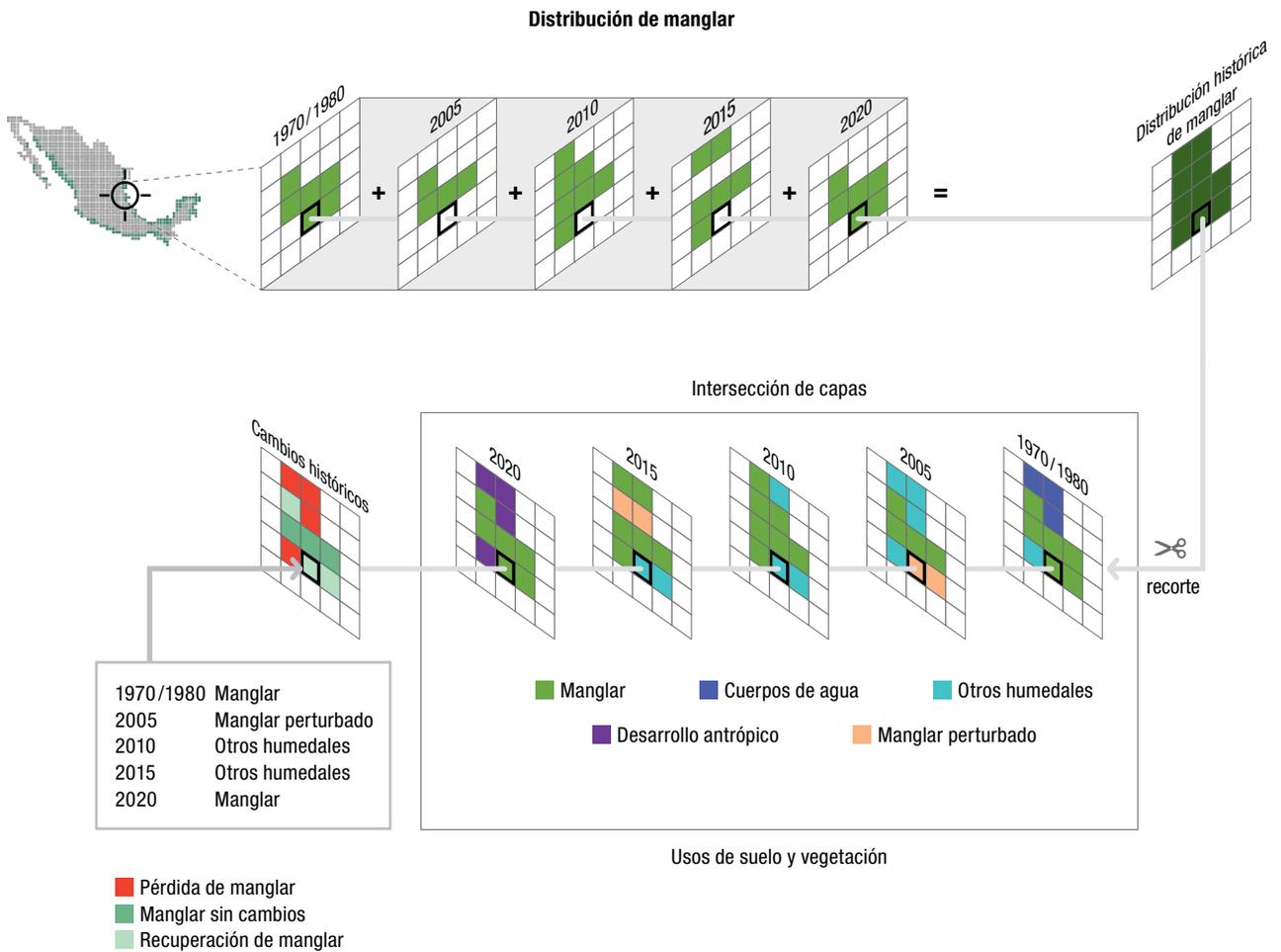


FIGURA 3.1 Proceso para obtener la distribución y los cambios históricos del ecosistema de manglar.

Para simplificar el número de clases que intervinieron en las trayectorias de cambio y su dinámica, se agruparon en siete categorías (cuadro 3.1). Una vez identificadas, se estimó su superficie y porcentaje con respecto al área de manglar para 1970/1980 en el caso de pérdidas y recuperaciones y con respecto a la superficie de 2020 para el caso de ganancias.

La figura 3.2 ilustra los cambios que han sufrido las zonas de distribución de manglares tomando como referencia la fecha más antigua

(1970/1980), a través de los diferentes periodos de observación. Resulta claro que la distribución de los manglares en el tiempo es dinámica, ya que aproximadamente 24% de la cobertura reportada en 1970/1980 tuvo algún tipo de cambio. Lo anterior es el resultado de los procesos que ponen a prueba su resiliencia y los han llevado a desarrollar estrategias de adaptación (Alongi 2007), situación que se observa en el flujo de recuperación que va desde 1 a 4% cuando los cambios ocurren entre **rM** y **ocMp**.

CUADRO 3.1 Categorías consideradas para el análisis de trayectorias y dinámica de cambios.

Categorías para el análisis de trayectorias de cambio	Descripción	Simbología
Manglar inicial	Superficie de manglar considerada como punto de partida para el análisis, correspondiente a la reportada en la fecha 1970/1980.	M 
Manglar sin cambio	Áreas de manglar identificadas en 1970/1980 y que permanecen sin cambios en las posteriores fechas de observación.	Msc 
Recuperación de manglar	Corresponde a áreas de manglar identificadas en 1970/1980, que en fechas intermedias se reportan como pérdidas hacia otras coberturas o usos de suelo, pero se recuperan y se registran como manglar en fechas posteriores.	rM 
Ganancia de manglar	Áreas registradas como manglar a partir de 2005 y que no se consideraban como manglar en 1970/1980.	gM 
Ganancia de manglar acumulada	Áreas registradas como manglar entre 2005 y 2015, no consideradas en 1970/1980 y que se mantienen sin cambios hasta 2020.	gMa 
Otras coberturas y manglar perturbado	Agrupación de las clases: <i>Otra vegetación, Sin vegetación, Manglar perturbado, Otros humedales y Cuerpos de agua.</i>	ocMp 
Usos de suelo	Agrupación de las clases: <i>Desarrollo antrópico y Agrícola–Pecuaria.</i>	US 

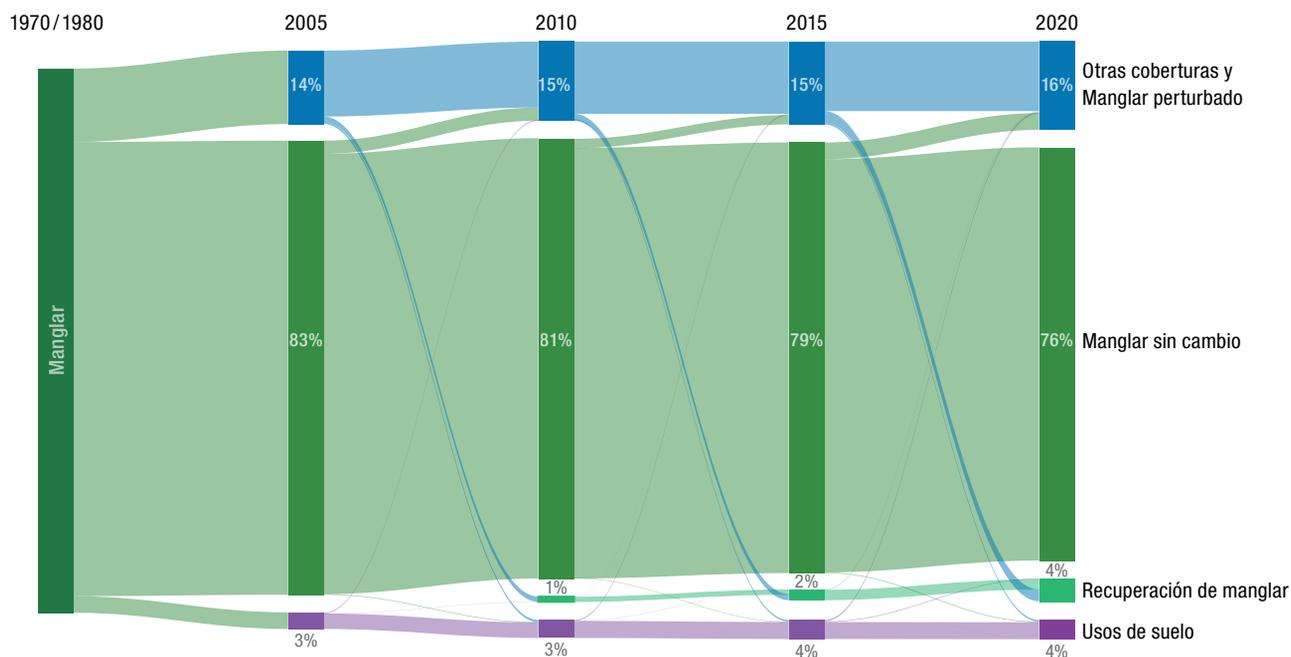


FIGURA 3.2 Diagrama de flujo sobre los cambios en la superficie de manglar identificado en la primera fecha (1970/1980) a lo largo de observaciones posteriores.

Los manglares que han permanecido sin cambios tienen particular importancia debido al establecimiento y permanencia a largo plazo de los servicios ecosistémicos que proveen (Barbier *et al.* 2011). Estas áreas representan un reto para su conservación, pues al tener una estructura y función más desarrollada (de al menos 50 años), su pérdida puede considerarse más grave, al asumir no sólo la pérdida del manglar en sí, sino también el valor agregado que representan y que engloba desde pérdida de material genético hasta interacciones ecológicas con los ecosistemas adyacentes.

La cifra final de **Msc** en 2020 representa 76%, es decir 650 310 ha. Las áreas de **M** en el primer periodo (1970/1980–2005), registraron una pérdida de 17%, para después establecerse entre 2% (2005–2010, 2010–2015) y 3% (2015–2020). Esto significa que las áreas de **M** se siguen perdiendo a ritmo relativamente constante (figura 3.2) y muestran un aumento de pérdidas que se van hacia **US** y **ocMp**.

El hecho de que en 2020 aún se mantengan 650 310 hectáreas de **Msc**, reportado desde 1970/1980, está influenciado por las políticas públicas en materia de protección y conservación de manglares que se han implementado por parte del Gobierno de México en los últimos años así como por las acciones locales de conservación (Valderrama-Landeros *et al.* 2017).

Respecto a las pérdidas de **M**, tuvieron una mayor superficie hacia la categoría **ocMp** (14% para 2005, 15% para 2010 y 2015, y 16% para 2020) que hacia **US** (3% para 2005 y 2010 y 4% para 2015 y 2020). Las pérdidas hacia **ocMp** representan cierto grado de reversibilidad (Valderrama *et al.* 2017), con respecto a **US**, lo que quiere decir, que una vez que cambia hacia coberturas antrópicas tiene una menor probabilidad de recuperarse, pues esas coberturas representan mayor transformación del ecosistema original y tienen una mayor permanencia a lo

largo del tiempo (Velázquez-Salazar *et al.* 2019; Valderrama-Landeros *et al.* 2020).

Por otra parte, las áreas de **rM** comparadas con aquellas que se han perdido son menores a lo largo de todas las fechas evaluadas. Esto implica que las ganancias de manglar registradas sobre todo en las últimas dos fechas (2015 y 2020) corresponden, en su mayor parte, a sitios en donde antes no se había registrado presencia de manglar. Sí bien esto prueba que existen condiciones para que los manglares se extiendan y colonicen nuevas áreas (López-Medellín *et al.* 2011), su valor en términos de estructura y función (Barbier *et al.* 2011) podría no ser la misma que las áreas de **Msc** y plantea la duda del tiempo en el que podrán llegar a formar condiciones tan complejas como los sitios estables y desarrollados que permanecen sin cambios desde 1970/1980.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de áreas de ganancia que se incorporaron a la distribución de manglar después de la primera fecha.

Para 2020, las superficies de **Msc** y **rM** se reportaron en 650 310 hectáreas (76%) y 35 763 hectáreas (4%) respectivamente, lo que significa que el resto de la superficie de manglar, un total de 219 013 hectáreas, se incorporaron como **gM** (67%) durante el último periodo (2015–2020) o como **gMa** (33%) en los anteriores (1970/1980–2005, 2005–2010 y 2010–2015).

En el periodo 1970/1980–2005 se incorporó el 21% de ese total. En 2005–2010 se mantuvieron la mayor parte de estas ganancias y se agregaron nuevas para alcanzar el 25%. Para los periodos 2010–2015 y 2015–2020, nuevamente las **gMa** se conservan en su mayoría (representando el 33% del total áreas catalogadas como **gM** en 2020), incorporándose 17 612 hectáreas provenientes, en su mayor parte, de **ocMp** para 2010–2015 y 147 374 hectáreas en 2015–2020. Esta última incorporación es la mayor superficie registrada

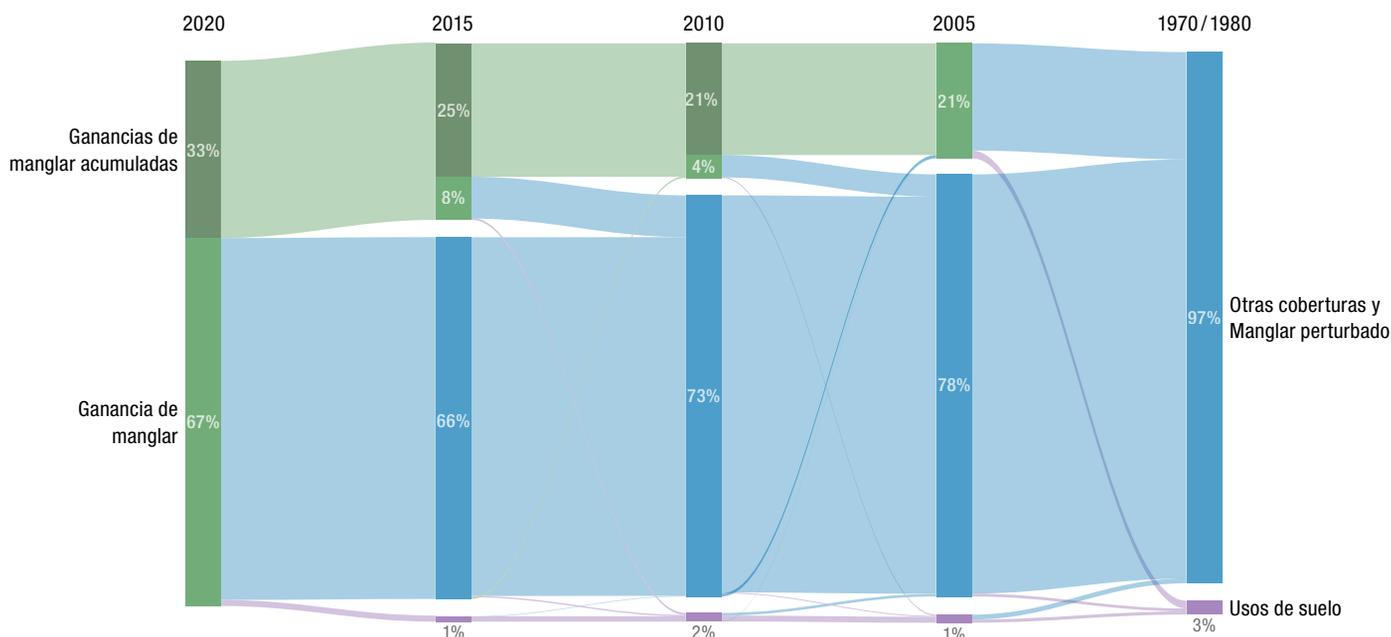


FIGURA 3.3 Diagrama de flujo de áreas que se incorporaron a la clase manglar (gM y gMa) en las diferentes fechas de evaluación.

como **gM** proveniente de **ocMp** en los periodos estudiados por el SMMM y obedece a una reclasificación que se explica en la sección 3.2.

Los resultados a nivel espacial están disponibles por estado y se puede consultar por polígono en el Atlas de Naturaleza y Sociedad, del que se habla con más detalle en la sección 4.3.

Un punto destacable en la observación de la dinámica de la distribución de los manglares, en la ventana de aproximadamente 50 años, es la resiliencia que presenta el ecosistema en términos de cobertura, a pesar de la dinámica del ambiente costero donde se encuentra localizado y la presión que representan las actividades humanas. Este ecosistema tiene la capacidad de colonizar nuevas áreas, siempre y cuando las condiciones necesarias para hacerlo sean óptimas, y de prevalecer a pesar de sus amenazas. Pese a su resiliencia, los datos muestran una persistente pérdida

de áreas de manglar, con las consiguientes pérdidas en la biodiversidad del entorno costero y la degradación de sus servicios ecosistémicos, que finalmente se reflejan en el bienestar de las comunidades que viven de los recursos y servicios que los manglares proporcionan.

Otra consideración que se deberá tomar en cuenta para estudios posteriores es la variabilidad que han tenido los manglares a lo largo de su historia geológica. Procesos geológicos y climáticos, como la tectónica de placas, el movimiento de bancos de sedimentos y el incremento del nivel medio del mar, han influido directamente en la distribución de los manglares desde hace millones de años; aunados a las presiones contemporáneas que experimenta el ecosistema (Friess *et al.* 2019), estos factores representan puntos medulares para estrategias contemporáneas sobre la conservación no sólo de los manglares, sino también de otros

ecosistemas costeros adyacentes que les permitan tener una adaptación a los cambios que experimenten. En este sentido, los datos del SMMM son un punto de partida para futuras investigaciones o colaboraciones en estos temas.

Será importante continuar con esta investigación, sobre todo en las áreas de ganancias y pérdidas de manglar. Identificar estas zonas aunado a las herramientas legales disponibles en México, representan una excelente herramienta para la protección o restauración de los manglares.

3.2 Diferenciación de manglar arbustivo en el Complejo Sian Ka'an, Quintana Roo.

El Complejo Sian Ka'an está compuesto por los polígonos de la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an, el Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil y la Reserva de la Biósfera Arrecifes de Sian Ka'an (CONANP 2014). En esta sección, de forma práctica, se hará referencia al Complejo Sian Ka'an en el entendido de que los manglares en esta

región sólo se distribuyen en las dos primeras áreas antes mencionadas.

Este sitio está incluido en la Lista de Patrimonio Mundial Cultural y Natural y forma parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera del Programa "El Hombre y la Biosfera" de la UNESCO. Así mismo, es un sitio Ramsar para la protección de humedales, y de acuerdo con la CONABIO es un *Sitio Prioritario de Manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica* (Vázquez-Lule *et al.* 2019). Es una de las regiones mejor conservadas de la Península de Yucatán, dado que la presencia antropogénica está limitada por las características propias de la zona, lo que ha favorecido conservar la diversidad de los ecosistemas que lo conforman y su equilibrio ecológico (CONANP 2014).

El Complejo Sian Ka'an se ubica al este del estado de Quintana Roo, en la porción oriental de la Península de Yucatán (figura 3.4). Es una zona con alta incidencia de huracanes, entre los cuales algunos de los más relevantes han sido Gilberto en 1988, Roxanne en 1995, Isidoro en 2003, Wilma en 2005 y Dean en 2007 (CONANP 2014).

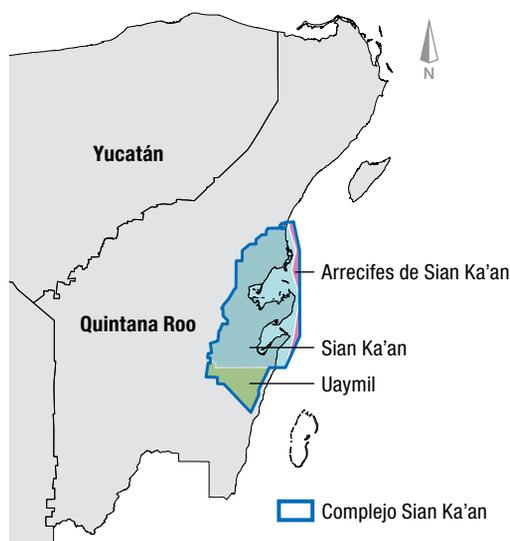


FIGURA 3.4 Ubicación del Complejo Sian Ka'an, Quintana Roo.

En el Complejo Sian Ka'an los manglares se encuentran presentes en dos formas de vida:

- a) *Manglares arbustivos*: Constituido por árboles de mangle rojo (*R. mangle*) que pueden alcanzar hasta dos metros de altura; junto con el pantano de zacates abarcan las áreas más extensas en esta zona (figura 3.5). Este tipo de manglares cubre grandes extensiones de áreas interiores que posiblemente concentren sales durante la época seca, por lo que los manglares no pueden crecer más a causa de que los nutrientes no pueden ser absorbidos debido a la abundancia de carbonato de calcio (CONANP 2014).
- b) *Manglares arbóreos*: Se encuentran presentes en los cayos y en los bordes de las lagunas costeras, con alturas promedio entre seis y ocho metros, llegando a alcanzar hasta 12 metros; están compuestos de mangle rojo (*R. mangle*), negro (*A. germinans*), blanco (*L. racemosa*) y botoncillo (*C. erectus*).

Sian Ka'an tiene una enorme presencia de petenes, que constituyen un hábitat único excepcionalmente importante. Son formaciones

peculiares más o menos concéntricas, de forma y tamaño variable, de asociaciones vegetales que representan una transición gradual entre la vegetación selvática del interior y los pantanos inundables. Una de las explicaciones más extendidas para la presencia de estas "islas de árboles" es que se debe a brotes de agua dulce que forman un manantial o un cenote o que simplemente fluyen de manera difusa. El aporte de agua dulce favorece el desarrollo de árboles intolerantes o poco tolerantes a la salinidad.

En el Complejo Sian Ka'an existen centenares de petenes con elementos mezclados, entre los que se encuentra los manglares en densidad y altura variables.

A lo largo de las actualizaciones de la cartografía del SMMM se presentaron limitaciones técnicas para cartografiar los manglares arbustivos en el Complejo Sian Ka'an, debido principalmente a las condiciones ambientales particulares de esta área y su respuesta en los insumos utilizados.

Como se menciona en el capítulo 2, las imágenes SPOT-5 dejaron de estar disponibles por lo que en 2020 se recurrió al uso de las imágenes



FIGURA 3.5 Vista aérea y a nivel de lancha de manglar arbustivo en Sian Ka'an, Quintana Roo. FOTOS: A.O.O.M (IZQUIERDA) Y J.A.A.M. (DERECHA).

Sentinel-2. Las características de resolución espacial resultan similares en ambos tipos de imágenes; sin embargo, las imágenes Sentinel-2 presentan características de resolución espectral que favorecieron la separación de manglares arbustivos con relación a otro tipo de humedales que, aunado a una fuerte retroalimentación con el personal de la CONANP, permitió cartografiar con mayor precisión los manglares arbustivos del Complejo Sian Ka'an.

Lo anterior se debe a que las imágenes Sentinel-2 tienen dos bandas espectrales de SWIR⁹ que permiten identificar mejor los manglares, a diferencia de SPOT-5 que solamente contaba con una. Las bandas SWIR de Sentinel-2 se han usado regularmente en la diferenciación de manglares

y otra vegetación (Lanaras *et al.* 2018; Wang 2018; Jia *et al.* 2019; Pham *et al.* 2019; Purwanto y Asri-ningrum 2019; Hu *et al.* 2020; Luo *et al.* 2020; Manna y Raychaudhuri 2020).

Para visualizar las imágenes para el mapeo de manglar se usó la combinación de bandas NIR (B8), SWIR1 (B11) y Rojo (B4) asignados en los canales RGB respectivamente; este arreglo de bandas es consistente con la visualización de las imágenes usadas anteriormente. De esta forma, aunque el insumo cambió, se mantuvo el mismo método de visualización para que los datos pudieran ser comparados entre cada mapa (figura 3.6).

Dentro de la exploración del insumo Sentinel-2, se comprobó que al colocar la banda

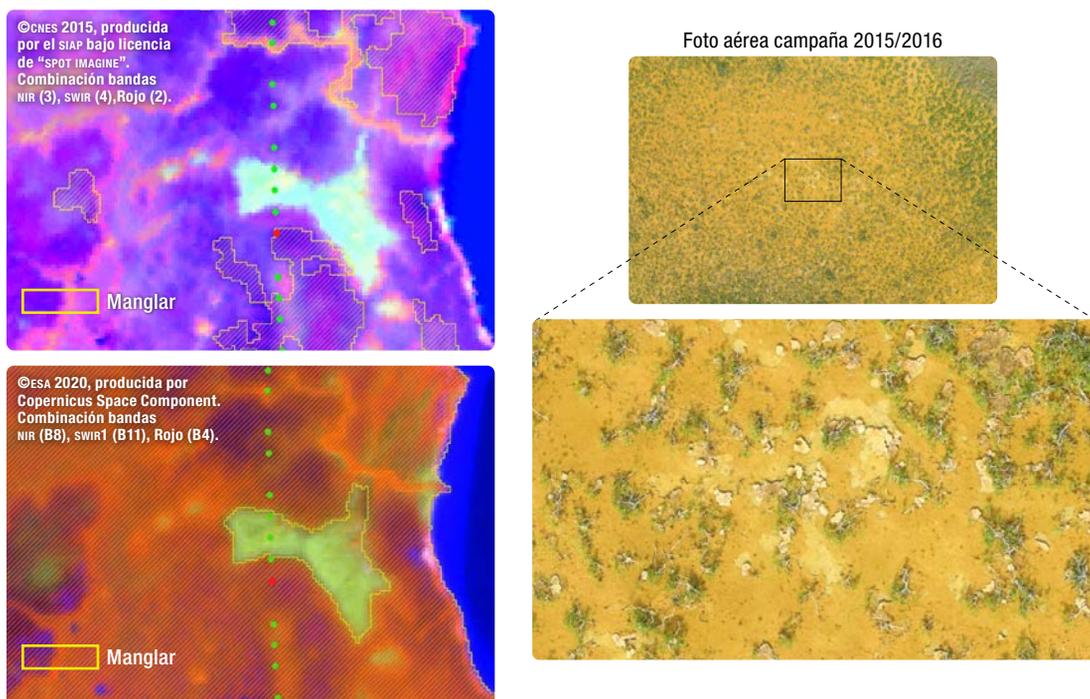


FIGURA 3.6 Comparación entre spot-5 (2015) y Sentinel-2 (2020) para identificar el manglar con la combinación de bandas NIR, SWIR y Rojo.

⁹ Banda 11 SWIR1 (longitud de onda central 1 610 nm) y banda 12 SWIR2 (longitud de onda central 2 190 nm).

SWIR2 (B12) en lugar de la banda Rojo se acentúa el contraste del manglar arbustivo y permite mejorar su identificación con respecto a otros elementos. Para la zona del Complejo Sian Ka'an, el manglar arbustivo se muestra en tonos rojos intensos a diferencia de los colores violetas y azules vistos con la B4 de SPOT-5 (figura 3.7). En esta misma imagen SPOT-5 (2015) con el arreglo de bandas NIR, SWIR y Rojo se pueden observar áreas en colores rojos, morados e incluso magentas, con este insumo, esta respuesta espectral se interpretó como zonas de otros humedales con posible presencia de individuos dispersos de mangle (figura 3.7A); en cambio, en la imagen Sentinel-2 (2020) con el arreglo de bandas NIR, SWIR1 y Rojo, en las áreas antes descritas se presentan colores rojos más intensos con mezclas de magenta, es decir que con el cambio de insumo las áreas con presencia de manglares se encuentran acentuadas (figura 3.7B); finalmente, en la figura 3.7C los colores se intensifican aún más, lo que revela claramente su presencia en amplias áreas que antes eran de incertidumbre, mostrando colores rojos oscuros, intensos y muy acentuados, que reflejan un comportamiento espectral típico del ecosistema.

Adicionalmente a los insumos satelitales Sentinel-2, se usaron fotografías aéreas verticales y panorámicas de alta resolución geolocalizadas, tomadas por la CONABIO con la colaboración de la SEMAR en la campaña 2015/2016. Cabe mencionar que las fotografías no estuvieron disponibles durante la elaboración del mapa de manglares en 2015, sino hasta el primer trimestre de 2016, en donde se usaron para la validación del mapa. Para la cartografía 2020 además se interpretó la serie de tiempo de la fenología en estas áreas de incertidumbre, encontrando que en la mayoría de los casos el perfil se comportaba como vegetación de manglar.

Todo lo anterior confirmó la presencia de manglar en densidad suficiente para reclasificar estas áreas de la clase *Otros humedales a la clase Manglar*.

Para confirmar el cambio de clase, debido a que se trataba de una superficie considerable de más de 80 000 ha, se solicitó el apoyo del personal del Complejo Sian Ka'an de la CONANP, con la finalidad de obtener su retroalimentación sobre esta mejora al mapa. En la colaboración específica entre personal de la CONABIO y CONANP (CONABIO-CONANP 2020) se intercambiaron

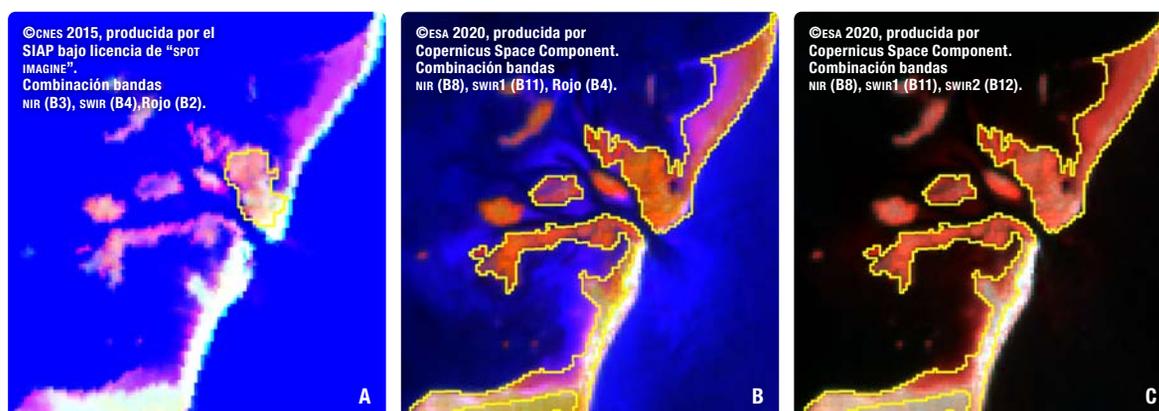


FIGURA 3.7 Visualización de imágenes SPOT-5 y Sentinel-2 para resaltar los manglares. Los polígonos mayores a una hectárea son los que se incluyen en la cartografía final.

opiniones sobre la cartografía preliminar, revisando y discutiendo los cambios generados y se realizó una revisión del material fotográfico de la zona proporcionado por ambas instituciones.

Finalmente, soportados en toda la información disponible y la retroalimentación recibida, se acordó cambiar 83 791 hectáreas pertenecientes al Complejo Sian Ka'an de la clase *Otros humedales* a *Manglar* (figura 3.8).

Una de las implicaciones que presenta esta mejora en el mapa es que estas zonas de manglar puedan ser consideradas por los usuarios de la información para diferentes fines como investigación, restauración, rehabilitación, programas

de ordenamiento territorial, entre otros. También es importante mencionar que estas zonas serán consideradas por la ley aplicable en materia de protección de los manglares, como el artículo 60 TER.

El presente tema se considera como ejemplo de la adaptabilidad de los insumos del SMMM, de la retroalimentación de sus métodos de PR (aplicados en la diferenciación de manglares en zonas de incertidumbre), y de la colaboración con otras instituciones, para lograr uno de los objetivos primordiales del SMMM, que es generar una cartografía confiable de la distribución y extensión de los manglares en México.

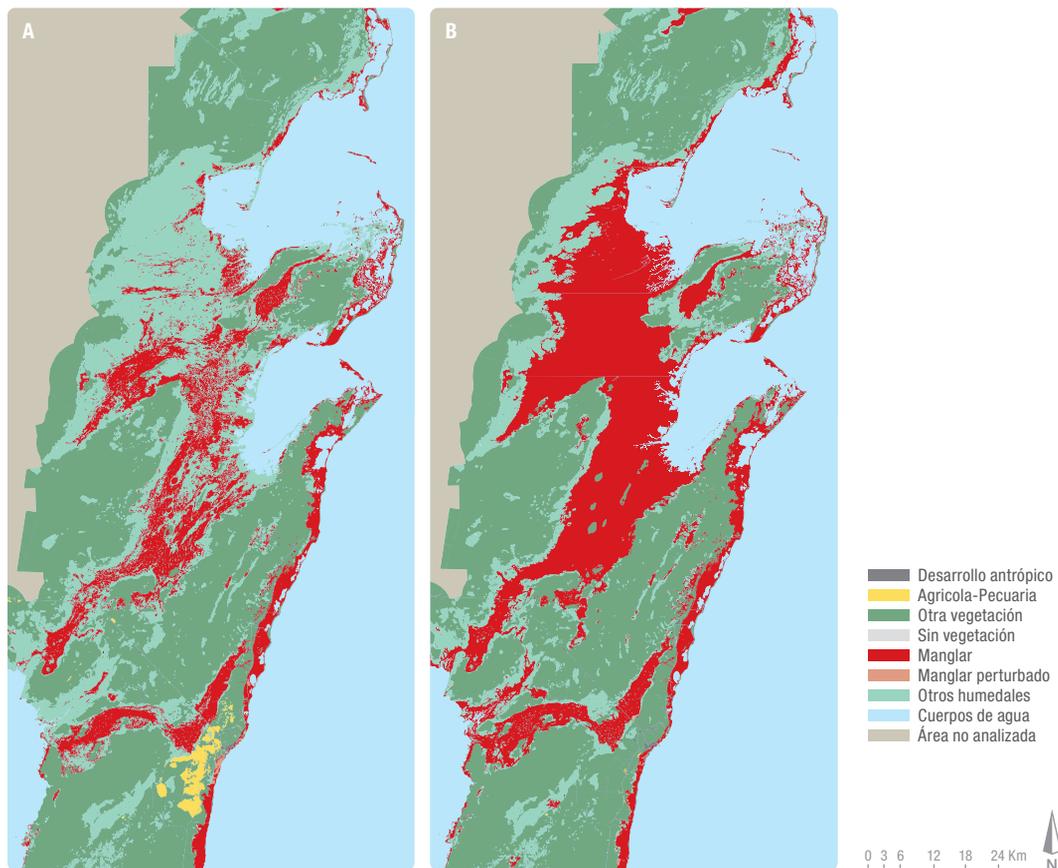


FIGURA 3.8 Comparación del mapa de manglares 2015 (A) y 2020 (B) en un área del Complejo Sian Ka'an, Quintana Roo.

3.3 Cambios en los manglares por impacto de fenómenos hidrometeorológicos: Caso de los huracanes Willa y Carlotta

Los huracanes son el nombre que se les da en México y otras partes del mundo a eventos hidrometeorológicos llamados ciclones, que son tormentas tropicales de gran magnitud cuyos vientos giran alrededor de un núcleo llamado ojo. Este tipo de eventos nacen en el mar, dadas ciertas condiciones de temperatura en el agua y presión en la atmósfera, que a su vez son originadas, en esencia, por el movimiento de la tierra alrededor de su eje (rotación) y los cambios estacionales durante el movimiento del planeta alrededor del sol (traslación).

Para ser considerados huracanes, las tormentas tropicales deben alcanzar vientos sostenidos de al menos 119 km/h. A partir de esta velocidad mínima, tanto el Centro Nacional de Huracanes de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la CONAGUA utilizan la llamada escala Saffir-Simpson¹⁰ para categorizarlos por su velocidad de viento.

Dependiendo de su intensidad y trayectoria, estos fenómenos pueden producir daños notables, tanto por la acción física del viento como por la gran cantidad de agua que dejan caer en periodos de tiempo muy cortos y los sedimentos y detritos que pueden arrastrar desde tierra adentro. Se ha demostrado el efecto de protección de los manglares para mitigar los daños en las áreas de costa (Guannel *et al.* 2016), atenuando los efectos del oleaje y el viento, contribuyendo a

facilitar la deposición neta de sedimentos y la clarificación gradual del material del lecho marino (Horstman *et al.* 2014).

A largo plazo, aún existen incógnitas sobre las relaciones entre la vegetación y estos eventos. Pero se puede afirmar que los manglares son un tipo de vegetación que ha evolucionado en el contexto de la ocurrencia de estos fenómenos, modelando de alguna manera su resiliencia, estructura y composición de especies (Smith *et al.* 2020). Investigaciones como la de Feher *et al.* (2020) incluso sugieren la existencia de cambios cíclicos en los aportes de sedimentos debido a la ocurrencia de tormentas y huracanes, lo que lleva a cambios en la microtopografía y, por lo tanto, en el desarrollo y acomodo espacial de las especies presentes.

El estudio de estos procesos es muy importante para entender las interacciones ecológicas, su evolución y adaptación a procesos como el cambio climático. Las técnicas de PR ofrecen herramientas muy potentes para documentar y ampliar nuestro entendimiento de estas dinámicas (Svejkovsky *et al.* 2020). El componente espacial del SMMM, que se basa en técnicas de PR y que cuenta ya con cinco períodos de observación, ha permitido documentar los dos casos de estudio en México que se presentan a continuación.

Durante la operación del SMMM se han registrado varios huracanes que impactaron territorio mexicano. Dos de ellos se destacan por sus características de fuerza y trayectoria en áreas con presencia de manglares: el huracán Willa, que alcanzó la categoría 5 y tocó tierra como categoría 3 el 24 de octubre del 2018 en los límites de Sinaloa y Nayarit, y el huracán Carlotta, que tocó tierra el 16 de junio de 2012 cerca de Puerto Escondido, Oaxaca, como huracán categoría 2. La figura 3.9 muestra las trayectorias de ambos fenómenos.

¹⁰ Para más detalles sobre la escala Saffir-Simpson visitar la siguiente página web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion>

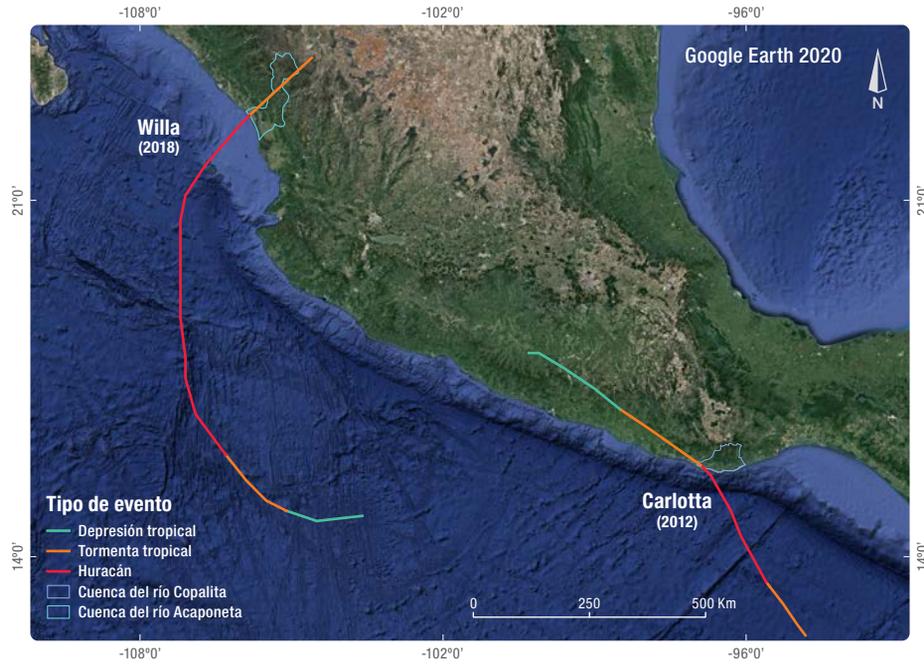


FIGURA 3.9 Trayectorias de los huracanes Willa y Carlotta. MAPA BASE GOOGLE EARTH.

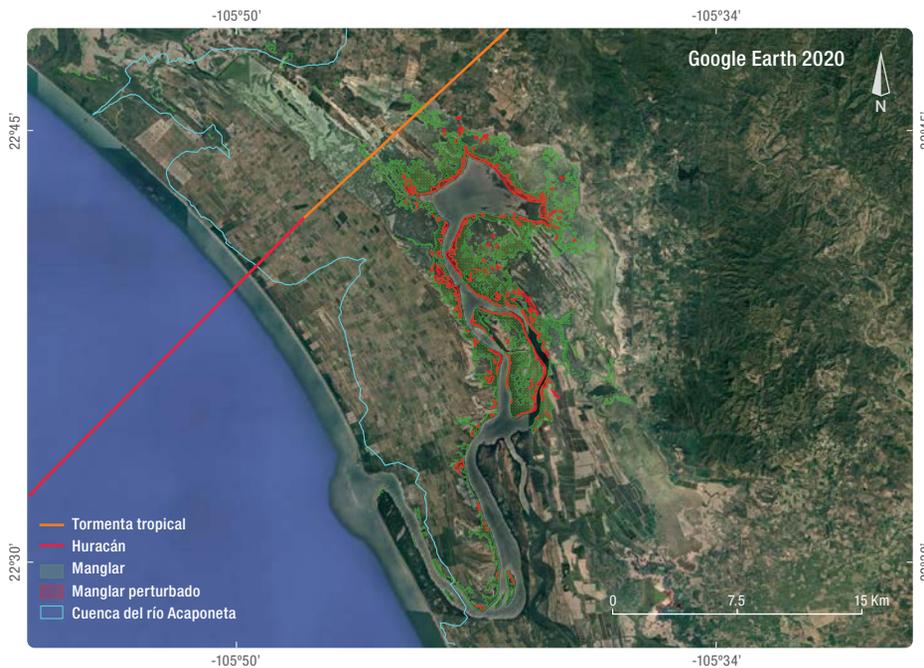


FIGURA 3.10 Zona de manglares afectada por el paso del huracán Willa (2018) identificada en la cartografía 2020 del SMMM. MAPA BASE GOOGLE EARTH.

En el caso de Willa, el más reciente, en el mapa 2020 se identificaron 800 ha de manglar perturbado, que con seguridad son producto del paso del fenómeno, en las inmediaciones de la laguna de Agua Grande, entre Teacapan y Escuinapa, enmarcadas en la cuenca hidrográfica del río Aconeta, en la región hidrológica San Pedro-Presidio (figura 3.10).

Empleando los métodos descritos en el capítulo 2, referentes al uso de GEE para obtener información sobre los cambios fenológicos de la vegetación a lo largo del tiempo, la figura 3.11 muestra el comportamiento en el NDVI en los

años anteriores y posteriores al fenómeno en dos parches del área afectada por Willa. Uno en la zona que se clasificó como *Manglar perturbado* (parte de las 800 ha citadas) (figura 3.11A) y otro en una zona que permaneció como *Manglar* (figura 3.11B) en lugares prácticamente adyacentes.

El impacto de Willa tuvo un efecto inmediato en la vegetación, como sugieren las gráficas A y B de la figura 3.11. Los valores de NDVI posteriores al impacto, en ambos casos, disminuyeron significativamente, indicando fuertes daños en la vegetación; sin embargo, el sitio B se recuperó

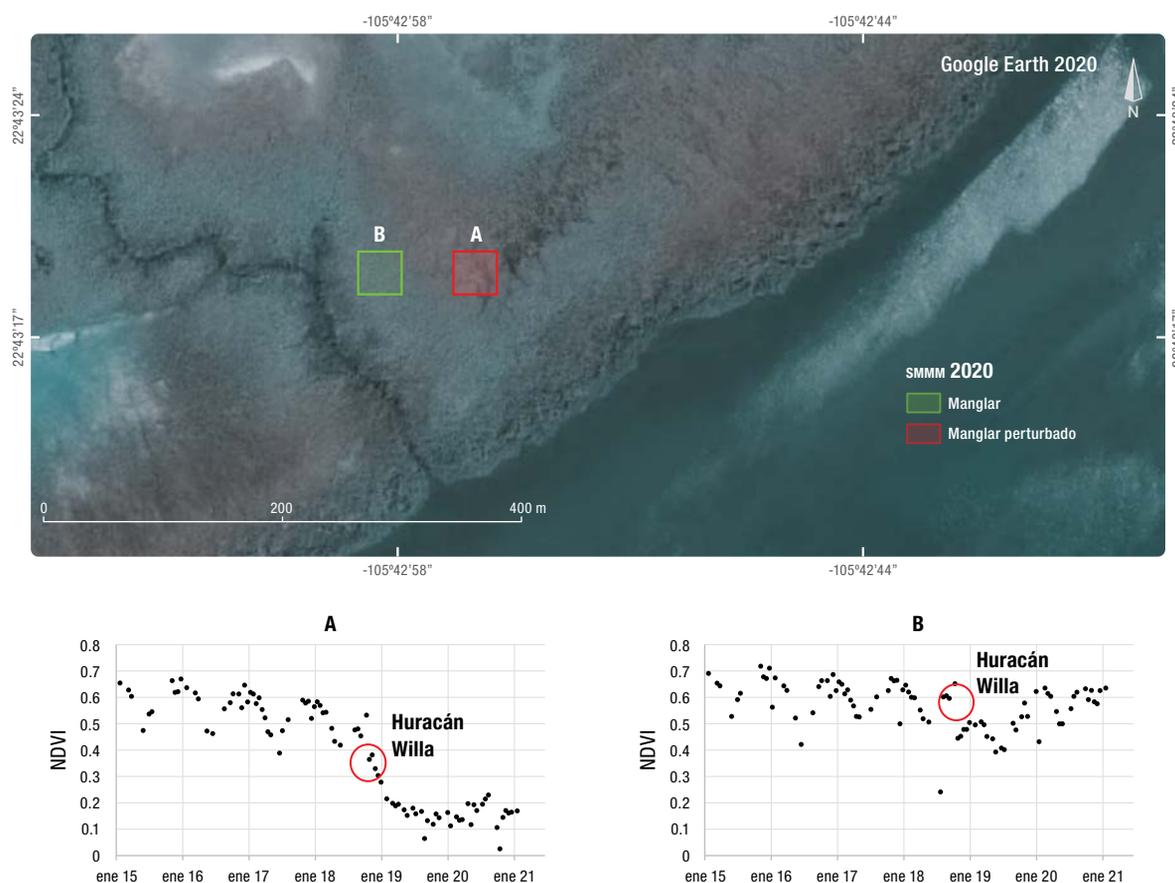


FIGURA 3.11 Comportamiento del NDVI (obtenido a partir de imágenes Landsat 8) en dos sitios de manglar, antes y después del huracán Willa en la laguna de Agua Grande, Sinaloa. MAPA BASE GOOGLE EARTH.

rápida para 2020, mientras que el sitio A permanece, hasta principios de 2021, en condiciones de perturbado a pesar de estar en la misma zona de afectación. Aunque no se dispone de datos de campo para confirmarlo, las áreas que permanecen afectadas parecen corresponder a sitios con dominancia de *A. germinans*; las causas de este fenómeno se desconocen a la fecha, pero pueden estar ligadas a cambios en el balance hídrico que desfavorecen particularmente a esta especie.

Lo anterior concuerda con lo propuesto por Feher y colaboradores (2020), en el sentido de que existen consecuencias en el corto y largo plazo en el ecosistema, siendo las primeras muy evidentes y relativamente fáciles de explicar y las segundas más complejas y enmarcadas en ciclos de tiempo más largos.

En el caso de Carlotta, ocurrido ocho años antes de la elaboración del mapa 2020, se identificó una zona de manglar afectada dentro de la

cuenca hidrográfica del río Copalita, en la región hidrológica Costa de Oaxaca (figura 3.12). Aunque distante a la zona de entrada del huracán a tierra en unos 24 km en línea recta, los eventos asociados al hidrometeoro afectaron gravemente a los manglares en esa región (figura 3.13). En el mapa 2010 del SMMM, el sistema lagunar de La Ventanilla contenía un área continua de *Manglar* de 331.5 ha y dos pequeños parches adyacentes de 21.97 y 4.75 ha para un total de 358.22 ha. Después de su paso, en el mapa de 2015 las áreas de manglar se redujeron a sólo 44.15 y 295.13 ha de *Manglar perturbado*. Para el mapa de 2020, sólo se identificaron 121 ha de manglar en un estado similar al observado en 2010, pero fragmentado, y 26.8 ha de manglar perturbado remanente. El resto de la superficie catalogada como manglar en 2010 ha pasado a ser identificada como *Otros humedales* debido a su alta fragmentación, la sucesión por otras especies hidrófitas y baja densidad de árboles de manglar.

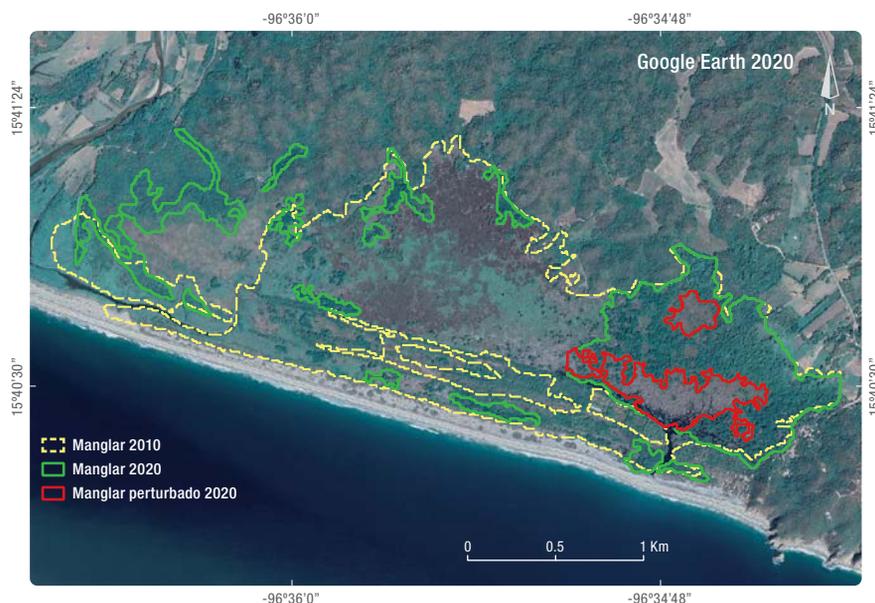


FIGURA 3.12 Cambios en la distribución de manglares entre 2010 y 2020 en La Ventanilla, Oaxaca, zona afectada por el paso del huracán Carlotta.



FIGURA 3.13 Los efectos del huracán Carlotta fueron considerablemente devastadores sobre el arbolado de mayor altura de *R. mangle* en La Ventanilla, Oaxaca. FOTO: C.T.H.

Al observar las trayectorias del NDVI de 2010 a 2020 (figura 3.14), se observa un fenómeno similar al descrito con Willa. Hay parches de manglar que se han recuperado hasta mostrar datos de NDVI similares a los observados en 2010; esto ocurre alrededor del año 2018 y se ha mantenido así a la fecha. Adyacentes a estos parches, persisten zonas de perturbación donde hasta la fecha se aprecian evidencias de arbolado muerto. Aunque los perfiles de NDVI muestran un paulatino incremento en su verdor entre 2014 y 2020, este permanece un 30% debajo de lo observado antes de Carlotta.

Mediante los mapas del SMMM se puede dar seguimiento a nivel regional de la dinámica de recuperación o pérdida de manglares por este tipo de eventos. Sin embargo, para entender a nivel local por qué unas áreas se recuperan mientras otras decaen, lo que ayudaría a los tomadores de decisiones a realizar las actividades más convenientes, se requiere de información

de campo levantada periódicamente durante largos periodos de tiempo.

En este contexto, el SMMM cuenta con algunos datos a nivel local, obtenidos mediante el apoyo a proyectos de monitoreo a largo plazo realizados en dos convocatorias, una en 2007 y otra en 2013 distribuidos en diez estados.¹¹

En el caso del sistema lagunar de La Ventanilla, el proyecto FNo05 “Inventario y monitoreo del estado actual de los bosques de manglar de Chiapas y Oaxaca”, realizado por ECOSUR, Unidad Tapachula, obtuvo entre otros datos información de repoblación de plántulas, que fueron colectados dos veces al año (Tovilla *et al.* 2020), en UM de sitios afectados por el huracán (figura 3.14).

Las condiciones desafiantes del entorno de los manglares y los costos que representa mantener

11 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/estructura-del-manglar>

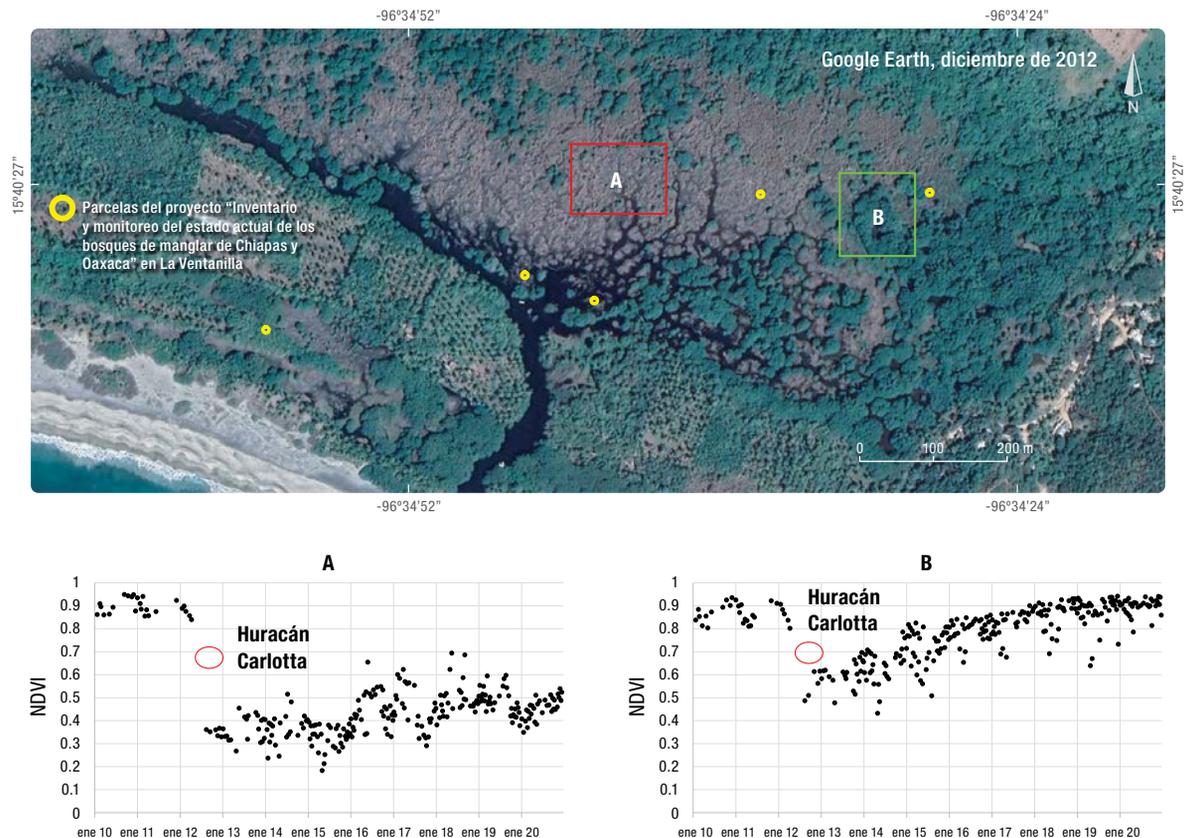


FIGURA 3.14 Comportamiento del ndvi entre 2010 y 2020 en las áreas perturbadas (A) y recuperadas (B) del sistema lagunar de La Ventanilla, Oaxaca, obtenidas a partir de datos Landsat 7 y 8 y ubicación de parcelas de levantamiento de datos del proyecto FN005. MAPA BASE GOOGLE EARTH.

equipos de medición sólo permitieron cubrir dos años de observaciones, que abarcan desde el momento inmediato posterior al evento (noviembre de 2012) hasta el mes de abril de 2014. En el informe final del proyecto¹² se detallan los principales hallazgos y, de acuerdo con estos, *R. mangle* fue la especie más afectada. Tovilla y colaboradores (2020), indican que amplias zonas con bosques mono específicos de esta especie fueron devastados en La Ventanilla, mientras que

en las zonas donde domina *L. racemosa* resistieron mejor y fueron los primeros en recuperarse.

Los datos de estructura colectados en este proyecto mostraron que la velocidad de recuperación varía dependiendo de la intensidad, el grado de afectación en cada sistema lagunar y las condiciones ambientales particulares del sitio, así como la densidad arbórea antes del fenómeno y las condiciones de la dinámica hidrológica y de sedimentos.

Durante el periodo de monitoreo una notable disminución del área basal y densidad en los árboles. Después del huracán el suelo estuvo

12 <http://www.conabio.gob.mx/institucion/cgi-bin/datos2.cgi?Letras=FN&Numero=5>

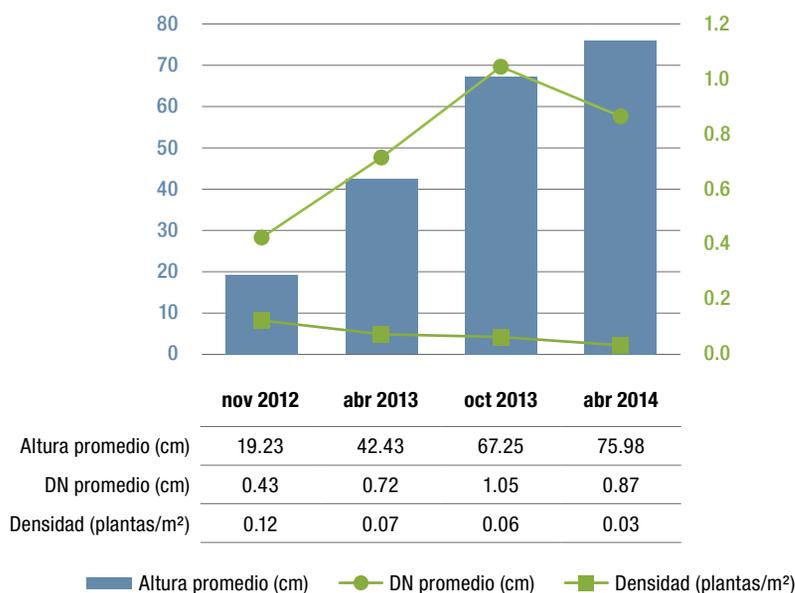


FIGURA 3.15 Dinámica de cambios en la estructura de las parcelas en La Ventanilla después del paso del huracán Carlotta en 2012. DATOS DEL PROYECTO FN005.

cubierto con gran cantidad de árboles y palizada, impidiendo el establecimiento de propágulos y semillas en el suelo.

La figura 3.15 muestra los cambios en los promedios de densidad y estructura de las plántulas hasta dos años después del evento. Cinco meses después del paso del huracán, el sitio de La Ventanilla exhibió una alta densidad de plántulas (noviembre de 2012), propiciada muy probablemente por la apertura del dosel y la disminución de la competencia con los árboles más desarrollados.

En 2016, los pobladores de la zona, con apoyo de la CONAFOR, comenzaron trabajos de desazolve de canales y producción de plantas con el fin de reforestar 39.5 ha con *R. mangle* en las zonas perturbadas. De acuerdo con información pública,¹³ en 2021 el proyecto aún sigue en desarrollo y son los miembros de las comunidades

asociados en cooperativas quienes activamente participan, ya que su economía, basada en parte en el ecoturismo y la pesca, se vio fuertemente impactada por la pérdida y disminución en la calidad de los servicios ecosistémicos que prestaban los manglares en la laguna.

Los casos de Carlotta y Willa muestran que las condiciones locales determinan la forma en la que los manglares se recuperan o se deterioran y evidencia su clara resiliencia frente a eventos hidrometeorológicos. También ilustran la importancia de contar con programas de monitoreo que brinden información certera y oportuna, tanto a nivel local como regional. En un entorno cada vez menos predecible por procesos globales como el cambio climático, contar con información adecuada puede ayudar a los tomadores de decisiones y gente que vive de estos recursos para llevar a cabo proyectos de manejo, conservación y restauración en este ecosistema cuando es necesario.

13 <https://www.gob.mx/conafor/prensa/reforestan-con-126-mil-arboles-de-mangle-rojo-en-oaxaca>

3.4 Uso de RPAS (drones) para la caracterización de manglares

Los RPAS (popularmente conocidos como drones) son sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, a los cuales se les puede agregar uno o más sensores para coleccionar datos. Se utilizan en la percepción remota para obtener material fotográfico y de video con información de posición geográfica asociada (geolocalización); además, los datos pueden ser registrados con cámaras de fotografía tradicional (RGB), multiespectrales, hiperspectrales, infrarrojas, térmicas, radar y LiDAR. Debido a su creciente popularidad y acceso por parte de distintos usuarios, en México se creó una norma para su regulación, la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 (DOF 2019).

Desde 2018, previa capacitación y siguiendo los lineamientos vigentes (SCT 2016; DOF 2019), en el SMMM se han utilizado en diversos temas de manglares dos RPAS micro (Phantom 2 y Mavic Pro) que tienen incorporada una cámara RGB (figura 3.16).

De las primeras experiencias donde el SMMM tuvo disponibilidad de datos obtenidos con RPAS

sobre manglares, fue en el proyecto “Distribución de la especie *Rhizophora mangle* en cinco sitios de la región Pacífico norte”, apoyado por la Fundación David & Lucile Packard a través del FMCN (FMCN 2018). Se realizaron vuelos en sitios con incertidumbre, presencia de manglar *R. mangle* dominante, en otros tipos de vegetación y otras especies de manglar dominante. La información obtenida se empleó para validar los mapas de las clases *R. mangle* dominante y otras especies de manglar dominante, obtenidas a partir de la clasificación de imágenes Landsat 8 y Sentinel-2.

Con el uso de esta herramienta se pudo muestrear una extensa superficie de manglares con menor esfuerzo, además de obtener un registro fotográfico en zonas inaccesibles debido a las características cambiantes del terreno, como son mareas, bancos de sedimento o la densidad de la vegetación. La figura 3.17 presenta dos vistas desde el mismo punto de muestreo, la primera es la vista desde la embarcación y la segunda una vista aérea panorámica; esta última provee mayor contexto del área y se puede observar la vegetación que está por detrás de los primeros metros del manglar observados a nivel de lancha.



FIGURA 3.16 Uso de RPAS por personal de CONABIO en zonas de manglar. FOTÓGRAFO E.V.C.



FIGURA 3.17 Vista de los manglares a nivel de lancha en un punto de Playa Colorada, Sinaloa (A) y vista aérea panorámica del manglar en el mismo punto (B). FOTOS: J.A.A.M.

Durante el trabajo de campo en Marismas Nacionales, Nayarit, se detectaron distintas áreas con presencia de la planta trepadora *Cissus sp.*, llamada comúnmente “tripa de zopilote”, considerada una especie invasora (CONAFOR 2018). Este proceso se identificó previamente en imágenes satelitales donde se observaron diversas zonas con sospecha de afectación en el manglar; en una de estas áreas detectadas se realizó un vuelo sobre un área de 100 x 100 metros y se procesó para obtener un mosaico fotográfico georreferido y un modelo digital de superficie (MDS) generado a partir de las fotografías geolocalizadas. Con estos productos fue posible visualizar dicha área en un entorno 3D (figura 3.18). Una vez observado el posible impacto en el manglar, se solicitó al proyecto financiado por CONABIO LMO19 “Impacto de la variabilidad climática y actividades humanas en la estructura de los manglares de Marismas Nacionales”¹⁴, incluir una unidad de muestreo de manglares con presencia de la tripa de zopilote para su monitoreo durante tres años, con el fin de observar las características de los manglares con presencia de esta planta. La tripa de zopilote desarrolla un manto de lianas

entrelazadas evitando que la luz solar llegue a los árboles de manglar; en caso de no retirarse oportunamente, causa la muerte del árbol (com. pers., Biól. Isaac Castillo, 13 abril de 2018). Cabe mencionar que esta especie ya está registrada por parte de CONAFOR y las estrategias de control incluyen brigadas de limpieza directa en campo (CONAFOR 2018).

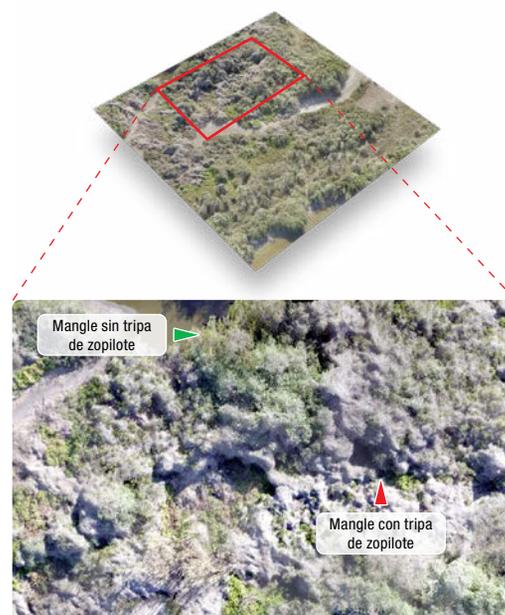


FIGURA 3.18 Vista de mosaico fotográfico georreferido y mds sobre el área de manglares con presencia de tripa de zopilote (*Cissus sp.*).

¹⁴ Proyecto LMO19: <http://www.conabio.gob.mx/institucion/cgi-bin/datos2.cgi?Letras=LM&Numero=19>

Por otra parte, en noviembre de 2018 se realizaron 26 vuelos sobre manglares con distintas alturas y combinación de especies en Laguna de Términos, Campeche, con el objetivo de explorar su utilidad en la evaluación de caracterización del ecosistema, específicamente en la altura de los árboles. Se usó el software *Open Drone Map* para procesar los vuelos y se obtuvo un mosaico fotográfico georreferido, un MDS, un modelo digital del terreno (MDT) y un archivo de nube de puntos para cada vuelo; estos últimos se derivan a través de algoritmos de estructura de movimiento (SfM, por sus siglas en inglés). Durante el proceso, se exploraron diferentes estrategias para mejorar la calidad de los mosaicos georreferidos y la densificación de las nubes de puntos. Con estos resultados, se calculó la altura de los árboles a través del modelo de altura del dosel (MAD), que es la altura residual entre la parte más baja y la parte más alta de los objetos sobre el suelo (figura 3.19). Estos datos,

inferidos a través de las fotografías y los sensores incorporados, permiten caracterizar una parte de los manglares; sin embargo, para realizar mediciones más precisas se requieren equipos RTK (del inglés Real Time Kinematic) y puntos de referencia con registro de coordenadas submétricas, algo que es muy complicado en zonas con vegetación densa, inundadas y con poca accesibilidad.

Los vuelos de RPAS también se han utilizado como referencia para la representación virtual del ecosistema de manglar en una zona localizada en Sian Ka'an, Quintana Roo. Para este proyecto, la superficie modelada se apoyó en una imagen satelital Sentinel-2 (2019) clasificada y en cinco mosaicos fotográficos georreferidos (figura 3.20) para inferir la profundidad de los cuerpos de agua y se integró la vegetación modelada de acuerdo con los mapas clasificados. Este tema se aborda con más detalle en la sección 4.5.

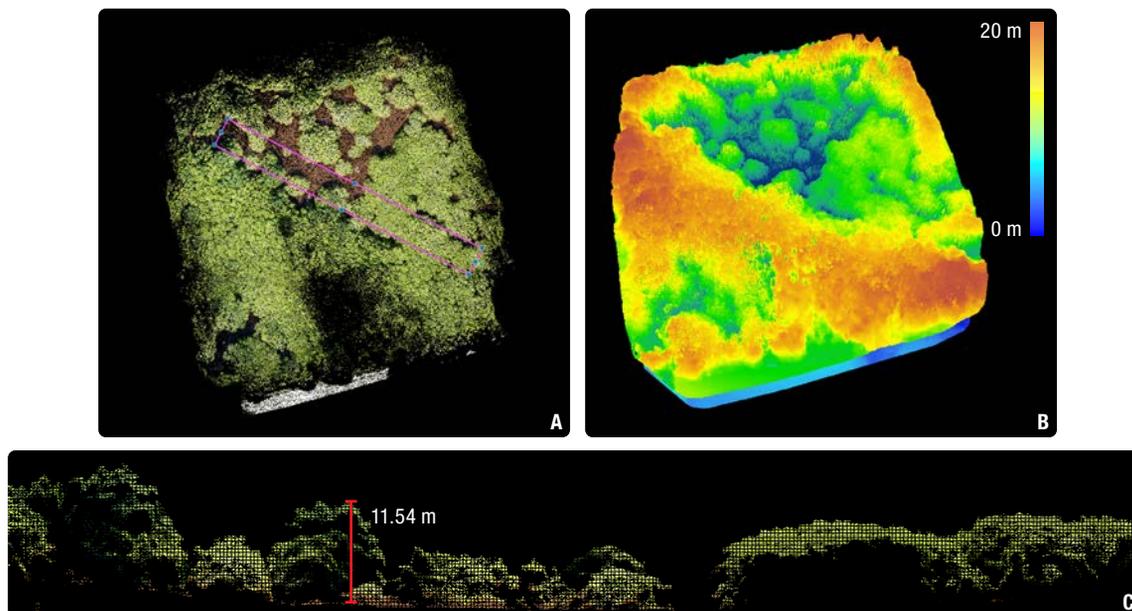


FIGURA 3.19 A) Nube de puntos (RGB), B) Modelo digital de superficie y C) Perfil de altura en un sitio de manglares en Laguna de Términos, Campeche

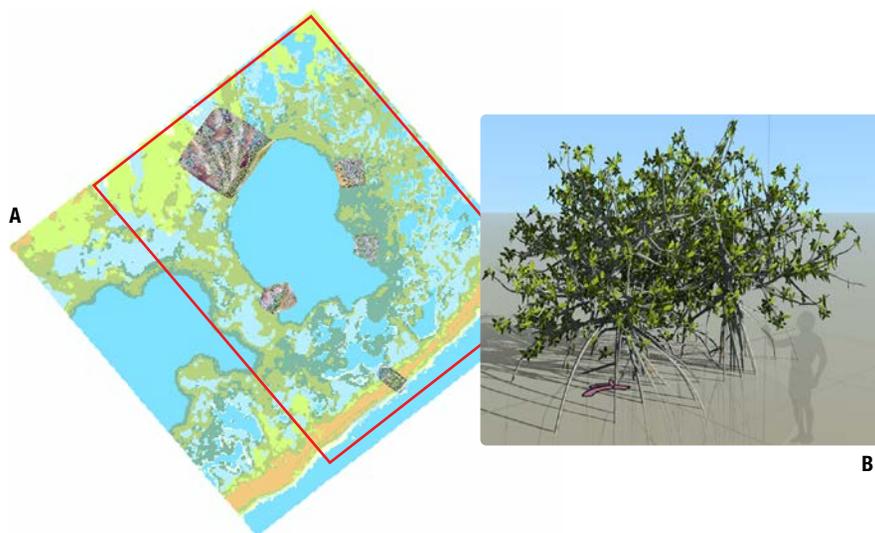


FIGURA 3.20 Mapa de la zona de manglares con ubicación de los mosaicos geolocalizados en Sian Ka'an, Quintana Roo (A) y modelo 3D de *R. mangle* (B).

Por otro lado, con apoyo del FMCN se lleva a cabo la validación de la cartografía 2020 del SMMM, utilizando un RPAS de ala fija con el fin de obtener material fotográfico geolocalizado. Este material se utiliza para evaluar si las clases asignadas en el mapa de manglares coinciden con la vegetación y uso de suelo presentes en la realidad. A partir de este proceso se estimará la exactitud del mapa 2020.

Con estas experiencias en el uso de RPAS se concluye que son herramientas valiosas para abordar y complementar algunos temas del SMMM, proveen la ventaja de cubrir una extensa superficie con menor esfuerzo y los productos que se pueden generar con ellos son útiles en la caracterización del ecosistema de manglar. Sin embargo, es importante reconocer que estas aeronaves tienen limitantes, como son la disponibilidad y autonomía de la batería, el riesgo de una falla en vuelo, la calidad de la cámara incorporada, los vientos, la nubosidad, la precisión de los instrumentos y la radiación solar. Cada uno de estos aspectos influyen en la obtención de material de

calidad y se deben de atender con la capacitación y preparación adecuada. Además, con los ciclos de mareas e inundación en el manglar, se impone el reto de aplicar metodologías para generar cartografía con la suficiente precisión para reducir la incertidumbre en las mediciones, algo que se requiere para obtener cálculos de biomasa y estimaciones alométricas confiables. Aún queda mucho para explorar y aprender sobre tecnologías y avances que se desarrollan alrededor de los RPAS, que seguramente servirán para complementar el conocimiento y monitoreo a mediano y largo plazo del ecosistema de manglar.

3.5 Exploración de imágenes de radar para la caracterización de manglares de un sitio piloto en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas

Desde 2007, los mayores esfuerzos del SMMM en la CONABIO se han enfocado al estudio de la

distribución, extensión y cambios del ecosistema de manglar en México (Acosta-Velásquez y Rodríguez-Zúñiga 2007; CONABIO 2009; Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2013; Valderrama-Landeros *et al.* 2017). Sin embargo, como se menciona en la sección 3.4, es importante ir más allá de la distribución espacial y abordar la estructura y composición de la vegetación para entender y evaluar la modificación del ecosistema de manglar a través del tiempo.

Esto representa todo un reto, pues los bosques de manglar se distribuyen cubriendo regiones con diferentes gradientes ecológicos, dando como resultado comunidades que presentan diferentes características de estructura y composición (Thom 1984; Twilley *et al.* 1998; Duke *et al.* 2001;

Woodroffe 2002; Flores-Verdugo *et al.* 2007) (figura 3.21).

VARIABLES como la distribución, dominancia, densidad de especies, la altura, el Diámetro Normal (DN) o Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y Área Basal (AB) componen atributos ecológicos del ecosistema de manglar. Estas variables se expresan de forma distinta, resultando en diferentes expresiones fisionómicas, procesos ecológicos y funciones asociadas, determinando el uso de diferentes metodologías para su estudio (Cintrón y Schaeffer 1984; Tovilla y Romero 2012). En el SMMM se han explorado algunas de estas metodologías para estudiar las funciones ecológicas de los manglares que se expresan como servicios ecosistémicos; sin embargo, se



FIGURA 3.21 Diferencias estructurales del manglar. Diferentes alturas y copas de *R. mangle* en Laguna de Términos, Campeche (A); *L. racemosa* y *R. mangle* arbustivos en Laguna San Ignacio, Baja California Sur (B); diferentes especies de manglar y otros tipos de vegetación en La Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas (C) y mezcla de especies de manglar en Laguna La Ventosa, Oaxaca (D). FOTOS: (A) J.A.A.M., (B y C) E.V.C., (D) C.T.H.

requieren más estudios que aporten datos en campo para relacionarlos con la información espacial (Rodríguez-Zúñiga *et al.* 2013).

Una de las lecciones aprendidas en estas exploraciones ha sido que la caracterización de la estructura y la composición de los manglares es necesaria en el monitoreo de este ecosistema. Desde un enfoque espacial, la caracterización es un insumo básico para la estimación de biomasa aérea y es considerada información importante para el estudio y conservación de los manglares.

En este contexto, la información de imágenes radar ha sido utilizada para el mapeo de las características estructurales y de composición de la vegetación. Los satélites con sensores radar utilizan ondas de radio para medir la distancia que existe entre el satélite y el objeto de interés por medio de la emisión de un *pulso* de energía y recibiendo un eco denominado retrodispersión que es la fracción de energía transmitida y reflejada nuevamente al sensor radar (figura 3.22A). En este tipo de sensores una característica muy importante es la polarización, que se refiere a la orientación de la transmisión y recepción de onda. Estos pulsos pueden enviarse de forma horizontal (H) o vertical (V). Si un pulso es transmitido de forma H y recibido de la misma forma es una polarización HH, mientras que si es recibido de manera vertical se trata de una polarización VH; esto aplica para todas las posibles combinaciones (figura 3.22B).

En los últimos años, las imágenes Sentinel-1 han recibido particular atención para el monitoreo y evaluación de coberturas de vegetación (Proisy *et al.* 2001; Held *et al.* 2010; Domínguez-Cadena *et al.* 2016; Fonteh *et al.* 2016; Castillo *et al.* 2017; Argamosa *et al.* 2018). Las ondas que emiten los sensores de Sentinel-1 pertenecen a la banda C, que tiene una penetración menor que el resto de los sensores radar, lo que significa que la retrodispersión capturada de una

cobertura boscosa corresponde principalmente a la parte superior del dosel (figura 3.22C). Esto implica que sólo se pueden estudiar algunos aspectos de la estructura forestal con esta banda, como patrones de copa, áreas de copa y densidad arbórea. Sin embargo, otras características como la disponibilidad de una mayor colección de imágenes durante el año y un menor tamaño de pixel ofrecen un potencial alto para el análisis y monitoreo de la estructura, composición y dinámica forestal.

Estas imágenes, a diferencia de las ópticas, son más complejas de interpretar porque miden la distancia de los objetos e intensidad de la reflectividad en función de pulsos, características que el ojo humano no es capaz de distinguir.

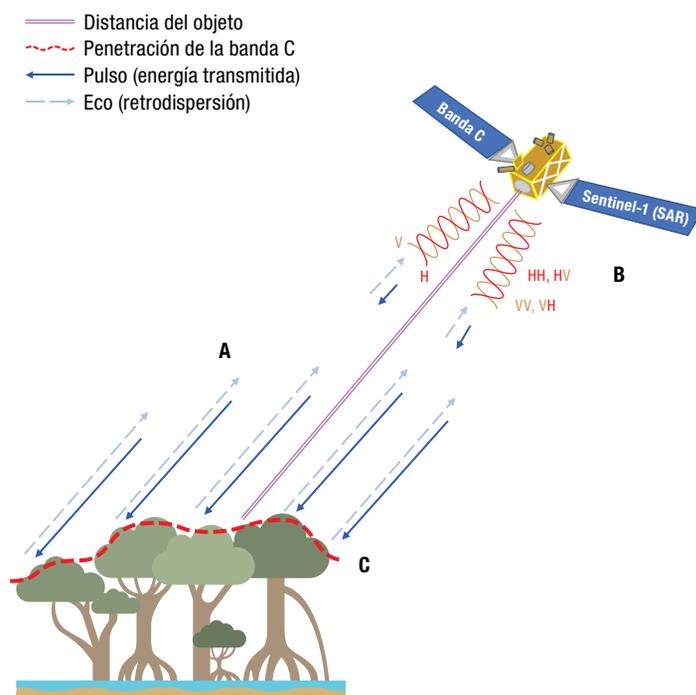


FIGURA 3.22 Principios básicos de los sensores radar (tomando como ejemplo Sentinel-1) y su interacción con elementos de la superficie terrestre, en este caso los árboles de manglar. Retrodispersión (A), polarización (B) y retrodispersión capturada en el dosel (C).

Aunado a esto, la naturaleza de las imágenes contiene un ruido visual intrínseco (*speckle*), para poder trabajarlas es necesario eliminar este ruido que se expresa en un efecto de “sal y pimienta”. Si se elimina el ruido, aumenta el contraste y se modifican benéficamente las características espaciales (Saevarsson *et al.* 2004).

Para eliminar el ruido existen filtros que disminuyen los efectos antes mencionados. Los filtros suprimen o disminuyen en lo posible el *speckle* en la imagen. Con Sentinel-1¹⁵ se pueden tener varias imágenes en periodos cortos sobre un mismo lugar (hasta cuatro imágenes al mes), lo que favorece el uso de filtros multitemporales que permiten reducir el *speckle* sin mayor pérdida de detalle en la imagen. El resultado es una imagen con rasgos más identificables o interpretables (figura 3.23B).

Con la finalidad de investigar en el SMMM el uso de estas imágenes de radar en la caracterización de manglares, se realizó un ejercicio de exploración en un sitio piloto, ya que se contaba con datos de estructura de manglar, resultado del proyecto FNoo5 “Inventario y monitoreo del estado actual de los bosques de manglar de Chiapas y Oaxaca”¹⁶, desarrollado por ECOSUR, Unidad Tapachula.

El sitio piloto es una zona con lagunas costeras, humedales costeros, selvas inundables y zapotonales (*Pachira acuatica*), pero la mayor parte está cubierta por manglares y ofrece una diversidad estructural con diferentes composiciones. La zona se encuentra en la región de

15 Constelación de la ESA para obtener datos de radar en la polarización VV o HH y para VV+VH y HH+HV. Para más información consultar el siguiente enlace: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

16 El informe final y los resultados del proyecto se pueden consultar a través del siguiente enlace: <http://www.conabio.gob.mx/institucion/cgi-bin/datos2.cgi?Letras=FN&Numero=5>

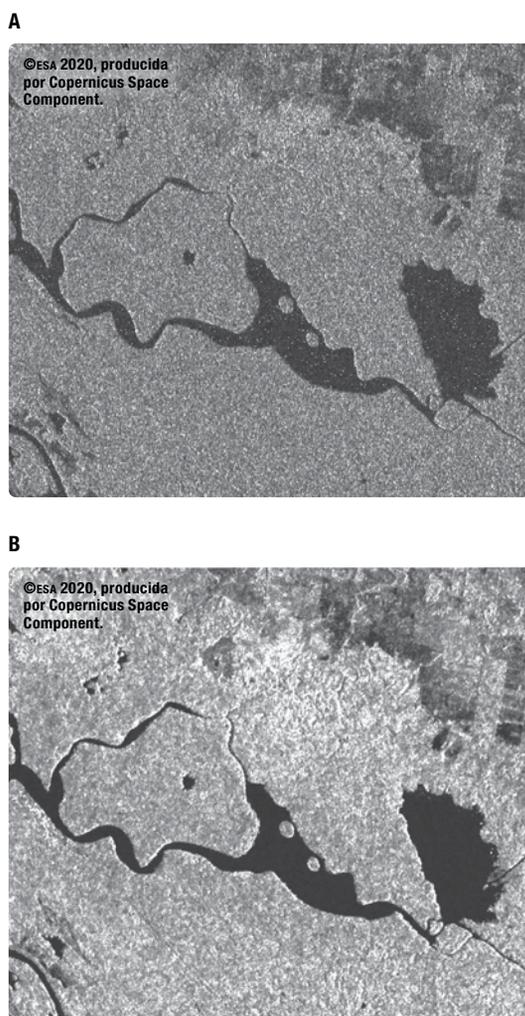


FIGURA 3.23 Imagen de radar Sentinel-1 antes (A) y después de un filtrado del ruido (*speckle*) (B).

Panzacola, cerca de la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera La Encrucijada, un ANP en el estado de Chiapas (figura 3.24).

El esquema metodológico se resume en tres etapas: a) preprocesamiento, que incluyó la selección de imágenes, la corrección geométrica y el apilamiento de todas las imágenes por cada polarización; b) procesamiento, donde se aplicaron los filtros multitemporales nativos del

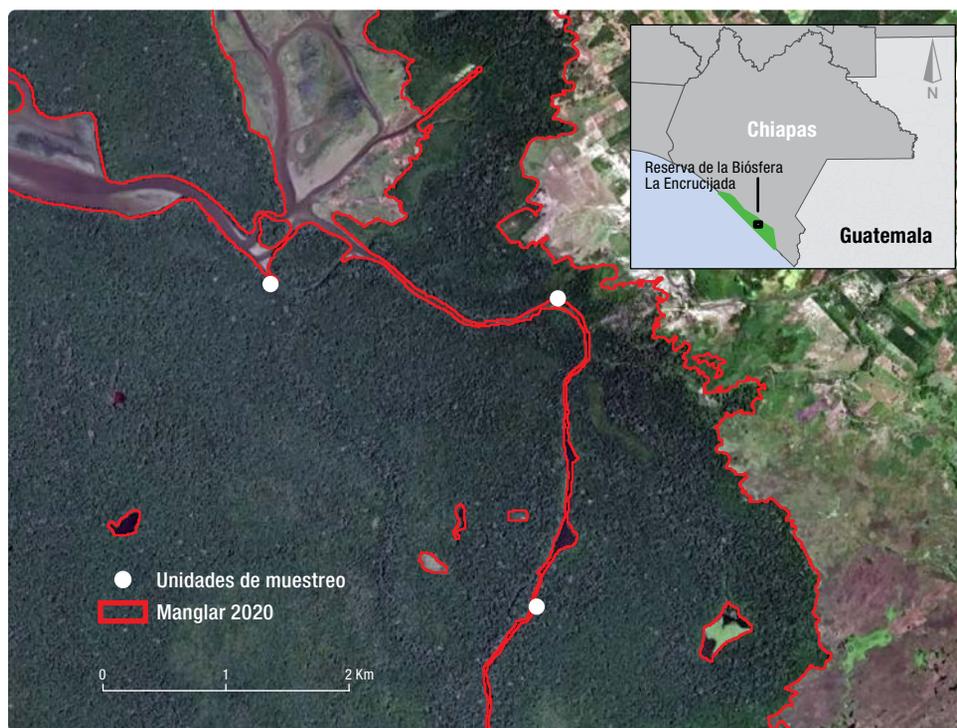


FIGURA 3.24 Sitio piloto en la Reserva de la Biósfera La Encrucijada, Chiapas. MAPA BASE GOOGLE EARTH.

programa SNAP (*Gamma Map*, *IDAN*, *Lee*, *Lee Sigma* y *Refined Lee*) y se analizó visual y estadísticamente su eficiencia; y c) clasificación supervisada de las imágenes, utilizando los datos de estructura colectados en campo.

El mejor desempeño se presentó con los filtros *IDAN*, *Lee* y *Lee Sigma*, pero los mejores resultados no corresponden a un único filtro, sino que fluctúan entre estos tres.

Como se mencionó, la banda C de Sentinel-1 ($\lambda = 3.8\text{-}7.5\text{ cm}$) penetra hasta aproximadamente 5 cm en el dosel, representando solamente parte de la cobertura y estructura del bosque. Por esta razón, sólo se utilizan variables (datos de campo en las UM) acordes a esta porción del dosel y a cobertura como AB, área de copa y densidad. Para que los patrones hallados en una

clasificación de una imagen de radar correspondan a condiciones medibles de las tres variables, se requiere de datos de campo. Hay que considerar también que factores como la humedad pueden influir en los valores de retrodispersión registrados. Pese a estas consideraciones, los objetos hallados al clasificar una imagen de datos de retrodispersión pueden dar una idea de la composición estructural de la vegetación a escalas locales y regionales.

En la figura 3.25 se observa una porción de una imagen de radar filtrada y su clasificación con datos de estructura asociados a los valores de retrodispersión. El resultado permite diferenciar tamaños de copa separados en cinco clases, así como otro tipo de coberturas identificadas.

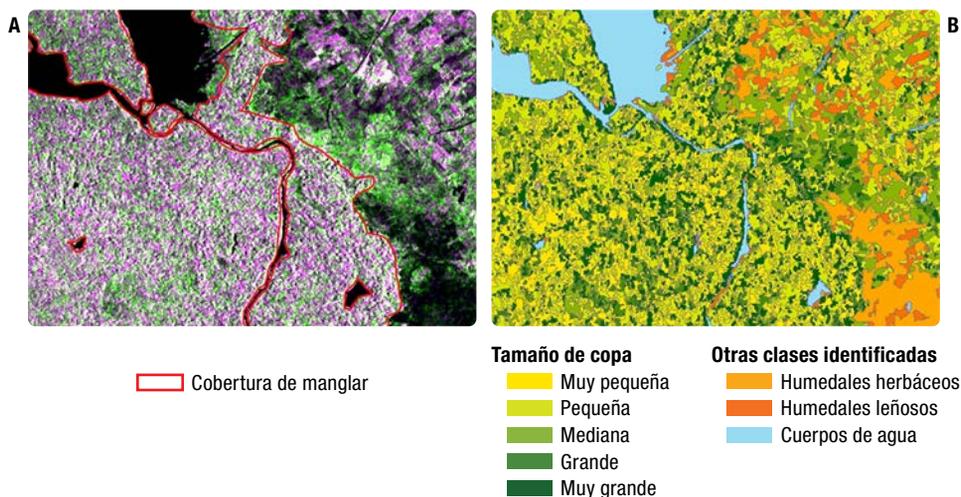


FIGURA 3.25 Sitio piloto en la zona de Panzacola, en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada, Chiapas. Se observa la imagen de radar filtrada mostrando la cobertura de manglar (A) y la clasificación preliminar con las categorías del tamaño de copa (B).

Esta exploración del uso de imágenes radar en la caracterización de los manglares permitió seleccionar el mejor filtro de ruido adecuado para este ecosistema, ya que uno de los grandes problemas en el uso de radar es la selección del algoritmo de supresión de ruido. Este resultado se considera fundamental para estudios posteriores, porque permitirá disminuir la incertidumbre en la clasificación, ya que el manglar posee variables específicas de suelo, inundación, estructura y composición que no necesariamente son comparables con otros ecosistemas.

Adicionalmente, se han hecho ejercicios en sitios de otras regiones del país con diferentes condiciones de manglar y los resultados muestran tendencias similares. Esto fortalece la metodología, en función de que puede ser aplicada a otros sitios de manglar. Los mapas resultantes son útiles como insumo en la evaluación de biomasa aérea, ya que pueden reducir el sesgo en el uso de ecuaciones dasométricas para el cálculo de biomasa (Yepes *et al.* 2016; Cifuentes *et al.* 2018; Agraz-Hernández *et al.* 2020). Sin

embargo, es necesario seguir utilizando otras variables en las bases de datos de campo como la altura, el DN, el AB, los datos de composición de especies, además de información de productividad como hojarasca y contenidos de carbono.

Es importante continuar con el monitoreo de la caracterización de los manglares y especialmente con los datos que brindan las imágenes radar Sentinel-1, pues muestra el comportamiento de los cambios en los patrones de estructura y composición, que explican cambios en el paisaje a través del tiempo con datos de libre acceso.

3.6 Conectividad estructural de humedales costeros: Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche

De acuerdo con Silva *et al.* (2014), la zona costera es la franja localizada entre el mar abierto y la superficie terrestre, que cambia constantemente por la actividad entre procesos terrestres,

marinos y atmosféricos. Comprende los ecosistemas terrestres y adyacentes influenciados por el mar a través de procesos hidrológicos como el flujo de agua y de energía y el arrastre de nutrientes a los ecosistemas marinos condicionados por su proximidad.

Del mar hacia tierra adentro se pueden establecer arrecifes y praderas de pastos marinos, playas/dunas, lagunas costeras y manglares, selvas inundables, popales y tulares, así como lagunas de agua dulce (López-Portillo y Ezcurra 2002; Moreno-Casasola 2020). Dentro de este contexto, los humedales costeros son comunidades vegetales de transición entre la tierra y el mar que dependen de inundación recurrente, los influyen gradientes de inundación y de salinidad que permiten el desarrollo de diversos tipos de vegetación adaptada a estas condiciones.

El creciente interés por la ecología del paisaje está fuertemente relacionado con la urgente necesidad de entender cómo cambia la heterogeneidad espacial de los ecosistemas y cómo responden las especies y sus procesos ecológicos a los cambios ambientales contemporáneos (Arroyo-Rodríguez *et al.* 2017). En este sentido, la conectividad del paisaje, como parte de la ecología del paisaje, juega un papel trascendental para la conservación de los ecosistemas.

De forma general, la conectividad es definida como el grado en el cual el paisaje facilita o impide el movimiento de la biota entre fragmentos de hábitat, resultado de la interacción entre procesos de comportamiento como movimiento, reproducción y forrajeo y la estructura física del paisaje (Saura y Pascual-Hortal 2007; Hernández-Arana *et al.* 2015; Alonso-F. *et al.* 2017).

Las interacciones de los manglares con los demás humedales costeros tienen una relevancia primordial desde un punto de vista ecológico, biológico-pesquero e hidrológico. El grado de interacción, y por lo tanto la importancia de

la conectividad entre estos ecosistemas, está en función de la comunicación de los manglares con el mar, la dinámica de las corrientes y la distancia entre estos ecosistemas. Esta interacción se refleja, entre otros aspectos, por la materia orgánica producida en el manglar que se exporta a la zona de pastos marinos y arrecifes de coral, así como la presencia de organismos que realizan alguna etapa de su ciclo de vida en los manglares y luego migran hacia las otras comunidades (Agraz-Hernández *et al.* 2006) (figura 3.26).

Existen dos tipos de conectividad del paisaje: la estructural y la funcional. La conectividad estructural mide la conexión espacial en el paisaje de los nodos (parches de hábitat) que pueden ser de uno o varios tipos de hábitat. La conectividad funcional está orientada a los organismos, es decir, revela los movimientos conductuales de los individuos de las diferentes especies ante la estructura física del paisaje, en la cual también influyen los requisitos de hábitat de las especies, los rangos hogareños y sus tolerancias a los hábitats por donde se mueven durante sus diferentes etapas, todo esto desde la perspectiva del organismo (Zetterberg 2011; Alonso-F. *et al.* 2017).

La más clara evidencia de la conectividad funcional entre humedales costeros es la existente entre las lagunas costeras, los manglares y la zona marina en relación con los recursos pesqueros. Los juveniles de crustáceos, peces y moluscos se alimentan y crecen en los complejos lagunares estuarinos, incluyendo manglares, para posteriormente emigrar a la zona marina adyacente a reproducirse y desovar. Un ejemplo se presenta en el Caribe mexicano, ya que la etapa juvenil de las langostas (*Panulirus argus*) transcurre entre manglares y pastos marinos, mientras que su etapa adulta se desarrolla en la barrera de coral (Agraz-Hernández *et al.* 2006) (figura 3.27).



FIGURA 3.26 Vista aérea de la transición entre manglares y pastos marinos, una zona de alta interacción y conectividad en Calkiní, Campeche. FOTO: J.D.

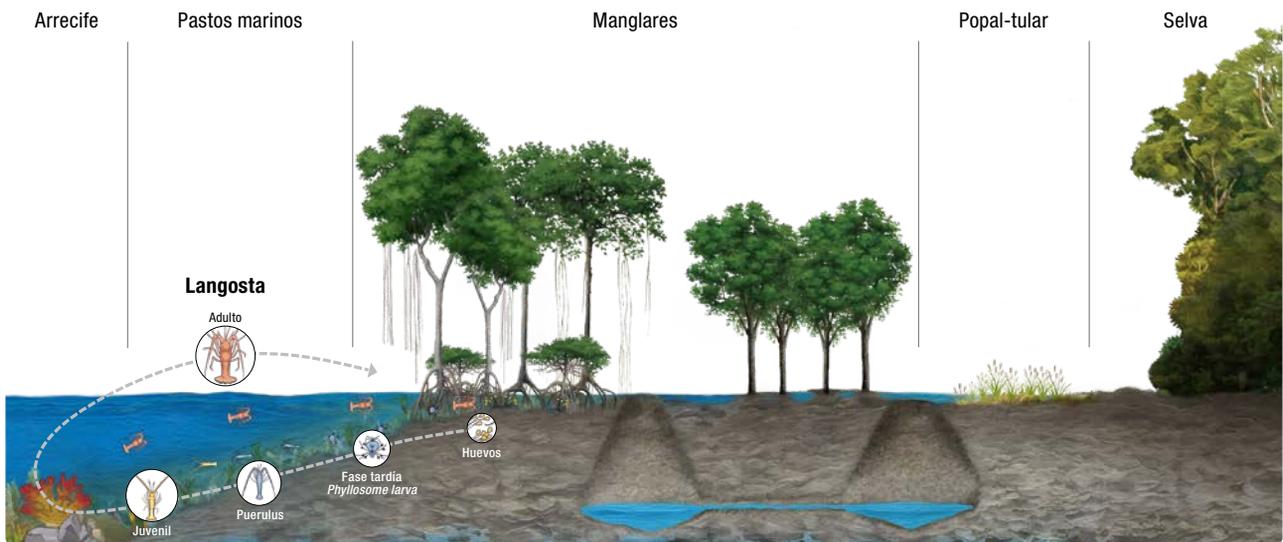


FIGURA 3.27 Representación de la conectividad estructural en ecosistemas costeros (los componentes pueden variar de acuerdo con la región) y su relación con la conectividad funcional para la langosta (*P. argus*).

Para explorar la conectividad estructural de los humedales costeros se eligió un sitio en la Reserva de la Biosfera Los Petenes (RBLP). Considerado sitio prioritario Ramsar, pertenece a los municipios de Calkiní, Hecelchakán, Tenabo y

Campeche, posee características estructurales y de biodiversidad relevantes, así como una amplia superficie de cobertura terrestre y marina. La característica más notable de la RBLP es la presencia de islas de vegetación arbolada (manglar o

selva) conocidos como petenes, inmersos en una matriz de vegetación herbácea, de manglar disperso o de selva estructuralmente más baja, generalmente asociadas a un afloramiento de agua dulce o al relieve. Los principales tipos de vegetación terrestre en la RBLP son manglares (35%) y petenes (19%). En cuanto a la vegetación acuática marina, la mayor parte corresponde a vegetación acuática sumergida (VAS) (83%), compuesta por pastos marinos (PM) de nombre común hierba de tortuga (*Thalassia testudinum*), hierba de manatí (*Syringodium filiforme*) y diversidad de macroalgas verdes, rojas y cafés (CONANP 2006). El manto freático es superficial y aflora en forma de ojos de agua o manantiales debido al origen cárstico de la península de Yucatán (Muñoz-Rojas *et al.* 2013).

El objetivo de este caso de estudio fue analizar la conectividad estructural presente en la RBLP entre las comunidades de pastos marinos y la franja costera de manglar por medio de métricas del paisaje, con miras a conocer posteriormente su papel en la conectividad funcional de algunas poblaciones de peces de importancia para la zona.

El área de estudio para analizar la conectividad estructural fue de 153 924 ha (54% de la RBLP), para lo cual se utilizó el mapa de coberturas de manglares 2015 del SMMM y las coberturas de PM y VAS del año 2018 (CONABIO 2016; Pérez-Espinosa *et al.* 2019).

Se trabajó con un área mínima de parches de 400 m² debido a que el tamaño de pixel de los mapas de PM y VAS corresponde a un tamaño de 20 x 20 m (resultado de las clasificaciones con la resolución original de algunas bandas de las imágenes Sentinel-2) y una escala de observación regional 1:50 000. De la parte terrestre se consideraron 500 m de manglar de franja lo que abarcó un área de 3 821 ha, asumiendo que es el área que ocupan diversas especies de peces, principalmente en su etapa juvenil, para

transitar entre ecosistemas; de la parte marina se consideraron 150 103 ha. Se establecieron cinco clases de coberturas con distintas comunidades de humedal (cuadro 3.2) y se tomaron en cuenta categorías de cobertura de 10 a 30%, de 31 a 70% y de 71 a 100% (figura 3.28A).

CUADRO 3.2 Clasificación considerada para el análisis de la conectividad estructural.

Clase	Nombre de la clase de humedal	Abreviatura
1	Mixta <i>R. mangle</i> y <i>L. racemosa</i>	MxRm-Lr
2	<i>Thalassia testudinum</i>	Tt
3	<i>Syringodium filiforme</i>	Sf
4	Mixta Tt y Sf y/o <i>Halodule wrightii</i> (Hw) y macroalgas	MxPMA
5	Mixta Tt y Sf y/o Hw	MxPP

Se obtuvo el número de parches del paisaje para cada clase y los resultados mostraron que la clase con mayor número fue vegetación **MxP-Ma** y la que tuvo un menor número fue **MxRm-Lr** de franja.

También se obtuvo el Índice Integral de Conectividad (IIC) propuesto por Saura y Pascual-Hortal (2007) con el programa Conefor.¹⁷ El IIC es una métrica del paisaje que integra la extensión del hábitat y la conectividad entre parches de hábitat. Para este índice se calcularon las distancias euclidianas o conexiones de borde a borde a 500, 1 000 y 2 000 m entre parches, para reconocer aquellos parches con el menor tamaño y la mayor densidad de borde e indicar el patrón de aislamiento entre parches a medida que disminuye la distancia. Se consideró que esas distancias representan el movimiento de los peces y pueden servir de referencia para explorar un modelo de conectividad funcional.

¹⁷ <http://www.conefor.org/coneforsensinode.html>

Se establecieron las siguientes categorías en función del cálculo del IIC: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (figura 3.28B). La mayor parte de los parches resultó con valores de importancia medios a muy altos para la conectividad del paisaje. Los resultados también mostraron que los parches no se encuentran separados a más de mil metros entre ellos y que la distancia umbral máxima son 500 m, razón por la cual no se ha encontrado un indicador que refleje una fragmentación en el paisaje, por el contrario, los datos reflejan un patrón estructural natural que forman en conjunto los manglares, los pastos marinos y las macroalgas como respuesta a redes de interacción de mayor complejidad. La densidad del borde es alta para la clase **MxPMA**, lo que se refleja en una mayor área promedio de complejidad estructural del parche.

Se formaron cinco grupos principales de nodos denominados como componentes del paisaje de los humedales en la RBLP (figura 3.28C). Es decir, un conjunto de parches que son considerados un solo nodo de mayor tamaño. La franja de **MxRm-Lr**, la clase monoespecífica de **Tt** y la clase de **Sf** funcionan como barreras a los pastos marinos y macroalgas, rodeándolos en un solo componente.

En resumen, el IIC mostró que los humedales de la RBLP se encuentran altamente conectados; cada nodo representa en sí mismo un espacio en donde ya existe conectividad. La clase **MxPMA** y la franja de **MxRm-Lr** conforman un solo componente (Grupo 1) con alta conectividad estructural considerando que estas clases las encontramos a lo largo de toda la costa somera con dos a cuatro metros de profundidad, en las zonas con mayor heterogeneidad del paisaje. La clase **Tt** ubicada de forma paralela a la costa, cercana a la ciudad de Campeche (Grupo 2), protege al Grupo 1 amortiguando las descargas de agua de la ciudad. Por otra parte, la franja de **Sf** conforma otro componente del paisaje (Grupo 3) con muy

alta conectividad e igualmente importante para el funcionamiento en conjunto protegiendo a modo de barrera al Grupo 1. El Grupo 4 coincide con valores medios de conectividad estructural, probablemente por las salidas de agua cercanas que modifican las condiciones ambientales, lo que se refleja en la vegetación esparcida. No obstante, este Grupo 4 funge como escalón, conectando a los Grupos 1 y 2. Finalmente, el Grupo 5 presentó muy bajo IIC, lo que indica probablemente susceptibilidad a perderse en mediano o largo plazo por encontrarse en las áreas más profundas de la reserva y con mayor exposición a los efectos de las corrientes marinas.

Los patrones de crecimiento de franjas paralelas a la costa representan una estrategia de crecimiento en función de los movimientos con la fauna e interacciones oceanográficas. La identificación de estas franjas de paisajes de humedal extendidas paralelamente a la zona costera implica funciones específicas y al mismo tiempo funciones en conjunto. Berkström *et al.* (2020) mencionan que los patrones de crecimiento en forma de franjas podrían indicar la función de corredor biológico de la fauna que transita en ellas en busca de alimento. Por ser heterogéneas, en todos los sentidos, estas franjas se consideran con mayor disponibilidad de alimento. En el caso estudiado, continúan hasta las zonas costeras de Yucatán.

La integración de la cartografía generada por la CONABIO, tanto de manglar de franja como la de pastos marinos en este caso de estudio, permitió reconocer que en las zonas próximas donde se une el manglar a los pastos marinos es un paisaje continuo, sin una frontera física que disminuya la conectividad estructural entre ambos ecosistemas.

Con base en los resultados y en la revisión bibliográfica, se concluye que prácticamente toda la RBLP es un espacio de redes de interacción multijerárquicas que permiten que los ciclos de

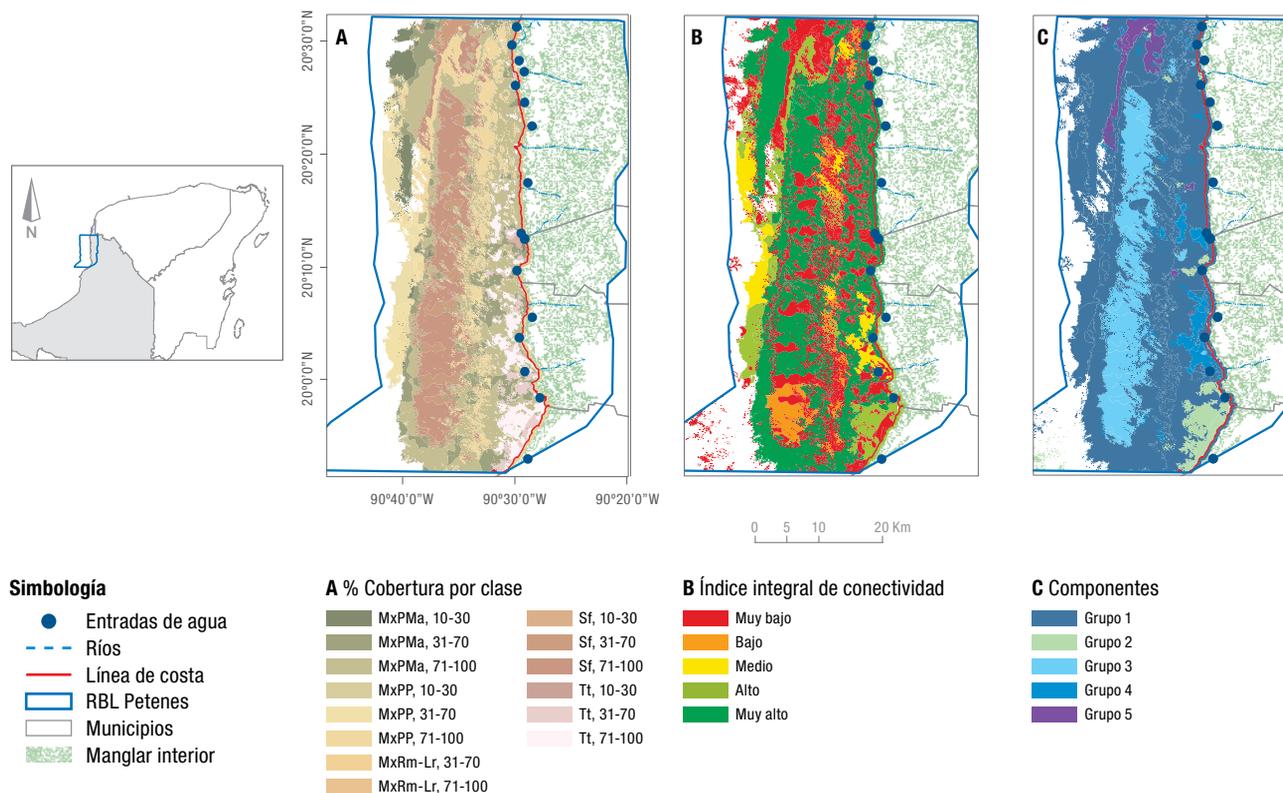


FIGURA 3.28 Porcentajes de cobertura por clase (A). Índice integral de conectividad (IIC) (B). Componentes del paisaje de los humedales de la RBLP (C).

vida de múltiples especies se lleven a cabo. El Grupo 1 conformado por la franja de *MxRm-Lr* y *MxPMa* es un corredor biológico prioritario para la conservación, por lo que se debe monitorear su conectividad.

Por otra parte, cabe mencionar que en el futuro este tipo de análisis podría complementarse considerando rangos mayores a 500 m de inundación de manglar de franja y actualizarlo con los datos 2020 del SMMM.

Uno de los siguientes pasos que plantea este estudio es el análisis de la conectividad funcional con especies de peces que permita regionalizar áreas de aprovechamiento y manejo para la conservación de los servicios ecosistémicos y fauna como base para formular un ordenamiento

territorial marino dentro de la RBLP. Para establecerlo, se desarrolló un taller con especialistas que aunado a la revisión de literatura reciente sobre RBLP, permitirán establecer las bases de la conectividad funcional multiespecie con peces y posiblemente algunos invertebrados.

De este modo, los datos generados en el SMMM, específicamente para este caso la cartografía de manglares, demuestran su utilidad para analizar el funcionamiento del ecosistema como una unidad que forma parte de un paisaje más complejo que involucra múltiples procesos ecológicos. Por lo tanto, la conservación de los manglares y otros humedales adyacentes como pastos marinos y las macroalgas, juegan un papel relevante en las acciones de conservación.



Deforestación de manglar en Chiquilá, Quintana Roo.
FOTO: A.H.S.C. CONABIO-SEMAR

DISPONIBILIDAD DE LOS DATOS DEL SMMM EN LA WEB Y GEOVISUALIZACIÓN

Todos los datos generados por el SMMM y presentados en esta obra son públicos para su consulta por cualquier ciudadano. Desde el inicio del SMMM en 2005, uno de los objetivos más relevantes ha sido poner a disposición del público la información generada, para favorecer la adecuada toma de decisiones en distintos ámbitos.

A continuación se exponen las diferentes plataformas en donde se encuentran publicados estos datos y resultados. Adicionalmente se presenta una herramienta de realidad virtual (RV) que se encuentra en desarrollo. Estas plataformas van dirigidas a diferentes usuarios, desde el público en general hasta los usuarios que tienen conocimientos avanzados en el manejo de datos espaciales; en ellas se pone a disposición la información en distintos niveles sobre manglares de nuestro país,

ya sea como punto de partida para posteriores investigaciones o para fomentar la concientización y divulgación al público general y tomadores de decisiones. De esta forma se pretende hacer partícipes a los ciudadanos sobre el conocimiento de nuestro capital natural, bajo la premisa de que “no podemos cuidar lo que no conocemos”.

4.1 Página web

La información que se genera en el SMMM ha encontrado cabida dentro de la estructura y recursos de la página web de la CONABIO¹⁸ en la liga:

<https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/>

¹⁸ <https://www.biodiversidad.gob.mx>



FIGURA 4.1 Componentes del SMMM y su consulta a través de la página web.

Este sitio es uno de los principales mecanismos para distribuir los datos del SMMM, aunque también se puede obtener información más general sobre las especies de manglar y otros aspectos en el apartado *Ecosistemas*.

Actualmente, la información del sitio se encuentra organizada con base en la estructura de los componentes que conforman el SMMM y que se han descrito en la sección 1.2 (figura 4.1); cuando existen productos cartográficos u otros resultados específicos relacionados se indican los repositorios para su consulta, como se verá en las siguientes secciones.

Distribución espacial de los manglares: En este apartado se presentan las estadísticas nacionales y estatales de la superficie de manglar, así como las tasas de cambio en cada una de las fechas evaluadas. Esta información es la base espacial sobre la cual se realizan muchos de los análisis de monitoreo del sistema.

Caracterización de los manglares: Se exponen los diversos aspectos que se trabajan en el SMMM ligados a la caracterización de los manglares mexicanos. Esto incluye los 81 *Sitios prioritarios de relevancia biológica o con necesidades de rehabilitación ecológica*, protección, grado de perturbación, fragmentación, conectividad y amenazas, así como su caracterización a nivel estructural, abarcando la distribución de especies (*R. mangle*), los aspectos ambientales (productividad, variables fisicoquímicas del agua y del sustrato, etc.) y cuestiones de genética. En este componente también se evalúa la dinámica de costa asociada a las áreas de manglar y la regionalización del ecosistema.

Dimensión social: Por el momento se proporciona la evaluación a través del tiempo de los índices de antropización y amenazas,¹⁹ así como efectos de la política pública en el

ecosistema,²⁰ que nos permiten identificar los principales agentes de transformación.

Colaboración: Aquí se comparte la información del Directorio de Especialistas, la colaboración que se ha tenido con diversas instituciones y los resultados de diversas reuniones y talleres; además, se proporciona información del Comité Mexicano de Manglares, con el cual se mantiene estrecha colaboración.

Adicionalmente a estos apartados, se incluye información sobre *Convocatorias* para financiamiento a proyectos y un apartado con *Material de apoyo* que pone a disposición del público las publicaciones científicas y de divulgación que se han generado en el SMMM (figura 4.2), así como ilustraciones científicas de las especies de manglar, videos y eventos relacionados con los manglares mexicanos.



FIGURA 4.2 Parte de las publicaciones del SMMM que pueden ser descargadas del sitio web.

19 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/indices-antropizacion>

20 <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/efectos-politica-publica>

4.2 Geoportal

El Geoportal de la CONABIO tiene como objetivo facilitar la localización, consulta y descarga de la cartografía temática generada y recopilada por la Comisión. El público interesado en elaborar consultas y análisis con la cartografía generada en el SMMM, podrá hacerlo con el apoyo de los videotutoriales disponibles.

Dentro del Geoportal, los usuarios pueden realizar las siguientes acciones sin necesidad de tener conocimiento previo sobre el manejo de datos espaciales: visualizar, filtrar tablas de atributos a diferentes niveles (ANP, estado, municipio y cuenca), así como consulta de los datos básicos del mapa (metadatos), los cuales permiten conocer los detalles metodológicos de la cartografía, su fecha de elaboración y publicación, autores, entre otros.

Para aquellos usuarios que están familiarizados con los formatos *shapefile* o *kml*, pueden realizar la descarga e incorporar los datos en sus análisis y proyectos específicos.

El acceso al Geoportal se puede realizar usando el siguiente enlace:

<http://geoportal.conabio.gob.mx/>

Mediante una búsqueda directa o navegando en el acervo de mapas, es posible localizar la cartografía del SMMM bajo el tema general *Biodiversidad*, en el apartado *Monitoreo de Manglares*. La cartografía a su vez está organizada en seis subtemas que se observan en la figura 4.3 y para algunos temas se encuentra disponible para las diferentes fechas y periodos de estudio.

A continuación se describe el contenido de cada subtema:

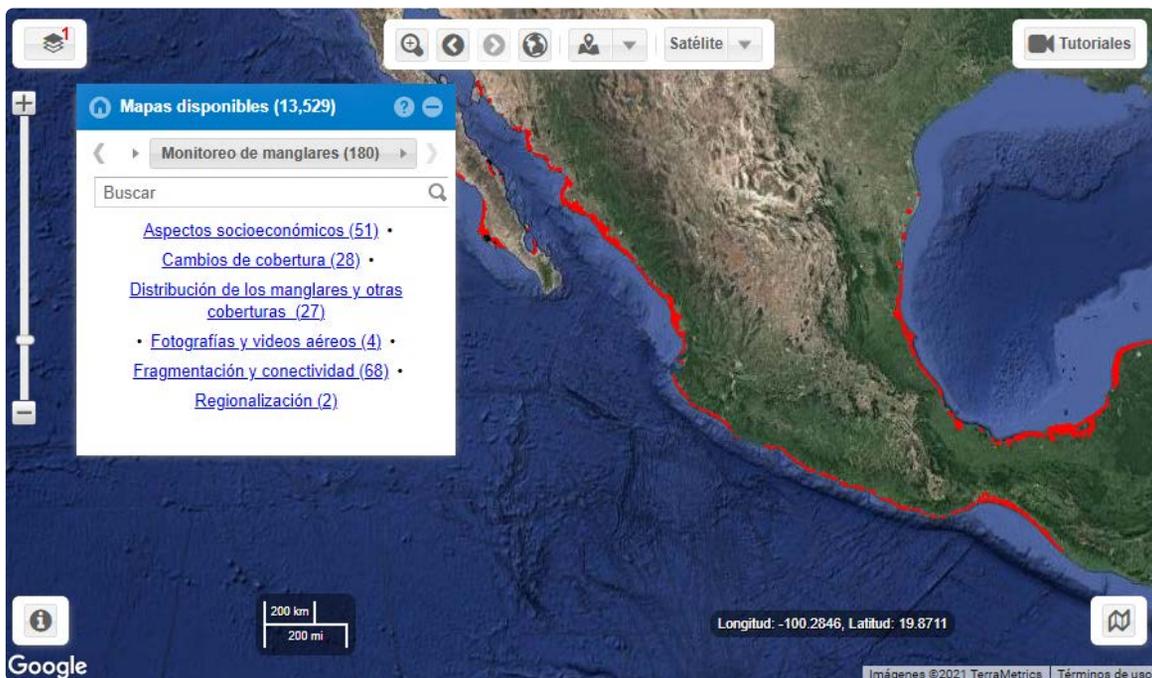


FIGURA 4.3 Organización de la cartografía del SMMM en el Geoportal. Se muestra como ejemplo, en color rojo, el mapa de Distribución de los manglares en México en 2020.

Aspectos socioeconómicos: mapas de índices de antropización de la zona asociada a los manglares.

Cambios de cobertura: mapas de cambios de la superficie de manglar y otras coberturas asociadas por periodo de estudio, así como mapas sobre los factores de deterioro y conservación asociados a políticas públicas en cuatro sitios de estudio.

Distribución de los manglares y otras coberturas: mapas de distribución de manglar y manglar perturbado, así como de otras coberturas asociadas.

Fotografías y videos aéreos: contiene los puntos de referencia de fotografías aéreas panorámicas y verticales, tomadas en las campañas 2008 y 2015/2016, con la colaboración de la SEMAR, para la validación de la cartografía del SMMM.

Fragmentación y conectividad: contiene mapas sobre la conectividad de los manglares a nivel estatal para cada fecha, con cinco categorías del Índice Integral de Conectividad.

Regionalización: contiene un mapa con las regiones administrativas de estudio del SMMM, un mapa de regiones costeras (propuesta para la regionalización de los manglares de México) y un mapa con una propuesta de sitios de estudio que considera criterios de hidrología y geomorfología.

4.3 Atlas de Naturaleza y Sociedad

El Atlas de Naturaleza y Sociedad de la CONABIO es una plataforma en donde se aprovecha la geovisualización, la geografía, la biología y la historia para exponer temas de forma espacial y temporal. El Atlas presenta mapas interactivos con textos narrativos, imágenes y contenido multimedia para visualizar la información y los resultados más relevantes que genera la

CONABIO, en una forma atractiva y fácil de interpretar.

El Atlas de Naturaleza y Sociedad pone a disposición de los usuarios información tanto de relevancia natural como social, abarca temas como la *Dimensión social de la biodiversidad*, *Vegetación marina sumergida*, *Cobertura de suelo*, *Manglares*, *Corredores Biológicos*, *COVID-19*, entre otros.

La plataforma se encuentra dirigida a cualquier usuario, sin necesidad de tener un amplio conocimiento en temas de manejo de datos espaciales, pero sí con inquietudes y preguntas que quiera responder, en este caso relacionadas con manglares, por ejemplo: “¿Dónde están los sitios de manglar con mayor relevancia de conservación y necesidades de rehabilitación en México?”, “¿Cómo se ha movido la línea de costa mexicana en las últimas décadas?”, “¿Qué cambios en la cobertura de suelo han ocurrido en años pasados?”, etcétera. Para acceder, basta con abrir la siguiente página en un navegador web:

<https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/manglar/>

Para el caso del SMMM, se ponen a disposición de los usuarios los siguientes temas a nivel estatal (figura 4.4):

Cambios de manglar: en varias ventanas se presentan los cambios entre los periodos de estudio; se pueden hacer consultas polígono por polígono (dependiendo de la zona de interés del usuario) para obtener superficies de pérdidas, permanencias y ganancias de manglar.

Sitios prioritarios: en una ventana se visualizan los usos de suelo y vegetación en los *Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica*; de esta forma se conoce su ubicación espacial y se pueden hacer consultas por polígono para saber la superficie y la clase de interés dentro del sitio.

Fotografías aéreas: se visualizan los puntos de toma de fotografías aéreas; en cada punto se despliega la vista en miniatura de cada fotografía, así como la fecha y altura de vuelo de la toma. Estas fotografías pueden ser descargadas dentro de esta misma plataforma.

Dinámica de cambios: sintetiza la variación espacial y temporal de las clases que intervienen en los procesos de cambio del manglar (como

parte de los resultados de la sección 3.1). Los resultados se representan a nivel de polígono y se incluye una tabla con los diferentes comportamientos del manglar a lo largo del tiempo (figura 4.5). Para usuarios con conocimiento en SIG, está disponible la opción de descarga de la información en formato *shapefile*, así como un archivo PDF descargable con mayor información sobre las clases mostradas.



FIGURA 4.4 Temas del SMM disponibles en el Atlas de Naturaleza y Sociedad.



FIGURA 4.5 Panel visual del tema *Dinámica de cambios*.

4.4 Base de datos de monitoreo en unidades de muestreo

La CONABIO, a través del SMMM, ha emitido dos convocatorias (2007 y 2013) para realizar proyectos de monitoreo en campo del ecosistema de manglar a mediano y largo plazo en México. Esto ha permitido financiar proyectos en diez de los 17 estados con presencia de manglar: Sinaloa, Nayarit, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Estos proyectos establecieron unidades de muestreo (UM) georreferenciadas (figura 4.6) para el monitoreo ecológico de la comunidad de manglar y su caracterización ambiental, con el propósito de generar información que aporte elementos relevantes para el entendimiento de este ecosistema y establecer bases sólidas para su manejo, conservación y restauración.

La información generada incluye datos de estructura (altura, DN o DAB, cobertura de copa, diámetro de copa, altura de fuste), diversidad (especies y frecuencia de especies), composición (número de especies, densidad, dominancia e información de plántulas) e indicadores ecológicos (Índice de valor de importancia, Valor Forestal, Índice de Holdridge), así como su relación con los servicios ecosistémicos.

Los datos recolectados incluyen también variables fisicoquímicas que describen su hábitat, como temperatura, salinidad, pH, potencial Redox, nitrógeno, fósforo, etcétera. Algunos proyectos, adicionalmente, han generado información de almacenes de carbono (hojarasca y materia orgánica del suelo), variables hidrológicas y geológicas, así como datos diversidad de vertebrados.

Todos los datos se encuentran organizados y almacenados en una base de datos espacial

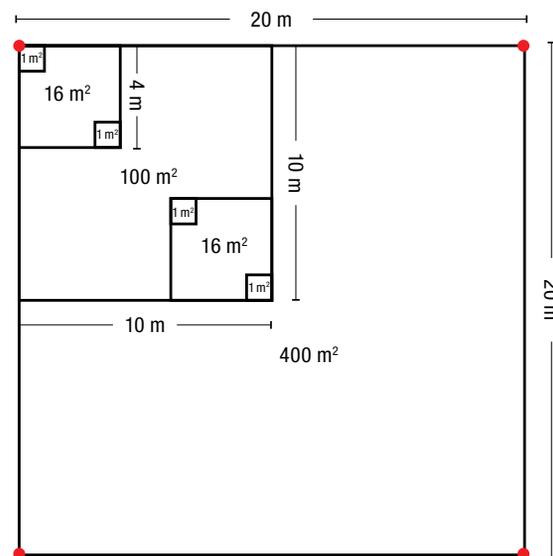


FIGURA 4.6 Esquema de las um para el monitoreo del ecosistema de manglar. Las marcas rojas indican los puntos de georreferencia.²¹

21 http://www.conabio.gob.mx/web/proyectos/pdf/instructivos/Instructivo_Manglares_2013.pdf

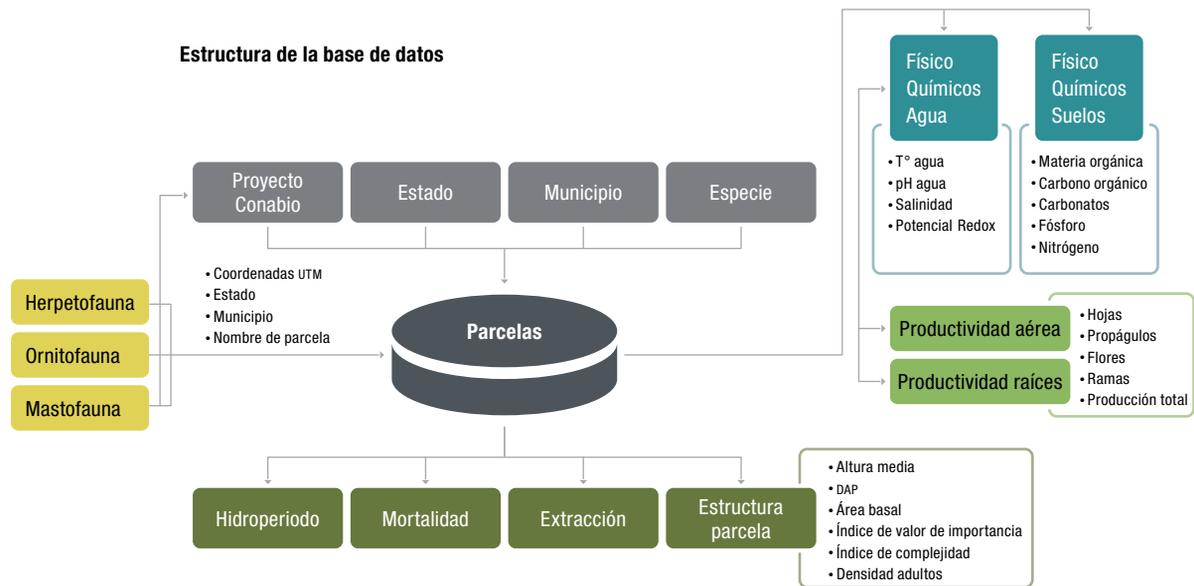


FIGURA 4.7 Estructura de la base de datos de los proyectos de monitoreo de manglares.

(figura 4.7) que está en constante actualización y que permite su consulta de forma dinámica, ya sea en formato tabular o como mapas, en la actualidad se está desarrollando un apartado dentro del Atlas de Naturaleza y Sociedad para hacer interactiva su consulta. Para mayor información sobre el acceso a los datos contactar al personal encargado del SMMM.

Los informes finales de cada proyecto e información adicional se encuentran disponibles para su consulta y descarga.²²

4.5 Realidad virtual de los manglares de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo

Desde 2015, la Dirección General de Geomática de la CONABIO se ha ocupado cada vez más de la

²² <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm/estructura-del-manglar>

visualización de ecosistemas utilizando nuevas tecnologías. Un ejemplo es la realidad virtual (RV) que se describe en esta sección.

Algunos de los ecosistemas de nuestro país tienen como características específicas una ubicación espacial limitada y condiciones de difícil acceso. Estas circunstancias son atribuibles a su distribución natural, inherente al ambiente donde se encuentran, y pueden presentar una limitante para su estudio y conocimiento de la ciudadanía en general.

De tal manera que, no todas las personas que tienen interés en los manglares han experimentado estar inmersos dentro de este maravilloso ecosistema. Es aquí en donde la RV ayuda a superar estas limitaciones, proponiendo un modelo inmersivo en donde el usuario experimenta de una forma muy detallada las condiciones del ambiente natural recreadas virtualmente y gracias a estas experiencias se complementa la educación ambiental y la concientización de la población.

Para garantizar una experiencia lo más realista y natural posible del ecosistema deseado se requieren varios requisitos previos. Estas necesidades incluyen el modelado detallado de sus componentes más relevantes y la correcta ubicación geográfica del ecosistema en forma virtual. Para ello juega un papel decisivo el modelado e integración de la flora y fauna representativas del ecosistema en el ambiente que se pretende recrear; y al mismo tiempo se debe lograr un equilibrio entre una réplica virtual altamente detallada y las limitaciones técnicas (por ejemplo el tiempo de renderización²³) para su representación en la aplicación de RV.

Sólo con una visualización altamente precisa y minuciosa de todos los componentes del ecosistema se puede garantizar que el usuario tenga una experiencia inmersiva perfecta. Dentro de estos componentes, son esenciales todos los

23 Anglismo de la palabra *rendering* que se refiere al proceso de generar una escena virtual en tres dimensiones por medio de programas informáticos.

elementos audiovisuales y la impresión de moverse libremente en el espacio del ecosistema.

En el caso de los manglares, se optó por la visualización con RV de una porción de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (RBSK), al sur de Punta Allen, Quintana Roo. La selección de este sitio responde, entre otras cosas, a que es considerado como una zona de difícil acceso y consecuentemente ha experimentado poco impacto antropogénico. Además, el ecosistema de esta zona muestra la presencia de las cuatro especies de manglares con mayor distribución en México, así como una gran cantidad de otros humedales de interés por la presencia de especies de flora y fauna características de la región (figura 4.8).

Obtención de la información de referencia

Para representar al ecosistema de manglar en forma virtual con el mayor realismo posible, fue necesario proveer al sistema virtual de información sobre las condiciones espaciales con respecto a los ecosistemas existentes, la topografía, la flora y

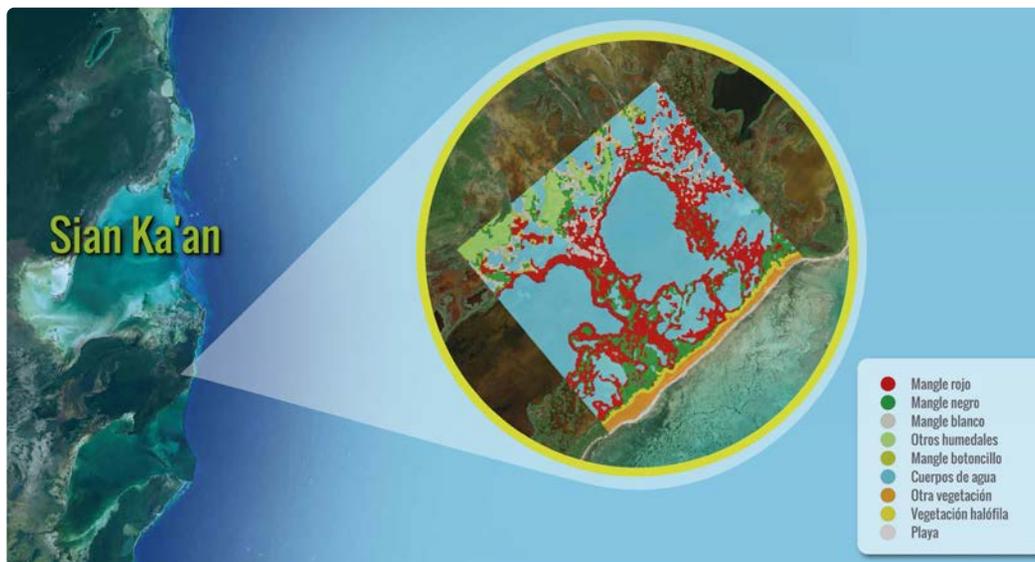


FIGURA 4.8 Área de estudio en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo.

fauna regional. En este marco, se definió un área de aproximadamente 12 km² para poder representar la mayor diversidad posible de diferentes humedales existentes en la RBSK, con un enfoque en los manglares. Esta área seleccionada contiene ecosistemas de interés primordial en la reserva, como la vegetación de la playa, las dunas, los humedales interiores y los manglares en transición con el Mar Caribe mexicano.

Con la finalidad de definir las ecozonas principales del espacio virtual, se clasificó una imagen Sentinel-2 de 2019 de esta área. La distribución de los manglares se tomó de la cartografía más reciente de 2020 del SMMM y con datos de campo obtenidos en 2019, información que se complementó con la identificación de zonas de arena (playas), algunas especies de manglares dominantes, otros humedales, cuerpos de agua y otras coberturas. Posteriormente, estas clases se generalizaron en un archivo formato raster para definir su ubicación correcta en el ambiente de la aplicación de rv.

La visita de campo, además, aportó datos de validación para la clasificación y brindó la oportunidad de obtener información esencial de las condiciones reales de los ecosistemas ahí presentes. Se prestó especial atención a la recopilación de información relevante de la flora local, que luego sirvió de referencia para los modelos en el ambiente virtual (la textura, por ejemplo). En toda la zona se compiló información foto-documental sobre la composición florística de los ecosistemas en varios puntos de referencia, así como información fenotípica y descriptiva de la vegetación, como la forma de crecimiento, la altura y las estructuras foliares, con el fin de garantizar la reproducción lo más detallada posible en la rv.

Para representar también la microtopografía, se tomaron fotos y vídeos con un RPAS micro (Mavic Pro) en diferentes puntos de la zona

(como se describe en la sección 3.4). Estos datos aéreos, junto con el mapa de zonificación y la información puntual de la vegetación, formaron la base para modelar el área de rv. La interpretación visual de estos datos recopilados permitió una reproducción detallada de las zonas de transición entre el mar, la playa con vegetación de dunas, los manglares y los humedales interiores.

Selección y modelación de flora y fauna local

Además de los datos de campo, se consultó la base de datos del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB) para conocer la presencia de flora y fauna en el área de interés. Dado que no es posible modelar todas las especies debido a su gran diversidad, se utilizaron los siguientes criterios para la selección de la fauna: abundancia, representatividad, complejidad y reconocimiento como especie carismática (especie bandera). Para la composición florística se seleccionaron las especies más representativas de los humedales y la vegetación de playa, prestando especial atención al modelado de las especies de manglar. También se utilizaron, por ejemplo, fotografías detalladas de los manglares como referencias de textura en el modelado.

Existen varios métodos para modelar objetos 3D en el espacio virtual. Por ejemplo, utilizando métodos de fotogrametría (*Structure from Motion* y *Laserscanning*) o métodos de modelado manual (esculpido digital y modelado paramétrico), en su mayoría basados en referencias del objeto real. Este último es especialmente adecuado para elementos vivos y dinámicos. Para modelar los elementos del caso que nos ocupa (figura 4.9) se utilizaron el software de gráficos tridimensionales Blender, de código abierto, y el software de modelado de vegetación SpeedTree, de licenciamiento.

Todos los objetos se modelaron primero con un nivel de detalle muy alto y luego, en un segundo paso, se generalizaron. Esto último es necesario para reducir la enorme cantidad de polígonos de cada modelo y al mismo tiempo mantener la calidad deseada en cuanto a geometría y textura. Finalmente, todos los elementos fueron animados para simular de manera realista los patrones de movimiento de la fauna y flora, considerando incluso los efectos del viento.

Generación de información audiovisual

Adicionalmente, se incluyeron componentes audiovisuales para complementar la experiencia interactiva de la RV en los manglares. Para cada especie modelada se diseñó una ficha técnica con información detallada que se visualiza en forma interactiva de acuerdo con el interés del usuario. La ficha técnica contiene, además del nombre científico y común de cada especie, información como su distribución y biología, que



FIGURA 4.9 Modelación de fauna y flora del ecosistema de manglar.



FIGURA 4.10 Ficha técnica de *C. erectus* en la aplicación de RV.

incluye su descripción y el hábitat donde crece, todo esto acompañado de un mapa y una imagen de referencia (figura 4.10).

Para cada especie se agregó, además, información sobre las amenazas que padece, su importancia económica, medicinal (en caso de haberla), ambiental y el estado de conservación que guarda tanto en la lista de especies en riesgo de México (NOM-059-SEMARNAT-2010) como en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). También se generaron archivos de audio para algunas especies de fauna que se encuentran en el sitio, además de algunos componentes abióticos, para embeber de mayor realismo a la RV.

Creación del ecosistema virtual, implementación de los componentes e interfaz

Todos los elementos mencionados anteriormente se integraron dentro del motor gráfico de videojuego Unreal Engine (versión 4.26), donde se procesaron para generar el ambiente virtual (efectos de sombreado, actores y escenarios) y la interactividad con el hardware periférico (mouse y teclado, visores de RV).

La implementación de los insumos se logra mediante la programación y configuración de diferentes actores como la fauna, las funciones procedurales²⁴ para dispersar la vegetación y otros elementos estáticos en el ambiente virtual. El comportamiento de la fauna en los manglares

24 Método de creación de contenidos a partir de algoritmos automatizados y no de forma manual.



FIGURA 4.11 Compilación final de los ecosistemas presentes con los objetos modelados en la RV.

se reflejó a través de rutas predefinidas o en casos más complejos (por ejemplo, de mamíferos) a través de árboles de comportamiento. Finalmente, para aproximarse a una experiencia real es necesario perfeccionar el ambiente, modelar la atmósfera, los vientos, el movimiento del agua y optimizar los efectos, como las sombras y la refracción de la luz en la columna de agua (efectos cáusticos) (figura 4.11).

La interfaz abarca los elementos gráficos de apoyo al usuario como velocímetro, brújula, mapa y menús. Las fichas informativas se pueden consultar en forma interactiva a través de una consola o mediante el teclado de la computadora. Hay “teleports” que sirven para trasladar al usuario a puntos preestablecidos dentro del escenario y se definieron con referencia a los lugares de interés con respecto a la fauna y flora modelada. El usuario puede orientarse a través de un mapa de referencia que le permite ubicarse en el espacio virtual. Finalmente, puede acceder a una biblioteca digital de todos los elementos del ambiente virtual en caso que quiera obtener información adicional sobre ellos. Las interfaces y funcionalidades son ligeramente distintas dependiendo si el usuario utiliza la versión PC de escritorio (2D) o la versión inmersiva 3D con visor de RV (por ejemplo Oculus Rift o HTC Vive).

Como se puede apreciar, el uso de la RV abre nuevas posibilidades para la visualización de ecosistemas como un elemento didáctico, educativo, de concientización e incluso de sensibilización de la población. Usando el ejemplo de los manglares de la RBSK fue posible demostrar que incluso los ecosistemas de difícil acceso pueden ser explorados interactivamente. Entrar en una forma inmersiva al mundo virtual, basada en información real, proporciona una experiencia mucho más intensa del ecosistema en comparación con las técnicas de visualización

tradicionales (como mapas, animaciones y películas). Sobre todo, la posible interacción con los objetos de flora y fauna del ambiente virtual y la presencia simulada refuerzan la sensación de experimentar y vivir el ecosistema. Esta nueva forma de visualización pretende aumentar el involucramiento de la población sobre la importancia, estética, funciones y vulnerabilidad de ecosistemas complejos como los manglares.

La importancia de contar con información tan amplia sobre el ecosistema de manglar, generada en el SMMM, permite la construcción de este tipo de visualización. Aspectos como la caracterización de los manglares, su distribución espacial y especies de fauna presentes en el ecosistema juegan un papel decisivo para la RV al aportar datos reales sobre las condiciones que sirven de punto de partida para la modelación del escenario virtual.

Como nota final, es importante mencionar que la aplicación aún se encuentra en una fase preliminar. La versión final será puesta a disposición del público en general a través de la página web de Geovisualización²⁵ de la CONABIO. Mientras tanto, existe una versión Beta disponible a través de la siguiente liga de descarga:

<https://biodiversidad.gob.mx/media/1/region/files/Mangle-p2021jn21.7z>

25 <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/geoviz>

CONCLUSIONES

El Sistema de Monitoreo de los Manglares de México proporciona la información más actualizada sobre la extensión y distribución de este ecosistema en nuestro territorio. A través de esta obra, que corresponde al tomo más reciente de la serie *Manglares de México* editada por la CONABIO, se expusieron los resultados de la actualización 2020, así como los análisis más relevantes de diversas líneas de investigación que forman parte del SMMM.

La superficie de manglar a nivel nacional para el año 2020 reflejó un incremento considerable en relación con 2015, la mayor en términos generales con respecto a los periodos estudiados. Este cambio no necesariamente representa una recuperación histórica del manglar, ya que estuvo influenciada por la mejora en la diferenciación de manglares arbustivos.

Con esta nueva actualización del SMMM, también fue posible integrar nuevas áreas de manglar no registradas para fechas anteriores, debido al incremento en su superficie superando el AMC requerida para ser representadas en el mapa. Esto representó un aumento también en el área de estudio a nivel nacional, por lo que en 2020 se mapeó una mayor superficie tanto de manglar como de su zona de influencia (definida principalmente por un un área buffer de 5 km con relación a la distribución de manglares).

Desarrollo tecnológico

El desarrollo tecnológico en el tema de observación de la Tierra a través de PR, una mayor disponibilidad de datos históricos y actuales al público y la colaboración interinstitucional han permitido mejorar sustancialmente la generación de la cartografía del SMMM en términos de diferenciación de los manglares. En la más reciente actualización del *Mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a manglares (2020)* se emplearon 94 imágenes satelitales con baja o nula cobertura de nubes, recopiladas en cinco meses, y gracias a la experiencia y conocimiento adquiridos por el equipo de trabajo el mapa se generó en un año. Esto representó un avance significativo en términos de tiempo a diferencia de la primera versión (2005), cuando fueron necesarios tres años y medio para recopilar los insumos necesarios y elaborar la cartografía. Estos avances permitieron además la reclasificación de 83 791 ha de la clase *Otros humedales* a clase *Manglar* en el Complejo Sian Ka'an en Quintana Roo.

Dinámica de cambios de manglares

De acuerdo con los resultados del SMMM que brindan información a lo largo de aproximadamente 50 años con cinco observaciones específicas, fue posible analizar y describir la variación espacial y temporal que han tenido los manglares en este periodo, así como las coberturas que intervienen en los procesos de cambio. Parte de los resultados confirmaron que el manglar es un ecosistema dinámico, ya que a pesar de presentar pérdidas en su superficie tiene la capacidad de colonizar nuevas áreas.

Este análisis también permitió describir procesos de recuperación de manglar, lo que demuestra que es un ecosistema resiliente a ciertos cambios, siempre y cuando las condiciones para hacerlo no sean alteradas. Esta conclusión se refuerza con los resultados obtenidos del análisis sobre el impacto de los huracanes Willa (2018) y Carlotta (2012) en el manglar, que muestran que la recuperación o deterioro del *Manglar perturbado* depende de las condiciones locales y regionales. Por lo anterior, la toma de decisiones sobre la clase manglar perturbado sigue teniendo un papel preponderante.

Conectividad estructural de ecosistemas costeros

El SMMM se ha enfocado principalmente en la extensión y distribución de los ecosistemas de manglar, pero es relevante considerar estudios que los involucren dentro de una escala de paisaje más complejo e integral, que incluya las importantes interrelaciones con otros ecosistemas, como los humedales de agua dulce, las marismas salobres, los pastos marinos y los corales. En este contexto es necesario conocer las interacciones entre estos ecosistemas para proteger en forma integral a la biodiversidad y sus procesos ecológicos, por lo que abundar en el análisis de conectividad proveerá información para entender esta dinámica.

Uso de otras tecnologías para la caracterización del manglar

Si bien las imágenes de radar han sido utilizadas para diferentes temáticas en décadas anteriores, su uso se ha incrementado debido a su disponibilidad en la plataforma Copernicus de la ESA. Esta disponibilidad permitió explorar su aplicación en la caracterización del manglar y su análisis aportó información para generar mapas en sitios piloto de algunos elementos de la estructura de la vegetación, como el tamaño de la copa, que puede ser utilizada para la estimación de biomasa. Sin embargo, tiene limitaciones para asociarlas a otros parámetros, por lo que es necesario continuar en el desarrollo de este tema.

Otro de los desarrollos tecnológicos que se incorporaron al SMMM es el sistema de aeronave pilotada a distancia, conocido como dron, que facilita obtener fotografías y videos con alta resolución espacial, de forma práctica y a un menor costo, gracias a lo cual es posible diferenciar elementos de la cobertura del suelo con mayor detalle. El uso de esta tecnología en el SMMM es actualmente de gran relevancia para caracterizar los manglares e identificar con mayor precisión problemáticas de estos ecosistemas, como especies invasoras que los afectan. Hasta el momento los datos generados con esta tecnología han sido usados para validar trabajos locales; sin embargo, se están usando para validar la más reciente actualización del mapa de la distribución de manglares 2020.

Publicación y divulgación

Los datos, información y conocimiento generados por el SMMM se encuentran disponibles por medio de la página web de la CONABIO, en diferentes formatos de salida. La página web del sistema, recientemente actualizada, tiene como objetivo proveer toda la información generada en formato de texto, gráficas, fotografías, ilustraciones, tablas y publicaciones. Mientras que la información geoespacial se pone a disposición del público en dos plataformas que son complementarias, pensando en usuarios con necesidades diferentes. Ambas herramientas permiten la consulta en forma dinámica. La primera opción es el Geoportal, enfocado a usuarios que requieren la cartografía para sus propios análisis. La segunda opción corresponde al Atlas de Naturaleza y Sociedad, enfocado a dar respuesta a preguntas espaciales específicas sobre los manglares de México, sin necesidad de descargar la cartografía. De esta manera se cumple con el objetivo de generar información y ponerla a disposición del público para la toma de decisiones.

Una de las nuevas tecnologías de visualización implementada en el marco del SMMM es la realidad virtual. Que permite conocer con detalle elementos del ecosistema de manglar, gracias a su representación casi real. La tecnología utilizada por la CONABIO favorece la accesibilidad y divulgación en una forma rápida y sencilla, a la información y conocimiento generados en el SMMM.

REFERENCIAS

- Acosta-Velásquez, J. y Rodríguez-Zúñiga, M. T. 2007. Programa de monitoreo de los manglares de México a largo plazo: Primera Etapa. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Informe final. SNIB-CONABIO, proyecto No. DQ056. México, D. F. Disponible en: <<http://www.conabio.gob.mx/institucion/cgi-bin/datos2.cgi?Letras=DQ&Numero=56>>.
- Agraz-Hernández, C. M. y Flores-Verdugo, F. 2014. Diagnóstico del impacto y lineamientos básicos para los programas de mitigación y manejo de humedales. En A. V. Botello, J. Rendón von Osten, J. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.), *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias* (3rd ed., pp. 597–606). Campeche: CINVESTAV-IPN, UAC-IEPOMEX, UNAM-ICMYL.
- Agraz-Hernández, C. M., Noriega-Trejo, R., López-Portillo, J., Flores-Verdugo, F. J. y Jiménez-Zacarías, J. J. 2006. *Guía de Campo. Identificación de los Manglares en México*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche. 45 pp.
- Agraz-Hernández, C. M., Chan-Keb, C. A., Muniz-Salazar, R., Pérez-Balan, R., Colli, L., Conde-Medina, K.P. y Ruiz-Hernández, J. 2020. Relationship between blue carbon and methane and the hydrochemistry of mangroves in Southeast Mexico. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(1), 1091–1106. DOI: <https://doi.org/10.15666/aeer/1801_10911106>.
- Alongi, D. M. 2007. Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (76), 1–13. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>>.
- Alongi, D. M. 2015. The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30–39. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>>.
- Alonso-F., A. M., Finegan, B. y Brenes, C. 2017. Evaluación de la conectividad estructural y funcional en el corredor de conservación Podocarpus-Yacuambi, Ecuador. *Caldasia* 39(1), 140–156. DOI: <<https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.64324>>.
- Argamosa, R. J. L., Blanco, A. C., Baloloy, A. B., Cándido, C. G., Dumalag, J. B. L. C., Dimapilis, L. L. C. y Paringit, E. C. 2018. Modelling Above Ground Biomass of Mangrove Forest Using Sentinel-1 Imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volumen IV-3, 2018 ISPRS TC III Mid-term Symposium “Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing”, 7–10 Mayo, Beijing, China.
- Arroyo-Rodríguez V., Moreno, C. E. y Galán-Acedo, C. 2017. La ecología del paisaje en México: logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 88, 42–51.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C. y Silliman, B. R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*. 81(2), 169–193. DOI: <<https://doi.org/10.1890/10-1510.1>>.
- Berkström, C., Eggertsen, L., Goodell, W., Cordeiro, C. A. M. M., Lucena, M. B, Gustafsson, R., Bandeira, S., Jiddawi, N. y Ferreira, C. E. L. 2020. Thresholds in seascape connectivity: the spatial arrangement of nursery habitats structure fish communities on nearby reefs. *Ecography* 43(6), 882–896. DOI: <<https://doi.org/10.1111/ecog.04868>>.

- Brodu, N. 2017. Super-resolving multiresolution images with band-independent geometry of multispectral pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(8), 4610–4617. DOI: <<https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2694881>>.
- Bunting P., Rosenqvist, A., Lucas, R., Rebelo, L-M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T., Shimada, M. y Finlayson, C. M. 2018. The Global Mangrove Watch – a New 2010 Global Baseline of Mangrove Extent. *Remote Sensing* 10, 1669. DOI: <<https://doi.org/10.3390/rs10101669>>.
- Cifuentes-Jara, M., Brenes, C., Leandro, P., Molina, O., Romero, T. E., Torres, D. y Velásquez, S. 2018. Manual centroamericano para la medición de carbono azul en manglares (Serie técnica. Informe técnico #141). Turrialba: CATIE. 92 p.
- Clinton, N. 2016. Time Series Analysis in Earth Engine. GEE 2016 User's Summit. En: <https://docs.google.com/presentation/d/1J1rUtf-bkfaJwYJY-tU17kzKI4U8FnF7Q2_VWqWdaak/edit#slide=id.g4954714e1_18>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2009. *Manglares de México: Extensión y distribución*. 2ª ed. Ciudad de México: CONABIO. 99 pp.
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2016. *Distribución de manglares de México 2015*. Ciudad de México: CONABIO.
- CONABIO y CONANP. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2020. Reunión de trabajo: Actualización de mapa de manglares 2020 en la zona de Sian Ka'an y Uaymil. Subcoordinación de Percepción Remota de CONABIO en coordinación con la Dirección de la Reserva de la Biósfera Sian Ka'an y del Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil. Realizada los días 20 de octubre y 26 de noviembre de 2020.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2018. Comunicado de prensa: Apoya CONAFOR saneamiento de 280 hectáreas de mangle en Marismas Nacionales. En: <<https://www.gob.mx/conafor/prensa/apoya-conafor-saneamiento-de-280-hectareas-de-mangle-en-marismas-nacionales>>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2006. *Programa de Conservación y manejo Reserva de la Biosfera "Los Petenes"*. 1ª edición. Ciudad de México. 207 pp.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2014. Programa de Manejo Complejo Sian Ka'an: Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil y Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an. Ciudad de México. 486 pp.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 2019. NOM-107-SCT3-2019. Publicada el 14 de noviembre de 2019 en el Diario Oficial de la Federación. México. En: <<https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- Duke, N. C. 2001. Gap creation and regenerative processes driving diversity and structure of mangrove ecosystems. *Wetland Ecology and Management*, 9(3), 257–269. DOI: <<https://doi.org/10.1023/A:1011121109886>>.
- Duke N. C. 2017. Chapter 2: Mangrove Floristics and Biogeography Revisited: Further Deductions from Biodiversity Hot Spots, Ancestral Discontinuities, and Common Evolutionary Processes. En: Rivera-Monroy Victor H., Lee S. Y., Kristensen E., Twilley R.R. (eds.). *Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective Structure, function, and Services*. pp. 17-54, Springer. New York, U.S.A. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62206-4_1>.

- EOP. Earth Observation Portal (Portal para la Observación de la Tierra). 2021. SPOT 5. Recuperado el 15 de febrero de 2021 de: <<https://earth.esa.int/web/eoport/satellite-missions/s/spot-5>>.
- EAS. Europe Space Agency (Agencia Espacial Europea). 2021. Sentinel-2. En: <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-2>>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2007. The world's mangroves 1980-2005. *FAO Forestry Paper*, 153. Roma: FAO. 89 pp.
- Fawcett, D., Leiterer, R., Heisig, H., Wulf, H., Kellenberger, T., y Joerg, P.C. 2017. Google Earth Engine Product Prototypes. En: <https://www.researchgate.net/publication/316031606_Google_Earth_Engine_Product_Prototype>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- Feher, L. C., Osland, M. J., Anderson, G. H., Vervaeke, W. C., Krauss, K. W., Whelan, K. R. T., Balentine, M. K., Tiling-Range, G., Smith III, J. T. y Cahoon, D. R. 2020. The Long-Term Effects of Hurricanes Wilma and Irma on Soil Elevation Change in Everglades Mangrove Forests. *Ecosystems* 23(5), 917-931. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s10021-019-00446-x>>.
- Flores-Verdugo, F., Moreno-Casasola, P., Agraz-Hernández, C. M., López-Rosas, H., Benítez-Pardo, D. y Travieso-Bello, A. C. 2007. La topografía y el hidropereodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 80(Suplemento), 33-47. DOI: <<https://doi.org/10.17129/botsoci.1755>>.
- FMCN. Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. 2018. Distribución de la especie *Rhizophora mangle* en cinco sitios de la región Pacífico norte, en el marco del sistema de monitoreo de los manglares de México. Fundación David & Lucile Packard a través del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A. C.
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas R., Primavera, J., Rajkaran, A. y Shi, S. 2019. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources* 44, 89-115. DOI: <<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>>.
- GMW. Global Mangrove Watch. 2020. The area of mangrove habitat in the world in 2016. En: <<https://www.globalmangrovetwatch.org/>>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N. y Fatoyoinbo, T. 2020. Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology* 26, 5844-5855. DOI: <<https://doi.org/10.1111/gcb.15275>>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>>.
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P. y Verutes, G. 2016. The power of three: Coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience. *PLoS ONE* 11(7). DOI: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158094>>.
- Held, A., Ticehurst, C., Lymburner, L. y Williams, N. 2010. High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyperspectral and radar remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 24(13), 2739-2759. DOI: <<https://doi.org/10.1080/0143116031000066323>>.
- Hernández-Arana, H. A., Vega-Zepeda, A., Ruíz-Zárate, M. A., Falcón-Álvarez, L. I., López-Adame, H., Herrera-Silveira, J. y Kaster, J. 2015. Transverse coastal corridor: from freshwater lakes to coral reefs ecosystems. *Biodiversity and conservation of the Yucatán Peninsula*, 355-376. Cham: Springer.

- Horstman, E. M., Dohmen-Janssen, C. M., Narra, P. M. F., van den Berg, N. J. F., Siemerink, M. y Hulscher, S. J. M. H. 2014. Wave attenuation in mangroves: A quantitative approach to field observations. *Coastal Engineering* 94, 47–62. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.08.005>>.
- Hu, L., Xu, N., Liang, J., Li, Z., Chen, L. y Zhao, F. 2020. Advancing the mapping of mangrove forests at national-scale using Sentinel-1 and Sentinel-2 time-series data with Google Earth Engine: A case study in China. *Remote Sensing* 12(19). DOI: <<https://doi.org/10.3390/RS12193120>>.
- Jia, M., Wang, Z., Wang, C., Mao, D. y Zhang, Y. 2019. A new vegetation index to detect periodically submerged mangrove forest using single-tide Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing* 11(17), 1–17. DOI: <<https://doi.org/10.3390/rs11172043>>.
- Kathiresan, K. 2012. Importance of Mangrove Ecosystem. *International Journal of Marine Science* 2, 70–89.
- Krauss, K. W. y Osland, M. J. 2020. Tropical cyclones and the organization of mangrove forests: a review. *Annals of Botany* 125(2), 213–234. DOI: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcz161>>.
- Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Baltsavias, E. y Schindler, K. 2017. Super-Resolution of Multispectral Multiresolution Images from a Single Sensor. Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Honolulu, EUA.
- Lanaras, C., Bioucas-Dias, J., Galliani, S., Baltsavias, E. y Schindler, K. 2018. Super-resolution of Sentinel-2 images: Learning a globally applicable deep neural network. *isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 146, 305–319. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.018>>.
- López-Medellín, X., Ezcurra, E., González-Abraham, C., Hak, J., Santiago, L. S. y Sickman, J. O. 2011. Oceanographic anomalies and sea-level rise drive mangroves inland in the Pacific coast of Mexico. *Journal of Vegetation Science* 22(1), 143–15.
- López-Portillo, J. y Ezcurra, E. 2002. Los manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques*. Número especial, 27–51.
- Lugo, A. E. y Snedaker, S. C. 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics* 5, 39–64.
- Manna, S. y Raychaudhuri, B. 2020. Mapping distribution of Sundarban mangroves using Sentinel-2 data and new spectral metric for detecting their health condition. *Geocarto International* 35(4), 434–452. DOI: <<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1520923>>.
- Moreno-Casasola, P. 2020. *Los humedales costeros: beneficios y servicios ecosistémicos*. Xalapa: Gobierno de México, CONACYT, Instituto de Ecología A. C. 43 pp.
- Muñoz-Rojas, S., Ayala-Pérez, L. A., Sosa-López, A. y Villalobos-Zapata, G. J. 2013. Distribución y abundancia de la comunidad de peces en la porción litoral de la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche, México. *Revista de Biología Tropical* 61(1), 213–227.
- Nettel, A., Dodd, R. S., Afzal-Rafii, Z. y Tovilla-Hernández, C. 2008. Genetic diversity enhanced by ancient introgression and secondary contact in East Pacific black mangroves. *Molecular Ecology* 17(11), 2680–2690.
- Pérez-Espinosa, I., Gallegos, M. E., Ressler, R., Valdeerrama-Landeros, L. H. y Hernández-Cárdenas, G. 2019. Distribución espacial de los pastos marinos y la vegetación acuática sumergida en los Petenes, Campeche. *Terra Digitalis international e-journal of maps* 3(2), 1–33. DOI: <<https://doi.org/10.22201/igg.25940694.2019.2.56.138>>.
- Pham, T. D., Xia, J., Baier, G., Le, N. N. y Yokoya, N. 2019. Mangrove Species Mapping Using Sentinel-1 And Sentinel-2 Data In North Vietnam. Vietnam: Geoinformatics Unit-RIKEN Center for Advanced Intelligence Project, Japan Institute of Mechanics, Vietnam Academy of Science and Technology, 6102–6105.

- Proisy, C., Mougin, E. y Fromard, F. 2001. Radar remote sensing of mangroves: results and perspectives. *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium* Volumen 7. 9–13. DOI: <<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2001.978253>>.
- Purwanto, A. D. y Asriningrum, W. 2019. Identification of Mangrove Forests Using Multispectral Satellite Imageries. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences* 16(1), 63. DOI: <<https://doi.org/10.30536/j.ijreses.2019.v16.a3097>>.
- Puyravaud, J. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177: 593–596.
- Rodríguez-Zúñiga, M. T., Ramírez-García, P. y Gutiérrez-Granados, G. 2011. Efectos de la extracción no controlada de madera sobre la comunidad y estructura de tamaños de los manglares de Alvarado, Veracruz, México. *Boletín de La Sociedad Botánica de México* 113, 107–113.
- Rodríguez Zúñiga, M. T., Villeda Chávez, E., Vázquez-Lule, A. D., Bejarano, M., Cruz-López, M. I., Olguín, M., Villela-Gaytán, S. A. y Flores, R. (coordinadores). 2018. *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala*. Ciudad de México: CONABIO. 272 pp.
- 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-MacDonald, L. y Galindo-Leal, C. 2013. *Manglares de México. Extensión, distribución y monitoreo*. Ciudad de México: CONABIO. 128 pp.
- Santamaría, S. 2014. Caracterización estructural y cambios en la cobertura del manglar en el sistema lagunar Los Patos Sólo Dios, Pijijiapan, Chiapas. Tesis de maestría en Ciencias en recursos naturales y desarrollo rural. Laboratorio de Ecología de Manglares y Zona Costera, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula.
- Saura, S. y Pascual-Hortal, L. 2007. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning* 83(2-3), 91–103.
- SCT. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2017. Circular obligatoria CO AV-23/10. Dirección general de aeronáutica civil. En: <<http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo3/co-av-23-10-r4.pdf>>, última consulta: 24 de abril de 2021.
- SCT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010. Publicada el 30 de diciembre de 2010 en el Diario Oficial de la Federación. Con última modificación el 4 de marzo de 2020.
- Shumway, R. H. y Stoffer, D. S. 2017. *Time series analysis and its applications*. Berlín: Springer Texts in Statistics. DOI: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8>>.
- Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz, M., Mendoza, E., Delgadillo, M., Escudero, M., Félix, A. y Cid, A. 2014. *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 125 pp.
- Simard, S., Fatoyinbo, L., Smetanka, C., Rivera-Monroy, V. H., Castañeda-Moya, E., Thomas, N. y Stocken, T. 2019. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency. *Nature Geoscience* 12, 40–45. DOI: <<https://doi.org/10.1038/s41561-018-0279-1>>.
- Smith, R. S., Blaze, J. A. y Byers, J. E. 2020. Negative indirect effects of hurricanes on recruitment of

- range-expanding mangroves. *Marine Ecology Progress Series* 644, 65–74. DOI: <<https://doi.org/10.3354/meps13351>>.
- Spalding, M., Kainuma, M. y Collins, L. 2010. *World Atlas of Mangroves*. Versión 3. Londres: Routledge.
- Srikanth, S., Lum, S. K. Y. y Chen, Z. 2015. Mangrove root: adaptations and ecological importance. *Trees* 30(2), 451–465. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s00468-015-1233-0>>.
- Svejkovsky, J., Ogurcak, D. E., Ross, M. S. y Arkowitz, A. 2020. Satellite Image-Based Time Series Observations of Vegetation Response to Hurricane Irma in the Lower Florida Keys. *Estuaries and Coasts* 43(5), 1058–1069. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s12237-020-00701-8>>.
- Thomas, N., Lucas, R., Bunting, P., Hardy, A., Rosenqvist, A. y Simard, M. 2017. Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996–2010. *PLoS ONE* 12(6). DOI: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179302>>.
- Tovilla-Hernández, C. y Romero-Berny, E. I. 2012. Diagnóstico estructural de los manglares de Chiapas y Oaxaca. En A. J. Sánchez, X. Chiappa-Carrara y R. Brito-Pérez (editores), *Recursos acuáticos costeros del sureste*. Volumen 1, 257–279.
- Tovilla-Hernández, C., De La Presa-Pérez, J. C., Ovalle-Estrada, F., Salas-Roblero, R. L., De La Cruz-Montes, G. y Ramírez, A. 2020. *Inventario y monitoreo del estado actual de los bosques de manglar Chiapas y Oaxaca*. Ciudad de México: El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Tapachula. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. FNo05.
- Tovilla-Hernández, C., de la Lanza-Espino G. y Orihuela-Belmonte, D. E. 2001. Impact of logging on a mangrove swamp in South Mexico: Cost/benefit analysis. *Revista de Biología Tropical* 49(2), 571–580.
- Twilley, R. R. 1998. Mangrove Wetlands. En M. G. Messina y W. H. Conner (editores), *Southern Forested Wetlands: Ecology and Management*, 1a edición, 445–473. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Twilley, R. R. y Day, J. W. 2012. Mangrove Wetlands. En J. W. Day, Jr., B. C. Crump, W. M. Kemp y A. Yáñez-Arancibia (editores), *Estuarine Ecology*, 165–202. DOI: <<https://doi.org/10.1002/9781118412787.ch7>>.
- Valderrama, L., Troche, C., Rodríguez, M. T., Marquez, D., Vázquez, B., Velázquez, S., Vázquez, A., Cruz, M. I. y Ressler, R. (2014). Evaluation of mangrove cover changes in Mexico during the 1970–2005 period. *Wetlands*, 34(4), 747–758. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s13157-014-0539-9>>.
- Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Troche-Souza, C., Velázquez-Salazar, S., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, J. A., Vázquez-Balderas, B., Cruz-López, M. I. y Ressler, R. 2017. *Manglares de México: actualización y exploración de los datos del sistema de monitoreo 1970/1980-2015*. Ciudad de México: CONABIO. 128 pp.
- Valderrama-Landeros, L. H., Lopez-Portillo, J., Velázquez-Salazar, S., Alcántara-Maya, J. A., Troche-Souza, C., Rodríguez-Zúñiga, M. T., Vázquez-Balderas, V., Villeda-Chavez, E., Cruz-Lopez, M. I. y Ressler, R. 2020. Regional Distribution and Change Dynamics of Mangroves in Mexico between 1970/80 and 2015. *Wetlands* 40. 1295–1305. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s13157-020-01299-0>>.
- Vázquez-Lule, A. D., Díaz-Gallegos, J. R., Adame, M. F., Alcántara-Maya, J. A. y Velázquez-Salazar, S. 2019. Caracterización del sitio de manglar PY77 Sian Ka'an. En CONABIO, Actualización con datos a 2015. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. Ciudad de México: CONABIO. En: <<https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/14998.pdf>>, última consulta: 27 de abril de 2021.
- Velázquez-Salazar, S., Valderrama-Landeros, L. H., Rodríguez-Zúñiga, M. T. y Cruz-López, M. I. 2019. Anthropization in the coastal zone associated with

- Mexican mangroves (2005-2015). *Environmental Monitoring and Assessment* 191, 521–515. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7661-3>>.
- Wang, D., Wan, B., Qiu, P., Su, Y., Guo, Q., Wang, R., Sun, F. y Wu, X. 2018. Evaluating the performance of Sentinel-2, Landsat 8 and Pléiades-1 in mapping mangrove extent and species. *Remote Sensing* 10(9). DOI: <<https://doi.org/10.3390/rs10091468>>.
- Yepes, A., Zapata, M., Bolivar, J., Monsalve, A., Milena-Espinosa, S., Sierra-Correa, P. C. y Sierra, A. 2017. Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para la estimación de los contenidos de carbono en manglares del Caribe Colombiano. *Revista de Biología Tropical* 64(2), 913–926.
- Zetterberg, A. (2011). Connecting the dots: network analysis, landscape ecology, and practical application. Disertación doctoral: KTH Royal Institute of Technology.

AGRADECIMIENTOS Y CRÉDITOS

Agradecemos de forma especial al Dr. José Sarukhán Kermez, Coordinador Nacional de la CONABIO y al Ing. Raúl Jiménez Rosenberg, Coordinador General de Información y Análisis, cuyas labores han favorecido la existencia y funcionamiento del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México en los últimos 15 años.

A la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por el apoyo financiero otorgado.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) por su valioso apoyo en las zonas de incertidumbre de manglar, además del apoyo en las visitas a campo.

Agradecemos también al Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), por el financiamiento en la obtención de datos para la validación del mapa 2020, que se encuentran en proceso.

A la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXID), de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), por el financiamiento para la movilidad como parte de la cooperación México-Colombia.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), de Colombia, por su gran apoyo en la capacitación para el análisis de datos de radar Sentinel-1.

El equipo que trabajó y contribuyó directamente en esta publicación se conforma por las siguientes personas:

Dirección General de Geomática:

Dr. Rainer Andreas Ressler

DIRECTOR GENERAL DE GEOMÁTICA

Subcoordinación de Percepción Remota (SPR):

Dra. María Isabel Cruz López

SUBCOORDINADORA DE PERCEPCIÓN REMOTA

Equipo de trabajo del SMMM

M. en C. María Teresa Rodríguez Zúñiga

Biól. Samuel Velázquez Salazar

Biól. Edgar Villeda Chávez

M. en A. E. G. José Alberto Alcántara Maya

Dr. Luis Humberto Valderrama Landeros
 Dr. Carlos Humberto Troche Souza
 Biól. Berenice Vázquez Balderas

Bio-conectividad

M. en C. Iliana Pérez Espinosa

Grupo de trabajo de realidad virtual

Pas. de Biól. Genghis de la Borbolla del Valle
 M. en C. Alicia Verónica Aguilar Sierra
 C. Oscar Arturo Rodríguez Paz
 Dr. Florian Christoph Hruby
 Pas. de la Lic. de Física Jorge Humberto Muñoa Coutiño

Colaboradores de la Dirección General de Geomática de la CONABIO que apoyaron con los trabajos de gestión de imágenes y publicación de datos:

Pas. Geog. Margarita Ascención Merino

Geóg. José Manuel Dávila Rosas

SUBCOORDINADOR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Mat. Julián Javier Colín López

Geóg. Verena Ekaterina Benítez Ramírez

Lic. Roberto Díaz Bernal

Personas e instituciones que han colaborado con el SMMM para consulta en zonas de incertidumbre en la clasificación de manglar, capacitación para el procesamiento de datos de radar, trabajo de campo y toma de datos en las unidades de muestreo:

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Biol. José Carlos Pizaña Soto

DIRECTOR REGIONAL, PLANICIE COSTERA Y GOLFO DE MÉXICO

M. en C. Martha López Hernández

DIRECTORA DEL APFF LAGUNA MADRE Y DELTA DEL RIO BRAVO

Biol. David Lerma Quiroga

APFF LAGUNA MADRE Y DELTA DEL RIO BRAVO

Biól. Felipe Ángel Omar Ortiz Moreno

DIRECTOR DEL COMPLEJO SIAN KA'AN

M. en P. Eduardo Chaires Montesinos

COMPLEJO SIAN KA'AN

M. en C. Oscar Guzmán Escalante

COMPLEJO SIAN KA'AN

The University of Texas

Dr. Alejandro Fierro

PROFESOR ASOCIADO, RIO GRANDE VALLEY

Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Dr. Alexander Ariza

JEFE DE LA OFICINA DEL CIAF

M. en G. Carlos Andrés Franco Prieto

COORDINADOR EXPERTO DEL CIAF

M. en G. Nelson Andrés Nieto Valencia

PROFESIONAL EXPERTO ESPECIALISTA EN PERCEPCIÓN REMOTA

Victoria Daniela Camacho Ochoa

PROFESIONAL EXPERTO ESPECIALISTA EN PERCEPCIÓN REMOTA

UASMéxico

M. en C. Augusto Humberto Segovia Castillo

DIRECTOR GENERAL DE UASMÉXICO

Asociación Territorios Vivos México, A. C.

Biól. Marcela Espinosa Garduño

El Colegio de la Frontera Sur

Dr. Cristian Tovilla Hernández

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA SUSTENTABILIDAD

Instituto de Ecología, A. C.

Dr. Jorge Alejandro López Portillo Guzmán

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA FUNCIONAL

Dra. Patricia Moreno Casasola Barceló

DEPARTAMENTO DE ECOLOGÍA FUNCIONAL

El Colegio de Veracruz

Dr. Hugo López Rosas

ACADEMIA DE DESARROLLO REGIONAL SUSTENTABLE

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida

Dr. Jorge Alfredo Herrera Silveira

DEPARTAMENTO DE RECURSOS DEL MAR

Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Claudia Teutli Hernández

CAMPUS SISAL, DEPARTAMENTO DE MANEJO DE ZONAS COSTERAS

Universidad Autónoma de Campeche

Dra. Claudia Maricusa Agraz Hernández

INSTITUTO DE ECOLOGÍA, PESQUERÍAS Y OCEANOGRAFÍA
DEL GOLFO DE MÉXICO

Universidad Autónoma de Sinaloa

Dra. Mercedes Marlenne Manzano Sarabia

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

Pro Manglares

M. en C. Sarahi Selene Carbajal Evaristo

PROYECTO DE ASESORES PARA LA SUSTENTABILIDAD COSTERA A. C.

FOTÓGRAFOS

Abreviatura	Nombre
A.O.O.M.	Ángel Omar Ortiz Moreno
A.H.S.C.	Augusto Humberto Segovia Castillo
C.T.H.	Cristian Tovilla Hernández
C.T.S.	Carlos Troche Souza
E.V.C.	Edgar Villeda Chávez
J.A.A.M.	José Alberto Alcántara Maya
J.D.G.	José Díaz Gallegos
N.V.	Nathan Velasco
S.V.S.	Samuel Velázquez Salazar

Este libro tiene como propósito difundir la información generada en el marco del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM) hasta la fecha de actualización de la cartografía más reciente en 2020 y que se elabora cada cinco años. Se presentan mapas y estadísticas estatales y nacionales sobre distintos aspectos de los manglares mexicanos. En esta ocasión, uno de los aspectos más sobresalientes fue el uso de nuevos insumos satelitales y las implicaciones que representa este cambio, así como las técnicas novedosas integradas al SMMM, que, aunadas a una fuerte retroalimentación interinstitucional, permitieron mejorar la detección del ecosistema en zonas con alta incertidumbre.

También se presentan los avances más notables de algunas de las líneas de investigación, incorporación de nuevas tecnologías de obtención de datos, su uso en la caracterización de manglares y casos de estudio con relevancia en la actualización de 2020, con el propósito de presentar a la comunidad interesada puntos de partida para desarrollar investigaciones de mayor profundidad a nivel local o regional.

Finalmente, se presentan las distintas plataformas donde se publican y pueden ser consultados los datos del SMMM.

Página web SMMM

<https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/smmm>



Geovisualización

<https://www.biodiversidad.gob.mx/region/geoviz>



Atlas de Naturaleza y Sociedad

<https://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/manglar/>



Geoportal

<http://geoportal.conabio.gob.mx/>

