

Investigación transdisciplinaria sobre cambio global en el sureste de México

Por José Guadalupe; Mercedes; Gema Chan Quijano; Andrade Velázquez;
Hidalgo Rodríguez (coords.)

CANTIDAD DE PALABRAS 141717

HORA DE ENTREGA

25-MAR-2025 12:57P. M.

NÚMERO DE
IDENTIFICACIÓN DEL
TRABAJO

115352124

Investigación transdisciplinaria sobre cambio global en el sureste de México

José Guadalupe Chan Quijano

Mercedes Andrade Velázquez

Gema Hidalgo Rodríguez

(coordinadores)

Índice

Prologo

Francisco Javier Álvarez Sánchez

Apartado 1. Aplicaciones metodológicas y tecnológicas en estudios de cambio climático

Mercedes Andrade Velázquez

1. *Transformación de enfoques multidisciplinarios a transdisciplinarios en el estudio de fenómenos climáticos y su impacto socioambiental en el sureste de México*

Martín José Montero Martínez

2. *Vulnerabilidad social y percepciones sobre el cambio climático: estudio de caso en Yucatán*

Denise Soares y Ricardo Víctor López Mera

3. *Confort térmico nocturno en viviendas de la ciudad de Villahermosa, Tabasco ante escenarios de cambio climático*

Christopher Lionel Heard y Sazcha Marcelo Olivera Villarroel

4. *Una introducción de la modelación climática y los escenarios de cambio climático*

Mercedes Andrade Velázquez

5. *Más allá de los mapas: la información geoespacial como herramienta para entender el cambio global*

Candelario Peralta Carreta y Gladis Yanet Martínez-Martínez

6. *Indicadores de arribazón de sargazo por medio del uso de drones*

Oscar Frausto Martínez, Linda Rachel Martell Hernández, José Francisco Rodríguez Castillo, Sergio Esteban De León López y Jonathan Alfredo Solís Sánchez

Apartado 2. Perspectivas del desarrollo sostenible en socioecosistemas y cambio climático

José Guadalupe Chan Quijano

7. *Un modelo para analizar la cuenca del río Usumacinta como sistema complejo*

Fernando Tudela, Julia Carabias Lillo, María Zorrilla, Jonathan V. Solórzano Villegas

8. *Transformando territorios: caminos hacia el desarrollo sostenible en Marqués de Comillas, Selva Lacandona, Chiapas*

Julia Carabias Lillo, Elisa Castro

9. *Sostenibilidad alimentaria rural frente al cambio climático: estrategias agroecológicas para el manejo del maíz*

Manuel Jesús Cach Pérez y María Guadalupe Carrillo Galván

10. *Soluciones basadas en la naturaleza en los humedales de los Pantanos de Centla ante el cambio climático*

Leonardo Noriel López Jiménez y Adriana Rodríguez Jiménez

11. *Servicios ambientales de las especies arbóreas de Paseo Tabasco y el Parque la Pólvara, en la ciudad de Villahermosa, Tabasco*

Lucía Sanaphre Villanueva, Candelario Peralta Carreta, Ofelia Castillo Acosta y Francisco Javier Álvarez Sánchez

12. *Desafíos en la gestión del agua de Tabasco: un análisis desde la geopolítica hídrica*

Lilia Gama Campillo, Coral Jazvel Pacheco-Figueroa, Ena Edith Mata-Zayas, Juan de Dios Valdez Leal, Eduardo Javier Moguel Ordoñez e Hilda María Díaz López

Apartado 3. Enfoque transdisciplinario y estudios en zonas costeras

Gema Hidalgo Rodríguez

13. Eutrofización cultural y el fitoplancton desde la transdisciplina en el sureste mexicano: esfuerzos del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C.

Karina Esqueda Lara

14. Restauración de los humedales costeros y la recuperación de los servicios ambientales en América

Rodrigo M. Villanueva Meza y José Guadalupe Chan Quijano

15. Análisis transdisciplinario de los efectos del cambio climático en los socio-ecosistemas costeros de Campeche

Evelia Rivera Arriaga, Angelina del Carmen Peña Puch, Beatriz Edith Vega Serratos, Gregorio Posada Vanegas y Yassir Edén Torres Rojas

16. Perspectiva transdisciplinaria y bases ecológicas hacia el uso sostenible de los sistemas costeros frente al cambio global: observatorio para la resiliencia en Tabasco, México

Gema Hidalgo Rodríguez y José Guadalupe Chan Quijano

17. Estructura de Demospongiae sugiere calidad del área bentónica en la línea de costa oeste de Cozumel, México

Gregorio De la Cruz Uc, Martha Angélica Gutiérrez Aguirre y Adrián Cervantes Martínez

Acerca de los autores

Prólogo

En diciembre de 2021, al postularme como candidato a ocupar la Dirección General del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C., comenté en mi plan de trabajo algunas cuestiones que me parece siguen siendo vigentes y deseo retomar parcialmente.

El deterioro que está sufriendo el planeta como consecuencia de las actividades humanas se les conoce como cambio global, “porque pueden ocurrir a nivel de todo el planeta, por la alteración de los sistemas de fluidos de la atmósfera, como los cambios en el clima o la destrucción de la capa de ozono, o bien a través de cambios en sitios discretos, pero ampliamente distribuidos como el cambio de uso de suelo y la pérdida de la biodiversidad. Ante esto, han surgido diferentes iniciativas que buscan evaluar el estado actual del ambiente”, como los servicios ambientales que proveen, o proponer lo que se conoce como soluciones basadas en la naturaleza.

“Las consecuencias de rebasar los límites planetarios comprometen la equidad social y el bienestar humano y se traducen en retos o desafíos sociales que la humanidad está enfrentando como consecuencia de dicho cambio global, generando varios desafíos. La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), señala que estos desafíos son: 1) la seguridad hídrica, 2) la seguridad alimentaria, 3) el cambio climático, 4) el riesgo a desastres, 5) la salud, 6) y el desarrollo económico y social”.

“En el trópico mexicano, la conversión de paisajes naturales por actividades agrícolas, ganaderas, de extracción de recursos maderables y construcción de viviendas e infraestructura, han provocado un cambio de uso de suelo. Ello tiene impacto en los socioecosistemas tropicales, incluyendo la deforestación, la transformación de humedales, afectaciones en la biodiversidad y en las propiedades del suelo. Esta degradación de los socioecosistemas tropicales es generalizada, por lo que se requieren acciones inmediatas, de largo plazo, para frenar y/o mitigar su deterioro”. En una zona con gran disponibilidad de recursos hídricos amenazados, su gestión apropiada es inaplazable.

En ese contexto, los que trabajamos y hemos buscado contribuir para mejorar tan complejo panorama en las instituciones de Investigación y de Educación Superior, tenemos la obligación y la responsabilidad de generar conocimiento, de formar recursos humanos que cuenten con los conocimientos, herramientas, capacidades tecnológicas que les permitan

insertarse en la sociedad para contribuir en el desarrollo sustentable y bienestar de las mismas, contribuyendo si es posible en la generación de políticas públicas. Este libro es una clara contribución en ese sentido.

Este libro integra experiencias, datos, herramientas, indicadores, modelos, escenarios, así como algunos estudios de caso que contribuirán a entender los efectos del cambio global desde varias perspectivas, e incluso a proponer soluciones para manejarlos con un contexto multi y transdisciplinario siempre con fines de alcanzar un desarrollo sustentable. Para ello, se requería conjuntar los conocimientos sobre los temas abordados y la experiencia con la región y asociaciones que han trabajado intensamente en el sureste del país; así, los coordinadores de la obra lograron conjuntar a 43 investigadores de 12 instituciones de investigación y educación superior, así como de tres asociaciones civiles con reconocido prestigio en la zona. Celebro la publicación de este tipo de publicaciones que ayudarán en mucho no solamente a entender cómo son y funcionan los socioecosistemas, sino a atender y proponer soluciones de los delicados problemas ambientales en el trópico mexicano.

Dr. Francisco Javier Álvarez Sánchez
Encargado de Despacho de la Dirección General
Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C.
Coordinador
Centro de Investigación sobre el Cambio Global
CIC-UPEID-UNAM

Apartado 1. Aplicaciones metodológicas y tecnológicas en estudios de cambio climático

Mercedes Andrade Velázquez

La investigación científica en México es un tema aún pendiente de fortalecer, ha habido diferentes corrientes ideológicas que han buscado cubrir este vacío. Sin embargo, no existen logros amplios e integrales, sino esfuerzos aislados que sí han tenido resultados favorables. Pero ahora, México, se encuentra en proceso de cambio ideológico en la administración pública y por ende al correspondiente a la ciencia. Con ello, se ha alcanzado el objetivo de crear la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti).

La cuál es equiparable a sus homologas en otras naciones como son Estados Unidos de América y otros países en Europa. Esto permitirá fortalecer y crecer en varias áreas del conocimiento científico, entre ellas las abocadas en el estudio del Cambio Climático y sus efectos. El presente apartado de este libro hace un recorrido entre los esfuerzos de la investigación científica que se lleva a cabo por diferentes disciplinas, las cuáles se pueden manejar entre interdisciplina, multidisciplina y/o transdisciplina, por ejemplo, Martín Montero presenta su visión sobre este tema en el capítulo 1.

Mientras que Denise Soares y Ricardo López comparten el estudio sobre “Vulnerabilidad social y percepciones sobre el cambio climático: estudio de caso en Yucatán” mediante en el capítulo 2, mostrando el enfoque social ante la problemática ante el Cambio Climático. En el capítulo 3, tenemos el aporte Christopher Lionel y Satzcha Olivera un ejemplo de eficientar el uso de energía eléctrica en hogares en Villahermosa, particularmente en el uso de aires acondicionados, equipos domésticos relevantes para la región tropical.

Estos nos dan un panorama de la importancia de la ciencia en actividades diarias. No obstante, la ciencia también contribuye al desarrollo y uso de tecnología, en el capítulo 4, “Una introducción de la modelación climática y los escenarios de cambio climático”, se define y se narra el desarrollo de estos modelos, su importancia en México y los ejemplos de información sobre cambio climático generada para el sureste del país. También se puede emplear otras herramientas como son los sistemas de información geográfica, que nos presenta Candelario Peralta y Gladys Martínez Martínez en el capítulo 5, donde resaltan la importancia y el avance de tecnología asociada a los sistemas de información geográfica y su procesamiento para aplicaciones en solución de problemas.

Por último, Oscar Frausto y colaboradores, presentan el estudio “Indicadores de arribazón de sargazo por medio de uso de drones” llevado a cabo en la isla de Cozumel mediante el empleo de drones y cómo estos proveen información relevante para el manejo y conservación de ecosistemas, cuya información se cuantifica para la creación de indicadores. Es por ello, por lo que el primer apartado nos lleva entre enfoques disciplinares de la ciencia y sus aplicaciones sobre el cambio climático en el sureste de México, por la investigación actualizada e innovadora en diferentes instituciones académicas que contribuyen al fortalecimiento del conocimiento local y regional en el sureste del país.

Capítulo 1. Transformación de enfoques multidisciplinarios a transdisciplinarios en el estudio de fenómenos climáticos y su impacto socioambiental en el sureste de México

Martín José Montero Martínez*

Resumen

El capítulo aborda la transformación de enfoques multidisciplinarios a transdisciplinarios en el estudio de fenómenos climáticos y su impacto socioambiental en el sureste de México. El trabajo parte de la confusión existente entre los términos multidisciplinariedad, interdisciplinariedad y transdisciplinariedad en la investigación, destacando la importancia de clarificar estas definiciones para su correcta aplicación en proyectos complejos. La multidisciplinariedad implica la colaboración de diversas disciplinas que trabajan en paralelo sin integrar sus perspectivas. La interdisciplinariedad, en cambio, busca sintetizar y armonizar estas perspectivas en un esfuerzo coordinado. La transdisciplinariedad trasciende estas fronteras al integrar completamente las ciencias naturales, sociales y de la salud en un contexto humanístico, involucrando también a actores no académicos como comunidades y grupos de interés. El capítulo se centra en dos proyectos recientes financiados por CONAHCyT: "Impactos socioambientales del cambio climático en la cuenca del Río Conchos y del Río Usumacinta" y "Análisis y proyección de inundaciones y sequías en la cuenca Grijalva-Usumacinta". Ambos proyectos se analizaron desde enfoques multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios para evaluar cómo estas perspectivas influyen en los resultados y la utilidad para abordar problemas socioambientales. Los resultados destacan que el enfoque multidisciplinario permite la colaboración de expertos de diferentes disciplinas, pero sin una integración profunda. El enfoque interdisciplinario, por su parte, facilita una comprensión más completa al integrar métodos y conceptos de diversas disciplinas. Finalmente, el enfoque transdisciplinario, que incluye la participación de comunidades locales y actores gubernamentales, permite elaborar soluciones prácticas y aceptadas por los directamente impactados. El análisis concluye que

* Doctor en Ciencias de la Atmósfera. Subcoordinación de Eventos Extremos y Cambio Climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6243-5267>

la clave para abordar los desafíos climáticos y socioambientales radica en la capacidad de estos enfoques para interactuar y complementarse, proporcionando una respuesta holística a los problemas complejos. Ejemplos concretos de esta colaboración incluyen talleres virtuales y publicaciones científicas que reflejan los diferentes niveles de integración y cooperación entre las disciplinas y los actores involucrados.

Palabras clave: *multidisciplina, fenómenos climáticos, impacto socioambiental, sureste de México.*

Introducción

Aún persiste cierta confusión en la identificación de los enfoques de multidisciplinariedad, interdisciplinariedad y transdisciplinariedad en los proyectos de investigación que involucran diferentes disciplinas. Esta confusión se debe, en parte, a la superposición y la falta de claridad en las definiciones y aplicaciones prácticas de estos términos. Mientras que la multidisciplinariedad implica la colaboración de diversas disciplinas que trabajan en paralelo sin integrar sus perspectivas más allá de sus fronteras individuales, la interdisciplinariedad va un paso más allá al sintetizar y armonizar estas perspectivas en un esfuerzo coordinado. La transdisciplinariedad, por otro lado, trasciende estas fronteras al integrar completamente las ciencias naturales, sociales y de la salud en un contexto humanístico. Esta falta de claridad puede llevar a malentendidos y dificultades en la implementación efectiva de estos enfoques en proyectos que buscan abordar problemas complejos y multifacéticos, afectando tanto la metodología como los resultados obtenidos.

El objetivo de este trabajo es analizar, desde los enfoques disciplinarios, las metodologías de dos proyectos recientes relacionados con el clima y sus impactos socioambientales en el sureste de México. La intención es concientizar sobre cómo la posible diferencia en los enfoques específicos de cada uno de los proyectos influye en los productos y problemas que logran resolver, y evaluar su utilidad para la componente socioambiental. Los proyectos para analizar son "Impactos socioambientales del cambio climático registrados en la cuenca del Río Conchos y del Río Usumacinta de acuerdo con criterios del IPCC 2014" (que para simplificar será llamado aquí Proyecto Usumacinta) y "Análisis y proyección de inundaciones y sequías en la cuenca Grijalva-Usumacinta y evaluación de sus potenciales

impactos hidrológicos y socioambientales" (llamado aquí Proyecto Grijalva). Ambos proyectos fueron financiados por CONAHCyT.

Diferencias entre multidisciplina, interdisciplina y transdisciplina

Para comprender las diferencias entre multidisciplina, interdisciplina y transdisciplina, es importante analizar cómo cada enfoque aborda la colaboración entre disciplinas académicas y científicas.

Multidisciplina: este enfoque implica la participación de múltiples disciplinas que trabajan juntas, pero cada una permanece dentro de sus límites y marcos metodológicos propios. Los conocimientos se utilizan de manera aditiva sin que haya una integración profunda. Este enfoque es común en proyectos donde se requiere la suma de conocimientos específicos de cada disciplina para abordar un problema complejo, pero sin fusionar sus métodos y teorías (Kline, 1995; Choi y Pak, 2006).

Interdisciplina: aquí, las disciplinas no solo colaboran, sino que integran sus métodos, teorías y perspectivas para formar un todo coordinado y coherente. La interdisciplina busca la síntesis y la armonización de los conocimientos de diferentes disciplinas, creando nuevas formas de comprender y abordar problemas que ninguna disciplina podría resolver por sí sola (Newell *et al.*, 2001; van den Besselaar y Heimiricks, 2001; Hoffmann *et al.*, 2012).

Transdisciplina: este enfoque va más allá de la integración disciplinaria y busca crear un marco holístico que trascienda los límites tradicionales de las disciplinas. La transdisciplina integra conocimientos de las ciencias naturales, sociales y humanas en un contexto amplio, incluyendo la perspectiva de actores no académicos, como comunidades y grupos de interés, para abordar problemas del mundo real. Este enfoque es especialmente útil para problemas complejos y multifacéticos que requieren soluciones integrales y colaborativas (Klein, 2008; Möbjörk, 2010).

El término "multidisciplina" en el contexto científico se refiere a un enfoque de investigación y resolución de problemas que involucra la colaboración de múltiples disciplinas, cada una contribuyendo desde su propia perspectiva y marco metodológico, sin necesariamente integrar sus teorías o métodos. Este concepto ha ganado prominencia en la investigación científica y en las políticas de ciencia desde mediados del siglo XX, en respuesta a la creciente complejidad de los problemas que requieren enfoques diversos y conocimientos

especializados. La multidisciplina se ha destacado en campos como la investigación en salud, donde equipos compuestos por expertos de diversas áreas trabajan juntos para abordar problemas complejos desde diferentes ángulos, pero manteniendo las fronteras disciplinarias claras (Choi y Pak, 2006; Alvargonzález, 2011).

Las ideas de interdisciplinariedad y transdisciplinariedad han sido ampliamente aplicadas a la relación entre las ciencias. Alvargonzález (2011) intenta discutir las razones por las cuales la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad científicas plantean problemas específicos. En primer lugar, se consideran ciertas cuestiones terminológicas para aclarar el significado de la palabra "disciplina" y sus términos relacionados. En segundo lugar, argumenta que la especificidad de las ciencias no reside en convertirse en disciplinas. Luego, sostiene que la multidisciplinariedad y la interdisciplinariedad son prácticas comunes entre las ciencias exactas y las tecnologías. Finalmente, se discute los diferentes significados de la transdisciplinariedad cuando se aplica a las ciencias. Las diferencias entre los diferentes enfoques mencionados arriba de acuerdo con el análisis realizado para los dos proyectos en cuestión se muestran en el Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Diferencias entre los enfoques multidisciplinario, interdisciplinario y transdisciplinario. Información adaptada y simplificada de la Tabla 1 de Henao Villa *et al.*, (2017).

<i>Multidisciplinario</i>	<i>Interdisciplinario</i>	<i>Transdisciplinario</i>
Colaboración con varias disciplinas	Colaboración entre varias disciplinas	Colaborando a través de y más allá de varias disciplinas
Metas individuales por disciplina	Metas compartidas	Objetivos y competencias comunes
Los miembros mantienen sus propias funciones disciplinarias	Los miembros comparten algunos aspectos de sus funciones disciplinarias, pero aún conservan fundamentos específicos de la disciplina	Los miembros desarrollan un marco conceptual compartido que conecta la base con su disciplina particular

No se preocupan por las fronteras disciplinarias	Eliminación de las fronteras disciplinarias	Trascender los límites de la disciplina
Metodologías separadas	Metodologías comunes	Metodologías que se basan en lo transversal

A continuación, se presenta un análisis de enfoque de los dos proyectos mencionados para el presente trabajo.

Análisis de enfoque del proyecto Usumacinta

Enfoque multidisciplinario

El enfoque multidisciplinario implica que varios expertos de diferentes disciplinas trabajen en paralelo, abordando el problema desde sus propias perspectivas sin necesariamente interactuar entre sí.

Componentes identificados:

1. Climático:

- Análisis de variables climáticas (temperatura de superficie y precipitación).
- Seguimiento de las recomendaciones del Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés).
- Creación de bases de datos climáticas y análisis de tendencias históricas.

2. Ambiental:

- Gestión sostenible del agua y sus impactos en el ecosistema.
- Cuantificación de variaciones en precipitación y escorrentías.
- Impactos en la agricultura debido a condiciones climáticas contrastantes.

3. Social:

- Relación entre eventos meteorológicos extremos y cambios en asentamientos poblacionales y actividades productivas.
- Estudios de caso en comunidades específicas.
- Estrategia de difusión sobre vulnerabilidad social y alternativas frente al cambio climático.

Análisis Multidisciplinario

Cada componente se puede analizar por separado por expertos en climatología, ecología, agricultura y ciencias sociales. Cada grupo trabajará en sus áreas específicas, aportando su conocimiento sin necesariamente interactuar con las otras disciplinas.

Enfoque interdisciplinario

El enfoque interdisciplinario implica la colaboración entre disciplinas para integrar sus métodos y conceptos, generando una síntesis y una comprensión más completa del problema.

Componentes integrados:

1. Climático y ambiental:

- El análisis de las variables climáticas no solo se realiza para detectar cambios, sino para entender sus impactos en la hidrología y los ecosistemas.
- Los cambios en las precipitaciones y las temperaturas son estudiados en conjunto con sus efectos en la disponibilidad de agua y la salud de los ecosistemas riparios.

2. Climático y agrícola:

- Los índices agroclimáticos se utilizan para evaluar la aptitud agrícola de las cuencas, integrando datos climáticos con prácticas agrícolas y producción.

3. Ambiental y social:

- La gestión del agua se relaciona con las necesidades y las estrategias de adaptación de las comunidades locales.
- Se estudian los impactos socioeconómicos de las alteraciones hidrológicas y climáticas en las poblaciones y sus actividades productivas.

Análisis interdisciplinario

Los equipos de climatología, ecología y ciencias sociales deben trabajar juntos, intercambiando datos y ajustando sus análisis para considerar los impactos combinados. La colaboración es clave para entender cómo los cambios climáticos afectan los sistemas naturales y humanos de manera integrada.

Enfoque transdisciplinario

El enfoque transdisciplinario va más allá de la integración disciplinaria, involucrando a los actores no académicos (como las comunidades locales, los gobiernos y las organizaciones no gubernamentales) en el proceso de investigación para co-crear conocimiento y soluciones.

Componentes involucrados

1. Participación comunitaria

- Las percepciones y estrategias de adaptación de las comunidades locales son cruciales.
- Estudios de caso y consultas con las comunidades de las cuencas del río Conchos y Usumacinta para documentar sus experiencias y conocimientos locales.

2. Gobernanza y políticas públicas

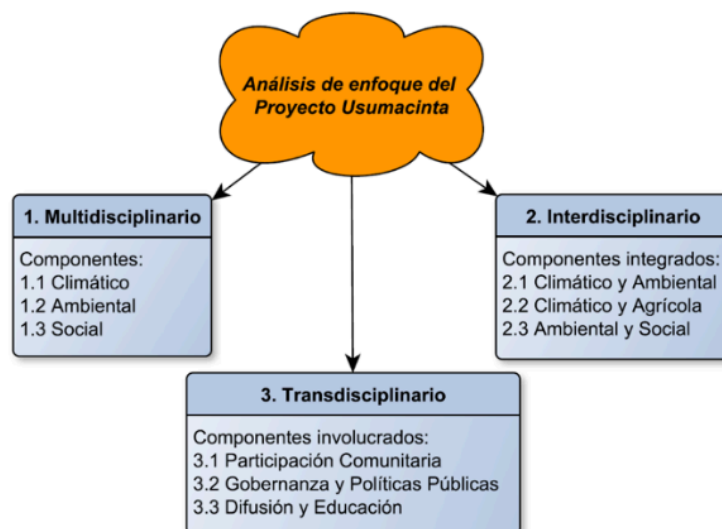
- Involucrar a los responsables de la gestión de recursos hídricos en México y los países vecinos.
- Considerar los marcos legales y las políticas internacionales (como el Tratado de Aguas Internacionales de 1944).

3. Difusión y educación:

- Desarrollar estrategias de comunicación para aumentar la conciencia pública sobre los impactos del cambio climático.
- Fomentar la participación de la sociedad en la gestión de los recursos y en la adopción de medidas de adaptación.

Análisis transdisciplinario: se requiere un esfuerzo colaborativo que incluya a científicos, autoridades gubernamentales y miembros de las comunidades afectadas. La producción de conocimiento y estrategias asegura que las soluciones sean prácticas y aceptadas por aquellos directamente impactados. La Figura 1.1 sintetiza la información del análisis de enfoque del proyecto Usumacinta.

Figura 1.1. Análisis de enfoque del proyecto Usumacinta y sus diferentes componentes identificados en cada rubro.



Análisis de enfoque del proyecto Grijalva

Enfoque multidisciplinario

Componentes identificados:

1. **Clima:**
 - Análisis y proyección de variables climáticas.
 - Evaluación de modelos climáticos y cálculos de índices climáticos.
2. **Hidrología:**
 - Modelación hidrológica.
 - Análisis de caudales, calidad del agua y zonas de inundación.
3. **Social:**
 - Análisis de percepciones sociales y resiliencia comunitaria.
 - Estrategias de adaptación socioeconómica.
4. **Calidad del agua:**
 - Evaluación de la calidad del agua en diferentes sitios piloto.
5. **Ordenamiento territorial:**
 - Modelación y planificación del uso del suelo.

Análisis multidisciplinario: cada módulo trabaja de manera independiente para abordar sus objetivos específicos. Los expertos en climatología, hidrología, ciencias sociales, calidad del agua y ordenamiento territorial aplican sus propias metodologías y generan datos y análisis relevantes que, aunque valiosos, no necesariamente se integran de manera profunda con los hallazgos de otras disciplinas.

Enfoque interdisciplinario

Descripción del enfoque interdisciplinario

El enfoque interdisciplinario implica una colaboración más estrecha entre disciplinas, integrando métodos y conceptos para lograr una comprensión más completa del problema.

Componentes interdisciplinarios del proyecto

1. Clima e hidrología

- Uso de datos climáticos para modelar los impactos hidrológicos.
- Evaluación conjunta de eventos extremos y su relación con la variabilidad climática.

2. Social e hidrología

- Análisis de cómo las variaciones hidrológicas afectan a las comunidades locales.
- Evaluación de la resiliencia comunitaria basada en datos hidrológicos y climáticos.

3. Calidad del agua y ordenamiento territorial

- Integración de la calidad del agua en la planificación del uso del suelo.
- Evaluación de cómo las prácticas de uso del suelo afectan la calidad del agua.

Análisis interdisciplinario

Los equipos trabajan juntos, intercambiando datos y ajustando sus análisis para considerar los impactos combinados. La colaboración entre disciplinas permite entender cómo los cambios en un área (como el clima) afectan a otras (como la hidrología y la sociedad), generando un conocimiento más integrado y aplicable a la gestión de riesgos.

Enfoque transdisciplinario

Descripción del enfoque transdisciplinario

El enfoque transdisciplinario va más allá de la integración disciplinaria, involucrando a actores no académicos (como comunidades locales, gobiernos y ONGs) en el proceso de investigación para co-crear conocimiento y soluciones.

Componentes transdisciplinarios del proyecto

1. Participación comunitaria

- Incorporación de las percepciones y estrategias de adaptación de las comunidades locales.
- Estudios de caso en comunidades específicas para documentar sus experiencias y conocimientos locales.

2. Gobernanza y políticas públicas

- Involucrar a las autoridades en la gestión de recursos hídricos y planificación territorial.
- Desarrollo de políticas públicas basadas en evidencia científica y conocimiento local.

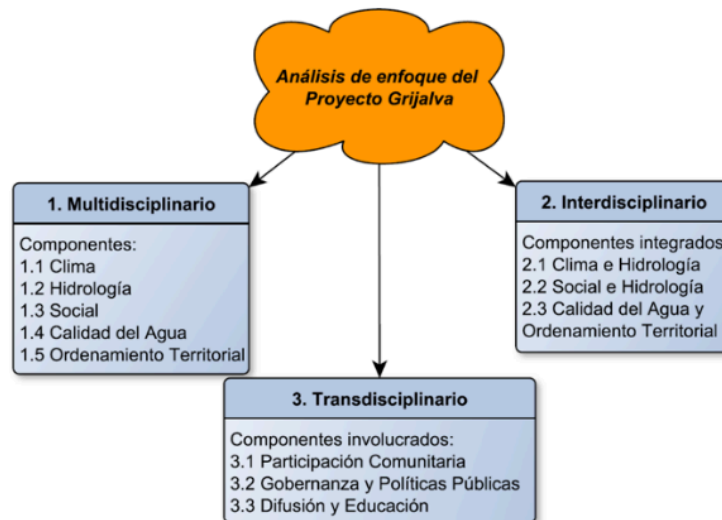
3. Difusión y educación:

- Estrategias de comunicación para aumentar la conciencia pública sobre los impactos del cambio climático.
- Fomentar la participación de la sociedad en la gestión de recursos y adaptación a nuevos desafíos climáticos.

Análisis transdisciplinario

Se fomenta la colaboración entre científicos, autoridades gubernamentales y miembros de la comunidad para co-crear soluciones prácticas y aceptadas por aquellos directamente impactados. Este enfoque asegura que el conocimiento generado sea relevante y aplicable, fortaleciendo la resiliencia comunitaria y mejorando la gestión de riesgos. La Figura 1.2 sintetiza la información del análisis de enfoque del proyecto Usumacinta.

Figura 1.2. Análisis de enfoque del proyecto Grijalva y sus diferentes componentes identificados en cada rubro.



Conclusiones

El proyecto Usumacinta puede ser analizado de manera efectiva utilizando enfoques multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios. Cada uno ofrece diferentes niveles de integración y colaboración, desde la suma de conocimientos especializados hasta la producción de soluciones con la participación de las comunidades y otros actores relevantes. La clave para el éxito radica en la capacidad de estos enfoques para interactuar y complementarse, proporcionando una comprensión y respuesta holística al desafío del cambio climático en las cuencas del río Conchos y Usumacinta. De acuerdo con los productos generados por el proyecto Usumacinta, se pueden dar ejemplos claros de que se contribuyó a cada uno de los tres enfoques analizados.

Multidisciplinario

- Artículo científico sobre la comparación de índices de cambio climático entre dos cuencas México, una al norte (árida) y otra al sur (húmeda) durante las últimas décadas (Montero-Martínez *et al.*, 2018).

Interdisciplinario

- Artículo científico sobre los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua para el caudal ambiental del río Usumacinta (González-Villela y Montero Martínez, 2018).
- Artículo científico sobre los efectos del cambio climático sobre los caudales ambientales en el Río Conchos (González-Villela *et al.*, 2018).

Transdisciplinario

- Libro titulado “La cuenca del Río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático” (Soares y García, 2017). Aquí se trataron temas relacionados a los enfoques transdisciplinario e interdisciplinario y participaron múltiples investigadores e investigadoras a nivel nacional.
- Libro titulado “La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático” (Montero-Martínez e Ibáñez-Hernández, 2017). De la misma forma los capítulos estuvieron relacionados a enfoques interdisciplinarios y transdisciplinarios.
- Se realizaron una serie de talleres y reuniones con estudiantes, miembros de asociaciones productivas (agricultores y ganaderos) y actores clave a nivel estatal. Esta actividad estuvo liderada por los investigadores del módulo social en ambas cuencas.

Por otro lado, el proyecto Grijalva se enriquece con enfoques multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios. Cada uno proporciona distintos niveles de integración y cooperación, abarcando desde la combinación de conocimientos especializados hasta la creación conjunta de soluciones con la participación de las comunidades y otros actores clave. El éxito depende de la capacidad de estos enfoques para interactuar y complementarse, ofreciendo una comprensión y una respuesta integral a los desafíos de inundaciones y sequías en la cuenca Grijalva-Usumacinta.

El objetivo principal de este proyecto semilla del Grijalva fue generar una propuesta multianual para la convocatoria de los Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia 2021 (mejor conocidos como PRONAI). Para ello, se decidió colaborar con otro proyecto semilla titulado “Modelo integral de restauración y conservación de servicios ecosistémicos para la cuenca baja del río Usumacinta”. La propuesta conjunta se denominó “Análisis y

proyección de inundaciones y sequías en la cuenca Grijalva-Usumacinta y evaluación de sus potenciales impactos hidrológicos y socioambientales para una estrategia de incidencia”.

Este esfuerzo se caracterizó por la colaboración de más de 30 investigadores provenientes de diversas disciplinas e instituciones. Aunque la propuesta final no fue aprobada por CONAHCyT, la experiencia brindó valiosas lecciones sobre la importancia y los desafíos de la colaboración interdisciplinaria y transdisciplinaria.

Un ejemplo concreto de esta colaboración fue la realización de un taller virtual en marzo de 2021 (adaptado a las restricciones impuestas por la COVID-19), que reunió a actores clave, académicos y comunitarios de la región de estudio (cuenca Grijalva-Usumacinta). Asistieron 28 personas, incluyendo al Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional, el Titular del Instituto de Protección Civil del Estado de Tabasco, el Subdirector de Riesgos por Fenómenos Hidrometeorológicos y la Subdirectora de Riesgos por Inundación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), representantes del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Tabasco, del Organismo de Cuenca Frontera Sur, de la Dirección Local de Conagua en Tabasco, de Conservación Biodiversidad Usumacinta, de la Secretaría de Bienestar, Sustentabilidad y Cambio Climático, un miembro del ejido/becario Sembrando Vida, del Colectivo GE y KA Asociados, profesionales independientes, residentes de Villahermosa, y académicos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, el Instituto Tecnológico Superior de Centla, la Universidad Intercultural del Estado de Tabasco, el Instituto Superior de Villa la Venta y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Además, 14 miembros del “staff técnico”, investigadores de los dos proyectos mencionados, apoyaron en la organización y logística del evento.

El objetivo principal del Taller fue compartir con los actores locales la propuesta de proyecto a presentar en el PRONAI y obtener su perspectiva sobre la gestión de riesgos. Este enfoque interdisciplinario y transdisciplinario permitió integrar conocimientos y experiencias diversas, enriqueciendo así la propuesta y fortaleciendo las redes de colaboración en la región.

Referencias

- Alvargonzález, D. (2011). Multidisciplinarity, interdisciplinarity, transdisciplinarity, and the sciences. *International Studies in the Philosophy of Science*, 25(4), 387–403. <https://doi.org/10.1080/02698595.2011.623366>
- Choi, B.C., y Pak, A.W. (2006). Multidisciplinarity, interdisciplinarity and transdisciplinarity in health research, services, education and policy: 1. Definitions, objectives, and evidence of effectiveness. *Clinical & Investigative Medicine*, 29(6).
- González-Villela, R., y Montero-Martínez, M.J. (2018). Effects of climate change on water availability for the Usumacinta river environmental flow (Mexico). *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 13(3), 469–481. <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N3-469-481>
- González-Villela, R., Montero-Martínez, M.J., y Santana-Sepúlveda, J.S. (2018). Effects of climate change on the environmental flows in the Conchos River (Chihuahua, Mexico). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.10.004>
- Henao-Villa, C.F., García-Arango, D.A., Aguirre-Mesa, E.D., González-García, A., Bracho-Aconcha, R., Solorzano-Movilla, J.G., y Arboleda-Lopez, A.P. (2017). Multidisciplinarietà, interdisciplinarietà y transdisciplinarietà en la formación para la investigación en ingeniería. *Revista Lasallista de Investigación*, 14(1), 179–197. <https://doi.org/10.22507/rli.v14n1a16>
- Hoffmann, M.H.G., Schmidt, J.C., y J. Nersessian, N. (2013). Philosophy of and as interdisciplinarity. *Synthese*, 190, 1857–1864. <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0214-8>
- Klein, J.T. (2008). Evaluation of interdisciplinary and transdisciplinary research: a literature review. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(2), S116–S123. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.05.010>
- Kline, S. (1995). *Conceptual Foundations for Multidisciplinary Thinking*. Redwood City: Stanford University Press. <https://doi.org/10.1515/9780804763936>
- Mobjörk, M. (2010). Consulting versus participatory transdisciplinarity: A refined classification of transdisciplinary research. *Futures*, 42(8), 866–873.

- Montero-Martínez, M.J., e Ibáñez-Hernández, O.F. (2017) (coords.). *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jiutepec.
- Montero-Martínez, M.J., Santana-Sepúlveda, J.S., Pérez-Ortiz, N.I., Pita-Díaz, O., Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades, *Adv. Sci. Res.*, 15, 231–237. <https://doi.org/10.5194/asr-15-231-2018>
- Newell, W.H., (2001). A theory of interdisciplinary studies. *Issues in Integrative Studies*, 19, 1–25.
- Soares, D., y García, A. (2017) (coords.). *La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Soares de Moraes, D.F., y Montero Martínez, M.J. (2023). El cambio climático en Emiliano Zapata, Tabasco. Un acercamiento entre las ciencias sociales y atmosféricas. En González-Sosa, E., y Pineda-Martínez, L.P. (coords.), *La red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos y la atención de los problemas nacionales estratégicos* (pp. 274-298). Santiago de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- van den Besselaar, P., y Heimeriks, G. (16 al 20 de julio de 2001). *Disciplinary, multidisciplinary, interdisciplinary: concepts and indicators* [ponencia oral]. 8th Conference on Scientometrics and Informetrics, Sydney, Australia.

Capítulo 2. Vulnerabilidad social y percepciones sobre el cambio climático: estudio de caso en Yucatán

Denise Soares* y Ricardo Víctor López Mera

Resumen

En esta contribución se comparte un análisis del concepto de vulnerabilidad social, retomando los referentes teóricos esenciales de los principales autores expertos en la materia. Aunado a ello se presenta los resultados de un estudio de caso sobre percepciones asociadas al cambio climático, realizado con actores sociales del municipio de San Felipe, en la costa de Yucatán, México. La metodología empleada conjuga el método cualitativo con el cuantitativo, efectuando la aplicación de entrevistas y encuestas como complementarias para la obtención de información empírica. Con los resultados encontrados se hace patente el poco conocimiento sobre el concepto de cambio climático y el escaso acceso a la capacitación sobre el tema, impactando directamente en las estrategias de adaptación emprendidas a nivel local. Se resalta la percepción positiva acerca de la gestión de las autoridades municipales ante eventos hidrometeorológicos extremos. Se concluye aseverando que articular la vulnerabilidad con percepciones sobre cambio climático en territorio, permite diseñar una ruta analítica para reflexionar sobre alternativas orientadas a mejorar la adaptación al cambio climático a nivel local.

Palabras clave: *vulnerabilidad social, percepciones, cambio climático.*

3

Introducción

El cambio climático es uno de los más grandes retos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. La modificación del clima se expresa a través del incremento en la temperatura media global de entre 0.8 y 1.2 °C por arriba de los niveles preindustriales, con proyecciones que estiman un incremento hasta de 1.5 °C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2018). Ello tendrá como consecuencia el incremento en cantidad e intensidad de fenómenos como sequías, lluvias, huracanes, olas de calor, frentes fríos, derivados, entre otros factores, del incremento del nivel

* Doctora en Antropología Social. Investigadora en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1811-0139>

¹⁸ del mar, el calentamiento de la atmósfera y el océano, y la reducción de los volúmenes de nieve y hielo en los polos (Gran Castro, 2022).

El origen del cambio climático es atribuible a la generación de emisiones antropogénicas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI), los cuales han alcanzado concentraciones sin precedentes en la era industrial, de tal suerte que se asevera la generación de una nueva era geológica, denominada “antropoceno”, debido a las consecuencias ya irreversibles del actuar de los seres humanos. Dicha postura argumenta que el impacto antrópico ha modificado el comportamiento climático (Jiménez-Martínez y García-Barrios, 2020).

³ Estas modificaciones climáticas tienen consecuencias importantes para las sociedades, principalmente para las poblaciones más vulnerables, caracterizadas por la pobreza y la exclusión, por ello, el cambio climático impactará negativamente en el combate a la pobreza, además de paralizar y revertir los avances obtenidos en términos de salud, nutrición, educación, entre otros ámbitos del desarrollo humano. De tal suerte que, la forma en que se enfrente ⁶ al cambio climático tendrá un efecto directo en las perspectivas de desarrollo humano de un gran segmento de la población del planeta.

El cambio climático pone de manifiesto la vulnerabilidad social, dado que los desastres están asociados en gran medida a los niveles de vulnerabilidad. Por irónico que pueda resultar, serán los países que producen menor cantidad de emisiones, aquellos que tendrán sus sistemas naturales y humanos más severamente afectados, debido a sus medios de sustento menos seguros, su dependencia de recursos naturales, su marginación y mayor vulnerabilidad al hambre y a la pobreza (PNUD, 2008; IPCC, 2022). Según BASF (2024) el cambio climático afecta de manera diferenciada a la agricultura - medio de sustento de millones de personas en todo el planeta -, ocasionando propagación de plagas y enfermedades en los cultivos; cambios en la producción hormonal de las plantas, afectando su desarrollo y capacidad de producir granos y reducción de la fertilidad de los suelos, que es la base para la productividad del campo. Para los agricultores ³ el cambio climático supone una amenaza que se añade a los riesgos que ya enfrentan cotidianamente, interactuando con ellos e incrementando sus efectos.

El análisis de la vulnerabilidad social debe ser tomado en cuenta como un factor clave para entender los impactos diferenciados del cambio climático en los diferentes sectores sociales,

dado que la vulnerabilidad debilita las capacidades de resiliencia y adaptación social, dos factores clave para sortear de mejor manera los efectos adversos del cambio climático. Asimismo, la vulnerabilidad es un concepto central para predecir la existencia de impactos diferenciados en los distintos grupos de una sociedad, pues permite dilucidar las características del sector productivo, la ubicación geográfica y el nivel de organización de las diferentes poblaciones, ámbitos clave para entender los impactos particulares del cambio climático en los sectores sociales (Moreno-Salazar-Calderón y Delgado-Cabrera, 2022).

En esta contribución se analizan los resultados de un estudio de caso sobre vulnerabilidad social frente a eventos hidrometeorológicos extremos, realizado en el municipio de San Felipe, en el estado de Yucatán. En particular el presente documento trata de contestar a las siguientes interrogantes:

¿Qué es la vulnerabilidad social?

¿Qué conocimiento poseen los actores locales respecto al concepto de cambio climático?

¿Cuáles estrategias de adaptación emplean frente a eventos hidrometeorológicos extremos?

¿Cómo evalúan la gestión de autoridades locales ante eventos hidrometeorológicos extremos?

Este trabajo se deriva de una investigación cuyo objetivo consistió en acercarse a la conceptualización de vulnerabilidad social y diagnosticar las expresiones de vulnerabilidad en un estudio de caso. Sus resultados dan cuenta de una compleja problemática de sostenibilidad socioambiental, la cual tendrá que superarse en aras de impactar favorablemente en la calidad de vida de las poblaciones locales, haciéndolas más resilientes y con mayor capacidad de adaptación frente al incremento en cantidad e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, que se espera como consecuencia de los impactos adversos del cambio climático.

Aportes del concepto de vulnerabilidad social

Tanto la literatura académica como los informes de agencias internacionales que abordan el tema de la vulnerabilidad, parten de la premisa de que las variables económicas no son suficientes para entender dicho fenómeno y tampoco diseñar políticas dirigidas a mitigarlo y

bloquear los mecanismos que promueven su reproducción intergeneracional. Autores como Caroline Moser, Neil Adger, Ruben Kaztman, Carlos Filgueira, Roberto Pizarro, Piers Blaikie, Gustavo Busso, José Manuel Macías, Virginia García Acosta, entre otros estudiosos del tema, desde sus respectivos campos de investigación, coinciden que el crecimiento económico *per se* no produce, necesaria y linealmente, desarrollo social y recuerdan que las instituciones y el sistema social son elementos fundamentales para el acceso a los beneficios económicos y otros recursos que son fundamentales movilizar para la reducción de la vulnerabilidad.

La construcción del concepto de vulnerabilidad social integra nociones de la sociología, economía, ciencias políticas y antropología y por ser un concepto que transita entre las fronteras de distintas disciplinas, representa un avance en el intento por construir nuevas categorías de análisis para entender y explicar las causas y síntomas de las consecuencias sociales de los desastres provocados por el cambio climático. Además de su importancia teórica, dicho concepto tiene un relevante valor político, por constituirse una base operativa para el diseño de políticas.

Valdés-Gázquez (2021) plantea que la vulnerabilidad es un concepto clave para entender el rol que juega los factores sociales en la comprensión de los desastres, por poner el foco de atención no en las catástrofes en sí, sino en las estructuras y procesos socioeconómicos de desigualdad y pobreza. Asimismo, se argumenta acerca del papel del concepto para el análisis de los distintos sectores de la población desde una perspectiva endógena, centrada en las estructuras sociales y procesos de desigualdad y exclusión.

Según Busso (2001), las condiciones de vulnerabilidad se refieren a la capacidad de respuesta de individuos, hogares o comunidades, resultante de la relación entre el “entorno” y el “interno”, como consecuencia de la exposición a algún tipo de amenaza. De igual manera, aclara que el “entorno” ofrece un conjunto de oportunidades vinculadas a los niveles de bienestar a los cuales los individuos acceden en un determinado territorio y periodo de tiempo. Lo “interno” enfatiza la cantidad, calidad y diversidad de los recursos, activos o capitales que pueden ser movilizados para enfrentar la amenaza, lo cual hace referencia directamente a la “capacidad de respuesta” de los individuos, hogares o comunidades.

Blaikie *et al.* (1996) proponen que la vulnerabilidad es una combinación de características de una persona, hogar o comunidad, expresadas en relación con la exposición a una amenaza

derivada de su propia condición social y económica. El aporte a la construcción del concepto de vulnerabilidad consiste en la afirmación de que las amenazas no son naturales, sino son los sistemas sociales y políticos que crean las condiciones en las cuales las amenazas tienen un impacto diferencial sobre diferentes grupos dentro de las sociedades. La naturaleza forma parte de la estructura social de la sociedad, a través de la utilización de los recursos naturales para las actividades económicas y las amenazas están entrelazadas con los sistemas humanos al afectar los activos y medios de vida de las poblaciones[†].

De esa manera, no se puede plantear la vulnerabilidad en general, sino el concepto debe estar siempre acompañado con la pregunta: ¿vulnerable a qué? Es decir, la vulnerabilidad, al contrario de la pobreza, se construye y manifiesta en el contexto de una amenaza real. Este planteamiento lleva a una conclusión importante, relativa a que las personas serán vulnerables en diferentes grados a diferenciadas amenazas, de tal suerte que una persona puede ser vulnerable a la pérdida de propiedad o de la vida por causa de inundaciones, pero manifiesta vulnerabilidad ante fenómenos de sequía (Blaikie *et al.*, 1996). Al deslindar el concepto de vulnerabilidad de pobreza, se da el siguiente ejemplo:

“Un programa ante pobreza se inició en Turquía para apoyar a aquellos afectados por terremotos, aumentando sus oportunidades de ingresos, de modo que pudieran compensar sus pérdidas financieras. A los miembros masculinos de los hogares se les dio la oportunidad de trabajar como *Gastarbeiter* (trabajadores huéspedes) en la entonces Alemania Occidental. Ellos pudieron ahorrar sumas relativamente grandes de dinero y llegar a ser menos pobres. Invirtieron sus ahorros en casas grandes e inseguras desvirtuando con esto el propósito a largo plazo del programa y aumentando la vulnerabilidad, pero reduciendo la pobreza” (Blaikie *et al.*, 1996: 16).

³ Desde otra perspectiva, Barriga-Machicao (2004) plantea que la vulnerabilidad social está determinada por múltiples factores, algunos de los cuales se relacionan con políticas, instituciones, carencia de activos y se expresa en condiciones de fragilidad o falta de *resiliencia* que predisponen a una comunidad o individuos por sus condiciones de edad,

³ [†] Blaikie *et al.* (1996) pone el ejemplo del cambio en la distribución de la tierra y la propiedad después de inundaciones.

³ género, etnia, política, social y económica a sufrir daño diferencial por exponerse ante una amenaza que genera un desastre, como pudiera ser los huracanes o sequías. Para comprender la vulnerabilidad se debe reconocer que existen múltiples formas de vivir la vulnerabilidad y también diferenciadas ⁴ estrategias para contrarrestarla.

Esta revisión aborda la definición de vulnerabilidad social que permite emitir algunos comentarios de naturaleza preliminar. En primer lugar, es evidente que no existe un consenso en cuanto al concepto propiamente dicho de vulnerabilidad social. Su definición sigue siendo un terreno de disputas entre distintas disciplinas. En segundo lugar, independientemente de las disputas, hay un relativo consenso entre los autores en cuanto a la relevancia del contexto y el tipo de la “amenaza” en la definición de las variables y factores de vulnerabilidad, se reconoce pues, que la vulnerabilidad no puede ser aislada de su contexto y de una amenaza particular y construida artificialmente. La fuerza de la noción de vulnerabilidad social está en el hecho de que se origina y tiene impacto en comportamientos humanos y actividades sociales debidamente contextualizadas.

Metodología y contexto

El estudio de caso que se presenta a continuación aporta elementos de análisis acerca de la percepción de ³ pobladores de un municipio costero del estado de Yucatán (San Felipe) respecto a su vulnerabilidad frente en la materia.

La información fue obtenida mediante la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, enunciados a continuación:

- ✓ Una encuesta sobre percepciones sociales, en la que se cubren aspectos referentes a: conceptualización del cambio climático, acceso a la capacitación en la materia, impacto el cambio climático en la economía local, alternativas adaptativas llevadas a cabo por pobladores locales y percepción sobre la gestión de las autoridades locales ante eventos climáticos. Las encuestas fueron aplicadas a 98 habitantes, de un total de 632 viviendas habitadas presentes en la localidad. De esa manera, se encuestaron al ³ 15.5% del total de viviendas.
- ✓ Entrevistas semiestructuradas, en donde se profundizó en el análisis de los tópicos abordados en la encuesta, con el objetivo de obtener información cualitativa y triangular los datos obtenidos.

- ✓ ³ Observación participante, con el objeto de aprehender los matices de la vida cotidiana de las unidades domésticas de la comunidad, en aras de comprender mejor sus estrategias para hacer frente a los eventos climáticos extremos, así como retroalimentar y comparar la información obtenida con el desarrollo de los otros métodos.

Asimismo, se realizaron consultas a fuentes secundarias de información, con la finalidad de realizar un breve marco socioambiental de la región de estudio y complementar los datos obtenidos con el desarrollo del trabajo de campo, principalmente en lo que a información de carácter cuantitativo se refiere.

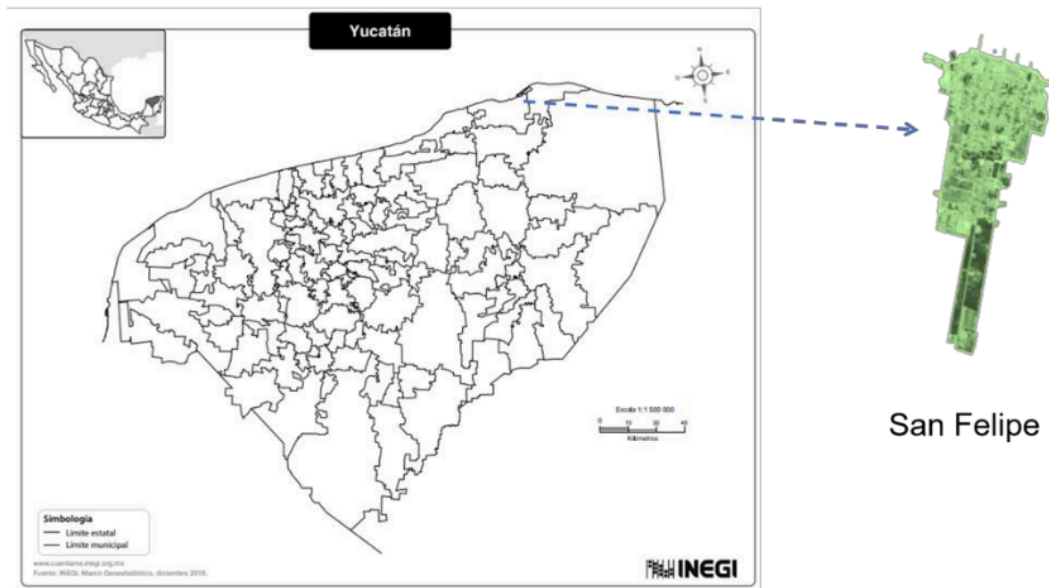
Se ha seleccionado el municipio de San Felipe, en la costa de Yucatán para el desarrollo del estudio de caso debido a la vulnerabilidad natural que presenta el estado frente al cambio climático. Por su ubicación, la Península de Yucatán es afectada de modo directo o indirecto por la mayoría de los huracanes que se forman en el caribe mexicano. La afectación por el paso de los eventos naturales asociados con la variabilidad climática se manifiesta en inundaciones, impacto en los ecosistemas, pérdida de la ⁴productividad pesquera y de cultivos, poniendo en riesgo a miles de personas, con un costo económico que representa millones de dólares en daños materiales (Munguía-Gil *et al.*, 2009).

Ningún otro punto es tan propenso al embate de los huracanes en México que las costas de ³Yucatán y de acuerdo con el INEGI (2021), casi cuatro millones de personas están en riesgo por los efectos que los meteoros pueden dejar a su paso por la región. Frente a esta situación, la selección de la costa de Yucatán para realizar el estudio de caso cobra especial relevancia. El municipio de San Felipe - en donde se realiza el estudio de caso - no se encuentra en una posición privilegiada en cuanto a los efectos del cambio climático, dado que se suma a su posición geográfica frágil, el nivel de pobreza de sus habitantes y su elevada dependencia hacia los recursos naturales.

⁴El municipio de San Felipe en la costa de Yucatán es un poblado de pescadores artesanales localizado en la región litoral del Golfo de México entre los meridianos 88° 13' y 88° 35' de longitud oeste y los paralelos 21° 21' y 21° 33' de latitud norte. Está ubicado a una altura de 2 metros sobre el nivel del mar y cuenta con una superficie territorial de 680.85 km² (SCT,

2007). Se ubica al norte del estado y del municipio de Tizimín y a 226 km de Mérida (Figura 2.1).

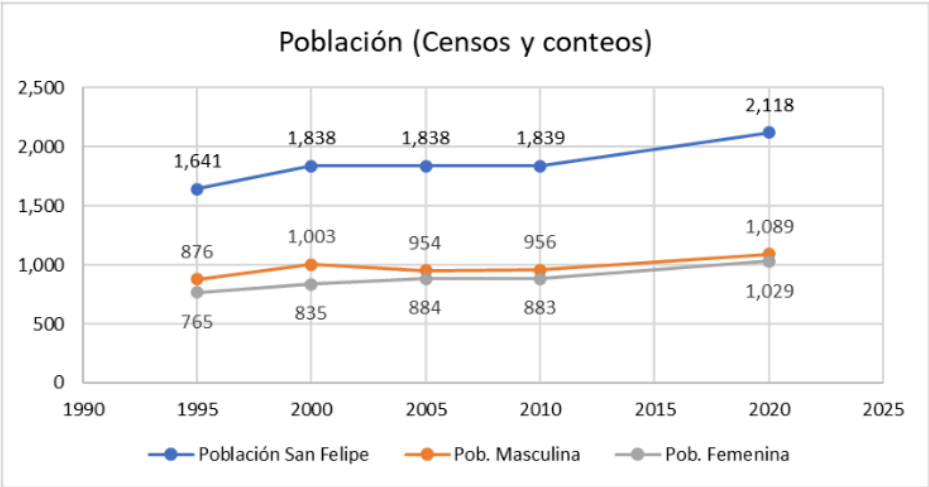
Figura 2.1. Ubicación geográfica de San Felipe, Yucatán.



Fuente: elaboración propia a partir de INEGI (2021).

San Felipe contaba, en el censo de 2020, con 2,118 habitantes, 15% más en comparación al censo de 2010. La población en el municipio corresponde al 51% masculina y el 49% femenina. Existen en el municipio 892 viviendas totales, de las cuales 632 son particulares habitadas. Es interesante notar que entre 1995 y 2000, así como entre 2010 y 2020, hubo un mayor incremento de población en comparación con el periodo de 2000 a 2010, cuando la población ha permanecido prácticamente sin alteración (Grafica 2.1).

Gráfico 2.1. Crecimiento de la población de San Felipe, Yucatán.



Fuente: INEGI, censos: 2000, 2010 y 2020; conteos: 1995 y 2005.

Con relación al acceso a los servicios, el municipio cuenta con una buena cobertura. Sin embargo, habría que aclarar que, si bien el INEGI establece que prácticamente todas las viviendas habitadas cuentan con drenaje, ello no representa la realidad, dado que, por ser suelos cársticos, en la península de Yucatán es prácticamente imposible conectar drenaje, por lo cual se usan otros medios para el saneamiento, como fosas sépticas y a ello puede referirse el elevado porcentaje, pues se consideraría de “saneamiento”. El acceso a la energía eléctrica, agua entubada y piso diferente a la tierra es prácticamente del 100%. También es necesario evidenciar que no necesariamente el acceso al agua entubada asegura el servicio en su totalidad, dado que suele haber tandeos de agua y, además, cuando azota algún huracán dicho servicio suele interrumpirse, por lo cual se demandan plantas de agua, pero son en situaciones de crisis (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Porcentaje de cobertura de servicios en San Felipe.

Servicios en San Felipe	Total	Porcentaje (%)
Viviendas con energía eléctrica	628	99
Viviendas con agua entubada	626	99

Viviendas con drenaje	623	99
Viviendas con piso diferente a la tierra	629	100

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2020).

4 La población alfabetizada de San Felipe es del 97%, correspondiente a la población de 15 años y más en el municipio. De la población analfabeta (3%), la masculina alcanza el 56%, mientras que la femenina un 44%. 4 En cuanto a escuelas existen cuatro escuelas en el municipio: una preescolar, una primaria, una secundaria y el Centro de Atención Múltiple San Felipe, Educación Especial (INEGI, 2021). 3 En dichas escuelas el tema del cambio climático no es abordado dentro de la estructura curricular, sin embargo, anualmente, a la entrada de la temporada de riesgos climáticos, integrantes de la brigada de huracanes, coordinados por el director de protección civil brindan pláticas escolares a estudiantes, en las cuales se mencionan las medidas de prevención y atención a emergencias que se deben tomar. Dichas conferencias tienen muy buena aceptación entre la comunidad escolar y ya se transformaron en un referente de capacitación en la materia.

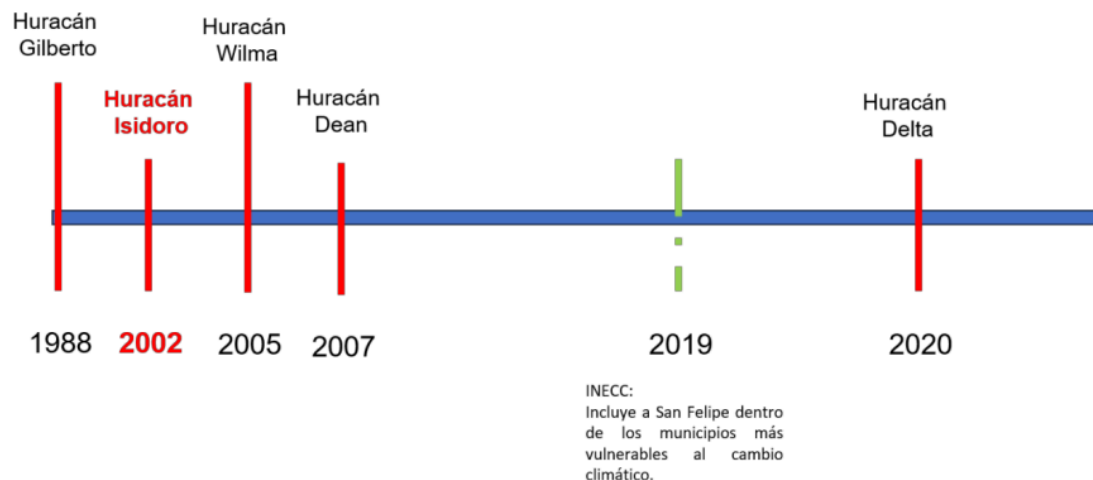
En la atención a la salud, en San Felipe, las opciones de atención más utilizadas en 2020 fueron Centro de Salud u Hospital de la SSA (seguro popular), el IMSS (seguro social) y consultorio de farmacias. En el mismo año, los seguros sociales que agruparon mayor número de personas fueron seguro popular o para una nueva generación (siglo XXI) y Pemex, 4 Defensa o Marina (Data México, 2024). 4 El centro de salud se coordina con protección civil en la temporada de huracanes y participa activamente en las vacunaciones posdesastre, dado que el tétano es un riesgo importante. 3 Además del riesgo del tétano y su medida preventiva hacia toda la población, las enfermedades gastrointestinales también constituyen un riesgo, siendo la población más vulnerable los adultos mayores e infantes. Otra actividad relevante del centro de salud para la prevención de enfermedades pos-huracanes es sacar los animales muertos de las calles, echarles cal y hacer una limpieza general de la comunidad.

4 En relación con el clima, San Felipe, debido a su situación geográfica y proximidad al mar, es afectado por diferentes patrones de circulación atmosférica, como los vientos alisios dominantes, las masas de aire modificado (nortes) y las corrientes convectivas que ocasionan lluvias. 3 La temperatura media anual es de 25°C con alta humedad relativa al 84.7%, 4 los meses más fríos son enero y febrero, con 19°C y el mes más caliente es mayo 36°C. Presenta una

oscilación térmica de 3.9°C. La precipitación total anual es de 683.9 milímetros al año. El mes más seco es abril, con 7.7 mm y el más lluvioso es septiembre, con 117 mm. En la mayor parte del año los vientos dominantes son los alisios con dirección noreste-suroeste, internándose con gran cantidad de humedad (Ortiz y Castillo, 2008).

Durante los meses de noviembre a agosto los vientos son moderados; sin embargo, a partir de septiembre y octubre, se considera temporada de nortes y huracanes. Por su ubicación geográfica, San Felipe ha sido afectado por este tipo de fenómenos siendo el más devastador el huracán Isidoro en 2002, con vientos de velocidades superiores a los 205 km/h, alcanzando 250 km/h. Según el INECC (2021), el municipio está catalogado entre los más vulnerables al cambio climático. La ilustración abajo retoma los principales eventos hidrometeorológicos que han afectado al municipio en una línea de tiempo del 1988 a la fecha, destacando que el con mayor potencial destructivo y que dejó huellas en el imaginario colectivo local, fue el huracán Isidoro, con categoría tres (Figura 2.2).

Figura 2.2. Identificación de eventos hidrometeorológicos en el municipio de San Felipe.



Fuente: elaboración propia con datos de INECC (2021).

Percepciones sociales relacionadas con el cambio climático y eventos hidrometeorológicos extremos

3

Uno de los elementos centrales para entender las manifestaciones del cambio climático en una región es el conocimiento de las opiniones que tienen sus habitantes sobre el problema. La intención de conocer las percepciones de un grupo de habitantes del municipio de San Felipe respecto al cambio climático responde a la inquietud de comprender sus intereses, demandas y necesidades, a fin de sentar las bases para construir procesos de participación social, en donde los pobladores locales puedan tener su espacio en la toma de decisiones con respecto al futuro ambiental de su localidad.

10

3

Si bien conocer las percepciones sobre el cambio climático de los pobladores locales crea oportunidades para el desarrollo de programas que tratan de encontrar formas más sostenibles de articulación de los grupos sociales con sus recursos, ello, por sí sólo, no logra dar cuenta de la compleja realidad socioambiental y de la multiplicidad de variables que condicionan la sostenibilidad del desarrollo. Hecha la aclaración, se destaca a continuación algunos aspectos sobre la percepción de 98 habitantes de San Felipe (50 mujeres y 48 hombres) respecto al cambio climático dando a conocer sus posiciones acerca de: a) las características del cambio climático, b) su acceso a la capacitación en la materia, c) sus estrategias de adaptación al cambio climático y d) su percepción sobre la gestión de las autoridades municipales ante eventos climáticos.

3

¿Qué es el cambio climático?

Del total de 98 personas encuestadas, el 73.5% respondió afirmativamente saber qué es el “cambio climático”, en tanto que el 26.5% ha contestado negativamente. Del total de mujeres (50), el 32% sabe lo que es, en tanto que el porcentaje de hombres que respondió de manera afirmativa fue el 41%. La mayoría de las personas encuestadas asocia el cambio climático al cambio drástico de temperatura (65.9%), un 13.5% con el deterioro de la capa de ozono, el 9.7% con el calentamiento global, el 6.2% con cambios en el clima por destrucción ambiental y el 4.7% con el mal tiempo y el incremento de las tormentas. Es posible afirmar que la idea general que los pobladores tienen del cambio climático es el cambio de temperatura.

3

Es interesante acentuar que la mayoría de las respuestas señaló que las causas del “cambio climático” son de origen natural, mientras que muy pocos hombres y ninguna mujer lo asoció con causas de origen humano (cambios en el clima por destrucción ambiental), lo cual indica poca información de que la población, en su conjunto, sobre las causas del “cambio

climático” y una alta experiencia en su relación con la variabilidad climática (natural; Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Distribución de porcentajes de percepciones asociadas al término de cambio climático.

Percepción asociada con el término de cambio climático	Distribución (porcentaje)		
	Hombres	Mujeres	Total
Cambio de temperatura	34	28	65.9%
Deterioro capa de ozono	5	5	13.5%
Calentamiento global	9	2	9.7%
Destrucción ambiental	7	0	6.2%
Mal tiempo, tormentas	5	0	4.7%

Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta aplicada a actores locales.

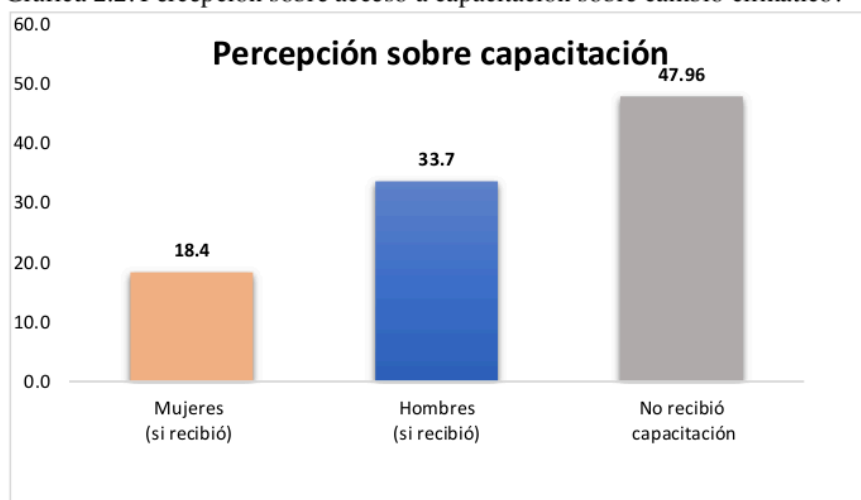
3 Acceso a la capacitación

Más de la mitad de las personas encuestadas ha recibido algún tipo de capacitación para prevenir y/o enfrentar eventos hidrometeorológicos extremos; sin embargo, apenas el 18.4% se trata de mujeres, muy por debajo del 33.7% que representan los hombres. Además, no resulta despreciable el hecho de que prácticamente el 48% de las personas encuestadas no ha recibido ningún tipo de capacitación. De las personas que han recibido capacitaciones, la mayoría (90.2%) reportó que estas han sido brindadas por instituciones de gobierno, mientras que apenas el 9.8% señaló que las organizaciones de la sociedad civil han impartido pláticas o capacitaciones (Gráfica 2.2). Esto refuerza el hecho de que las asociaciones civiles locales no tienen al cambio climático como su tema primordial.

6 Protección civil municipal, en coordinación con promotores de gestión de riesgos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha capacitado a la población sobre gestión de riesgos y atención a huracanes y ambos afirman que en las escuelas y las brigadas de atención de riesgos tienen su público cautivo y constante, pero la asistencia a la capacitación para la población en general está cada vez más escasa a la medida en que se va alejando de la memoria reciente colectiva los dramas vividos con el huracán Isidoro. Una de las personas entrevistadas afirma: “cuando aún estaba reciente lo del ciclón venía muchísima

gente a las pláticas, pero a cada año disminuye la gente que se interesa por la concientización, parece que se olvidan lo que pasó o que no les puede pasar de nuevo, pero uno no puede confiar y tiene que estar alerta y saber lo que hacer...”.

Gráfica 2.2. Percepción sobre acceso a capacitación sobre cambio climático.



Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta aplicada a actores locales.

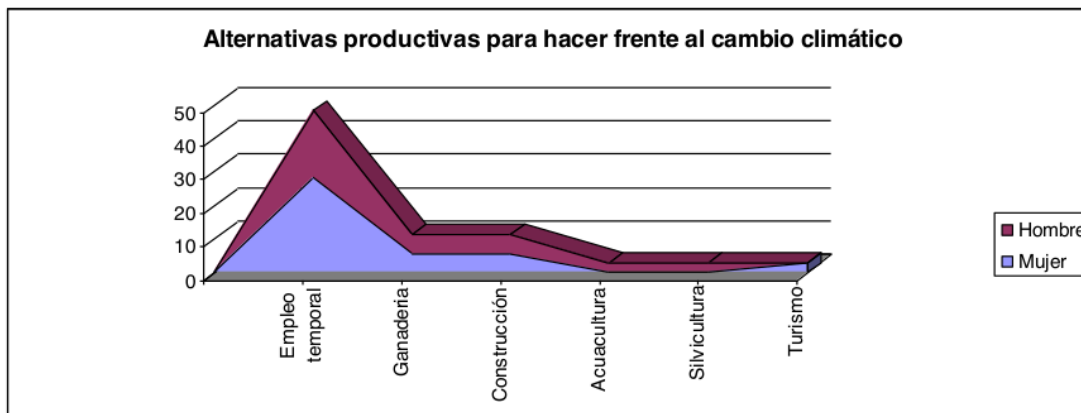
3 Adaptación al cambio climático

Menos de la mitad de las personas encuestadas (37.8%) sostiene que se están implementando alternativas productivas para hacer frente a los huracanes, de modo que los afectados puedan tener nuevas opciones de trabajo e ingreso. Al desagregar el conjunto de alternativas productivas, es importante ver que los programas de empleo temporal ocupan el 59.3% de las percepciones, lo cual es preocupante porque dichos programas no son productivos, sino que son una alternativa de ingreso, pero que no reduce la vulnerabilidad a largo plazo. Por sexo, más mujeres que hombres sostienen que el empleo temporal es la más importante alternativa de generación de ingresos.

Las personas encuestadas minimizan el manejo del riesgo y con él las acciones y estrategias necesarias para reducir el impacto de eventos extremos. Este manejo se vincula principalmente con la percepción de que las autoridades deben resolver el problema a través del empleo temporal, lo que denota una actitud pasiva y la ausencia del reconocimiento de las capacidades efectivas y las potencialidades de desarrollo que tienen las y los pobladores

(Gráfica 2.3). En general, este grado de bajo empoderamiento funciona como una barrera para la incorporación de procesos más efectivos de adaptación y mitigación, así como de participación social diferenciada por sexo.

Gráfica 2.3. Acciones de la población para disminuir los efectos del cambio climático.



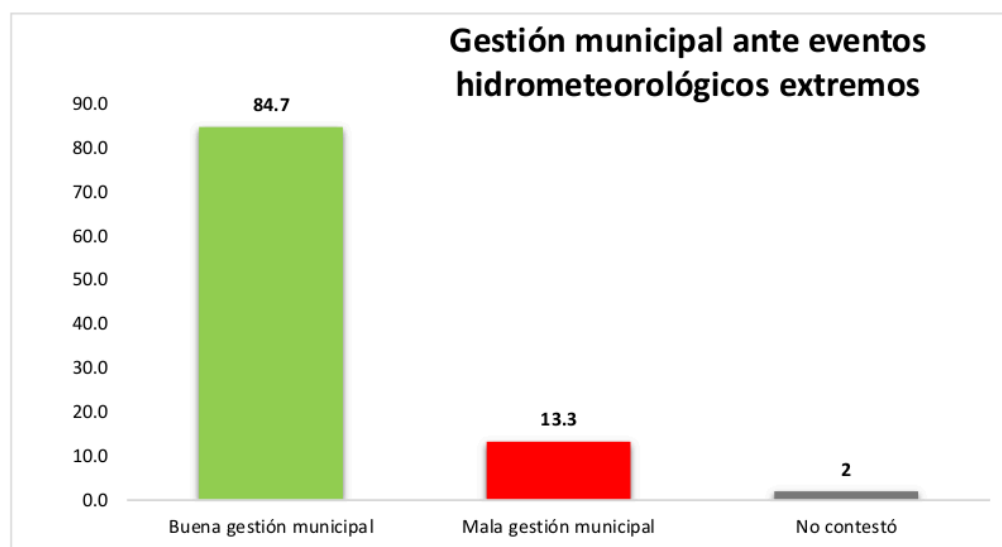
Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta aplicada a actores locales.

3 *Percepción sobre la gestión de las autoridades municipales ante eventos meteorológicos*

La opinión mayoritaria respecto de la gestión de las autoridades municipales ante eventos hidrometeorológicos se sitúa entre buena (84.7%), el 13.3% sostiene que el desempeño es malo y el 2.0% restante no contestó. Por sexo, la buena calificación de la gestión gubernamental es mayor entre los hombres que en las mujeres (44.8% vs. 39.9%, respectivamente; Gráfica 2.4). La percepción positiva de la población local sobre la gestión de las autoridades frente a eventos climáticos se fundamenta en el gran liderazgo ejercido por el director de protección civil y el compromiso de las personas con las brigadas anti-huracanes, quienes prestan trabajo voluntario. Asimismo, los promotores de gestión de riesgos del PNUD que actuaron en el municipio participaron de manera activa en todo lo relativo a la prevención, atención y recuperación pos-emergencia. De esa manera, la estructura institucional formal a nivel municipal para la gestión de riesgos ante eventos climáticos extremos se limita al director de protección civil, sin embargo, en entrevista con el presidente municipal, éste afirma que el ayuntamiento cuenta con alrededor

de 40 personas para la atención a los desastres y la población ³ también lo percibe como un gran equipo responsable de la protección civil municipal y, por ello, se valora de manera positiva la gestión de las autoridades. El grupo de personas que se aglutina alrededor del director de protección civil para participar en los procesos de gestión de riesgos evidencia el elevado capital social que cuenta la comunidad, construido con base en la solidaridad, debido a la experiencia vivida como consecuencia del huracán Isidoro y otros, también al poder de convocatoria del director de protección civil, quién fue ampliamente reconocido en el pueblo como un funcionario ejemplar.

Gráfica 2.4. Gestión de las autoridades para enfrentar al cambio climático.



Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta aplicada a actores locales.

Conclusiones

Con este estudio de caso se puede plantear que se conoce algunos ámbitos ³ de la percepción de los pobladores de San Felipe respecto de su vulnerabilidad frente al cambio climático. El hecho de que $\frac{1}{4}$ de la población encuestada haya respondido que no sabe qué es el cambio climático es un dato que merece atención, dado que es un porcentaje elevado si se toma en cuenta que el municipio es vulnerable al embate de huracanes y que se estima que dichos eventos se incrementarán como consecuencia del cambio climático.

De las personas que asumieron conocer la definición de cambio climático, la mayoría lo asoció con cambios de temperatura, resaltando su experiencia personal y no de lecturas sobre el tema, lo que podría asociarlo con la destrucción de la capa de ozono o calentamiento global. Ello hace evidente la necesidad de reforzar la capacitación en la materia. De hecho, casi la mitad de las personas afirma no haber recibido capacitación sobre la temática y son las mujeres quienes menos han accedido a la información, lo que también se constituye un tema de preocupación y que debería ser atendido a la brevedad, a fin de ir reduciendo las brechas de género en un tema tan relevante en la localidad. Es interesante resaltar que, si bien la población asume que no ha recibido capacitación, evalúa la gestión municipal ante eventos meteorológicos de manera favorable, asumiendo otras variables, diferentes al acceso a la información y capacitación como definitorias de una buena gestión.

Frente a las escasas alternativas locales para hacer frente al cambio climático, a la deficiente capacitación en la materia y al desconocimiento del concepto, se queda como asignatura pendiente la necesidad de impulsar procesos de acceso a la información y capacitación, así como una reestructuración de la relación de las instituciones locales y regionales con la población, con una mayor transparencia en sus procesos y el diseño de políticas públicas que logren atacar de fondo la problemática de vulnerabilidad social a nivel local.

Asimismo, las políticas en la materia tienen que crear sinergias con otras políticas del sector ambiental y también de los sectores social y económico, así como con otros instrumentos de planificación. Por ello, es importante integrar las opciones y medidas de adaptación al cambio climático en otras políticas en curso. Se trata de pasar de un esquema de planeación centralizado (*top-down*) a uno de gobernanza (conjunción *top-down* y *bottom-up*). Las soluciones para lograr enfrentar el cambio climático a largo plazo se basan en la capacidad de construir sociedades más justas, equitativas y con sentido de solidaridad, así como activando la participación y la corresponsabilidad social.

Referencias

- Ayuntamiento de San Felipe (2021-2024). H. Ayuntamiento de San Felipe. <https://ayuntamientosanfelipeyucatan.gob.mx/>
- Barriga-Machicao, M.M. (2004). *El rol del capital social en la reducción de vulnerabilidad y prevención de riesgos. Caso del municipio de Estelí, Nicaragua*. Tesis de Magíster

- Scientiae. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, Escuela de Posgrado, Turrialba, Costa Rica.
- BASF (2024). Cambio climático y agricultura: entender la relación y como tratarla. <https://shorturl.at/zQYby>
- Blaikie, P., Cannon, T., David I. y Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres*. Panamá, Panamá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Busso, G. (20 y 21 de junio de 2001). *Vulnerabilidad social: nociones e implicaciones de políticas para Latinoamérica a inicios del siglo XXI* [ponencia oral]. Seminario Internacional: las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe, Santiago de Chile. <https://shorturl.at/L0xeq>
- Data México (2024). Municipio. San Felipe, Yucatán. Gobierno de México. <https://shorturl.at/vE4GM>
- Filgueira, C. (20 y 21 de junio de 2001). *Estructura de oportunidades y vulnerabilidad social. aproximaciones conceptuales recientes* [ponencia oral]. Seminario Internacional: las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe, Santiago de Chile.
- Filgueira, C. (1998). Welfare and citizenship: new and old vulnerabilities. En V.E. Tokman, y G. O'Donnell (comps.), *Poverty and Inequality in Latin America: issues and new challenges* (pp. 119). Indiana: University of Notre Dame Press.
- García-Arróliga, N., Marín-Cambranis R., y Méndez-Estrada, K. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Gran-Castro, J.A. (2022). Desnaturalizar el cambio climático: repensando la vulnerabilidad climática en contextos urbanos. *Intersticios Sociales*, 23, 373-397. <https://doi.org/10.55555/is.23.401>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2021). *Municipios vulnerables al cambio climático con base en los resultados del atlas nacional de vulnerabilidad al cambio climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), (2001, 2011 y 2021), *Censo de Población y Vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1996 y 2006), *Conteo de Población y Vivienda*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto de Recursos Mundiales (2006). *Recursos mundiales: la riqueza del pobre, gestionar los ecosistemas para combatir la pobreza*. Instituto de Recursos Mundiales. Madrid-Washington: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Banco Mundial.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022. Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policymakers*. Geneva, Switzerland: Working group assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018). *Global Warming of 1.5°C*. Ginebra: Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jiménez-Martínez, N.M., y García-Barrios, R. (2020). Antropoceno y capitaloceno. En De Luca-Zuria, A., Fosado-Centeno, E., y Velázquez-Gutiérrez, M. (coords.). *Feminismo socioambiental: revitalizando el debate desde América Latina* (pp. 161-188). Cuernavaca: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Macías, J.M. (1992). Significado de la vulnerabilidad social frente a los desastres. *Revista Mexicana de Sociología*, 54(4), 3-10. <https://doi.org/10.2307/3540934>
- Milani, C.R.S. (2003). Como articular o “capital” e o “social”? Teorias sobre o capital social e implicações para o desenvolvimento local. *Redes*, 9(2), 31-54. <https://doi.org/10.29344/07196458.12.219>
- Moreno-Salazar-Calderón, K.A.B., y Delgado-Cabrera, F.W. (2022). Indicadores de vulnerabilidad al cambio climático de comunidades pesqueras: una revisión a nivel mundial, 2012-2022. *Población y Desarrollo*, 28(55), 21-34. <https://doi.org/10.18004/pdfce/2076-054x/2022.028.55.021>
- Munguía-Gil, M.T., Méndez-Cárdenas, G., Beltrán-Aragón L.M., y Noriega-Ramírez, C. (2009). *Género vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la costa de Yucatán*. Mérida: Colectivo Sinergia.

- Munguía-Gil, M.T. (2010). *Informe: atlas de vulnerabilidad social frente al cambio climático*. Mérida: Educación, Cultura y Ecología A.C.
- Ortiz, E., y Castillo, A. (2008). *Plan local de manejo de riesgos: comunidad de San Felipe, Yucatán*. Mérida, México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto de Manejo Local de Riesgos en la Península de Yucatán y Tabasco, Unidad Micro regional de Atención a Contingencias Costa-Nororiental Yucatán.
- Pizarro, R. (2001). La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina. Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Estudios Estadísticos y Prospectivos, Serie 6.
- PNUD (2007). *Informe sobre desarrollo humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido*, Nueva York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- PNUD (2008). *Guía recursos de género para el cambio climático*. México: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- PNUD (2006). *Plan local de manejo de riesgos: comunidad de San Felipe, Yucatán*. Mérida, México: Proyecto de Manejo Local de Riesgos en la Península de Yucatán y Tabasco, Unidad Micro Regional de Atención a Contingencias Costa-Nororiental Yucatán.
- Secretaría de Comunicación y Transporte (2007). *Programa maestro de desarrollo portuario 2009-2014*. México: Secretaría de Comunicación y Transporte.
- Secretaria de Marina (sin data). San Felipe, Yucatán: datos generales.
<https://shorturl.at/7uLsG>
- Valdés-Gázquez, M. (2021). Vulnerabilidad social, genealogía del concepto. *Gazeta de Antropología*, 37(1), 01.

Capítulo 3. Confort térmico nocturno en viviendas de la ciudad de Villahermosa, Tabasco ante escenarios de cambio climático

Christopher Lionel Heard[‡]

Sazcha Marcelo Olivera Villarroel^{**}

Resumen

El estudio analiza el comportamiento de los habitantes de una vivienda típica en Villahermosa, Tabasco, México, frente al aumento de las temperaturas nocturnas. Para ello, se realizan simulaciones en una casa de dos pisos, con viviendas contiguas. En esta región, el clima actual exige el uso de aire acondicionado en las casas unifamiliares. Durante los meses más cálidos, que van de mediados de febrero a mediados de junio, la estrategia habitual es mantener el aire acondicionado encendido a una temperatura estable, sin aumentar la potencia de los equipos. La simulación parte del supuesto de que la temperatura interior nocturna de las viviendas es de 25°C, mientras que la temperatura exterior es superior a la interior, lo que obliga a tener el aire acondicionado funcionando. Para llevar a cabo este estudio, se utilizará el programa ESP-r, una herramienta que permite determinar tanto el confort térmico dentro de la vivienda como la cantidad de energía consumida para lograrlo, incluyendo la potencia de los sistemas de aire acondicionado actuales. Según los modelos y escenarios desarrollados, es probable que el crecimiento de esta región conlleve un aumento significativo en el uso de aires acondicionados en las viviendas unifamiliares sobre todo en horarios nocturnos. Esto, a su vez, se traducirá en un incremento considerable en la demanda y el consumo de energía eléctrica en la región de Tabasco. Esta situación plantea la necesidad de realizar una inversión sustancial en la infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica en la región. Será necesario transportar energía desde fuentes más lejanas para satisfacer la creciente demanda. El año típico de referencia utilizado en este análisis fue desarrollado por

[‡]Doctor en Ingeniería del Medio Ambiente en Edificios en la Universidad de Sheffield. Correo electrónico: cheard@correo.cua.uam.mx. <https://orcid.org/0000-0003-2207-0512>

^{**} Doctor en Economía con especialidad en economía de los recursos naturales por la Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: satzcha@msn.com. <https://orcid.org/0000-0003-1864-7374>

WhiteBox Technologies, basándose en datos históricos horarios recopilados entre 1975 y 1989.

Palabras clave: *cambio climático, confort térmico, aire acondicionado, vivienda, transmisión y distribución eléctrica.*

Introducción

Villahermosa, la ciudad clave del sureste mexicano, destaca por su posición estratégica, su pujante desarrollo económico y cultural, y su papel como centro político y administrativo del estado de Tabasco. Aunque las ciudades medianas como Villahermosa no son grandes emisores de gases de efecto invernadero, desempeñan un rol crucial en los procesos de adaptación al cambio climático global (Vollman, 2019).

Este papel crucial se debe a varios factores. En primer lugar, la creciente urbanización en la región atrae una migración interna cada vez mayor, lo que conlleva un aumento en la demanda de recursos, infraestructura y servicios. Esto a su vez genera mayores emisiones de gases de efecto invernadero a medida que la población crece y las actividades económicas se expanden. Además, la ubicación geográfica de Villahermosa, situada en una zona propensa a inundaciones y fenómenos meteorológicos extremos, la convierte en un punto vulnerable a los impactos del cambio climático (Olivera *et al.*, 2020).

En este contexto, Villahermosa no solo se convertirá en una fuente futura de emisiones, sino también en un centro neurálgico donde se manifestarán los efectos del calentamiento global, como inundaciones, sequías, olas de calor y otros peligros que se espera se intensifiquen (Satterthwaite, 2009). La ciudad enfrenta, por lo tanto, un doble desafío: mitigar sus propias emisiones y, al mismo tiempo, prepararse para afrontar los impactos del cambio climático. Esto requerirá la implementación de políticas y estrategias integrales que aborden tanto la reducción de gases de efecto invernadero como la mejora de la resiliencia urbana.

Por un lado, Villahermosa deberá implementar medidas de eficiencia energética, fomentar el uso de energías renovables, promover el transporte público y la movilidad sostenible, y adoptar prácticas de economía circular que disminuyan la huella de carbono de la ciudad. Por otro lado, deberá invertir en infraestructura resiliente, mejorar los sistemas de alerta

temprana, desarrollar planes de emergencia y contingencia, y fortalecer la capacidad de respuesta de la población ante los impactos climáticos (CEPAL, 2020). Solo a través de este abordaje integral, Villahermosa podrá preservar su desarrollo y contribuir de manera efectiva a la adaptación regional ante los efectos del cambio climático. Esto requerirá la coordinación y el compromiso de los diferentes actores involucrados, desde el gobierno local hasta la ciudadanía y el sector privado, con el fin de construir una ciudad más sostenible, resiliente y preparada para los desafíos futuros.

El clima de la región se caracteriza por ser cálido y húmedo durante gran parte del año, con temperaturas extremas que superan los 35°C. Los máximos diarios suelen rondar alrededor de los 26°C (Información Climatológica por Estado, 2024). Esta situación climática ha generado una alta demanda de aires acondicionados domésticos para mantener el confort térmico de los habitantes. No obstante, si las temperaturas siguieran aumentando como resultado del cambio climático, la potencia requerida de estos sistemas de climatización también se incrementaría considerablemente (Heard y Olivera, 2013).

Esto supondría una carga sustancial para la infraestructura eléctrica de la región, que probablemente no podría ser satisfecha únicamente con paneles fotovoltaicos en techos y sistemas de almacenamiento de energía local. Con el fin de planificar a medio y largo plazo, es importante evaluar el efecto que tendría el aumento de la potencia de los aires acondicionados, en comparación con mantener los niveles actuales de enfriamiento, como una alternativa para lograr el confort térmico deseado. Este análisis permitirá a los responsables de la toma de decisiones tomar medidas informadas y desarrollar estrategias adecuadas para hacer frente a los desafíos energéticos y climáticos futuros (de Buen *et al.*, 2017).

Además, la creciente demanda de sistemas de climatización también tendrá un impacto en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que a su vez podría exacerbar los efectos del cambio climático. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones alternativas, como la mejora de la eficiencia energética de los edificios, la promoción de diseños arquitectónicos y urbanos más resilientes al clima, y el desarrollo de tecnologías de climatización más sostenibles, para lograr un equilibrio entre la necesidad de confort térmico y la preservación del medio ambiente (Mendoza, 2016).

El crecimiento tan significativo del uso de energía eléctrica para confort térmico tiene

implicaciones de gran relevancia que lo convierten en un tema prioritario en la agenda pública. Por un lado, la infraestructura eléctrica se ha visto profundamente impactada por este fenómeno. Hoy en día, el creciente equipamiento de aparatos de climatización en los hogares y el desarrollo inmobiliario asociado al sector servicios a lo largo y ancho del país han provocado que la demanda de energía para refrigeración y climatización sea el principal factor en el consumo eléctrico nacional, no sólo de manera regional o estacional, sino presente incluso en zonas y épocas tradicionalmente fuera de la época de calor y de las regiones con climas más cálidos.

Este aumento desmesurado en el consumo eléctrico para climatización ha tenido también fuertes repercusiones económicas a nivel de los hogares mexicanos. Tal como se mencionaba anteriormente, bajo una definición de pobreza energética que establece que un hogar se encuentra en esta situación cuando gasta más del 10% de sus ingresos en energía, en México cerca del 11% del total de los hogares, es decir, alrededor de 3.5 millones de familias, se encuentran en esta precaria situación. Esto demuestra que el impacto del uso de electricidad para confort térmico, especialmente en zonas de clima cálido, tiene un peso económico muy significativo para una proporción considerable de la población (CONUEE, 2020).

Más allá de los retos en materia de infraestructura eléctrica y de las consecuencias económicas para los hogares, este fenómeno también plantea importantes desafíos ambientales. El aumento en el consumo energético destinado a la climatización conlleva un incremento sustancial en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual contribuye al agravamiento del cambio climático. Esto demanda el diseño e implementación urgente de políticas públicas integrales que promuevan la eficiencia energética, el uso de tecnologías limpias y el desarrollo de alternativas sostenibles para el acondicionamiento térmico de edificaciones.

El problema de la pobreza energética en México es un asunto complejo que tiene implicaciones en diversos ámbitos. La situación es particularmente grave en la frontera norte del país, donde cerca del 18% de los hogares tienen gastos energéticos que superan el 10% de sus ingresos, lo cual se debe a la necesidad de mantener el confort térmico en climas cálidos (CONUEE, 2020).

Este fenómeno representa una carga significativa para las finanzas públicas, ya que los

subsidios al consumo de electricidad para el confort térmico de estos usuarios ascienden a más de 40 mil millones de pesos anuales. Se estima que, solo por este concepto, el erario tiene que asumir un gasto adicional de 400 millones de pesos cada año. Además, el consumo energético asociado a la climatización de edificios residenciales y comerciales en México tiene un impacto considerable en el medio ambiente. Se calcula que las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de esta actividad superan los 75 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que representa aproximadamente el 12% del total de emisiones del país. Peor aún, se proyecta que esta cifra podría incrementarse hasta 6.7 veces para el año 2050 si no se adoptan medidas para abordar este problema (SEMARNAT, 2022).

Es evidente que la pobreza y el consumo energéticos para confort térmico en México tienen implicaciones sociales, económicas y ambientales que requieren una atención urgente por parte de las autoridades y la sociedad en general. Desarrollar políticas y estrategias integrales que aborden estas cuestiones de manera efectiva y sostenible se convierte en una prioridad crucial para el bienestar y el desarrollo del país.

En el presente trabajo, se centra en la necesidad de modelar y desarrollar escenarios de simulación que permitan analizar los incrementos en la potencia de uso de aires acondicionados domésticos y sus efectos en la demanda eléctrica de la ciudad de Villahermosa. Para llevar a cabo este estudio, se utilizó el programa ESP-r, una herramienta que posibilita determinar tanto el confort térmico dentro de la vivienda como la cantidad de energía consumida para lograrlo, incluyendo la potencia de uso de los actuales sistemas de aire acondicionado.

La importancia de este análisis radica en la creciente dependencia de la población hacia los sistemas de climatización, especialmente en regiones con climas cálidos. El uso masivo de aires acondicionados ha generado un aumento significativo en la demanda eléctrica, lo que puede repercutir en la estabilidad y eficiencia del sistema energético de la ciudad. Mediante la simulación de diferentes escenarios, se puede evaluar el impacto de estos incrementos en la potencia de uso de los aires acondicionados y plantear estrategias para mitigar el impacto en la red eléctrica. Además, esta investigación también se enfoca en analizar la relación entre el confort térmico de los ocupantes y el consumo energético de los sistemas de climatización. Esto permitirá identificar oportunidades de mejora en la eficiencia de los equipos y en las prácticas de uso, con el fin de reducir el consumo de energía sin

comprometer el bienestar de los habitantes.

Material y métodos

Para desarrollar estos modelos de simulación, es crucial generar dos enfoques principales en la creación de escenarios. Por un lado, la simulación del clima futuro, y por otro, la simulación del comportamiento de los edificios a partir de esos escenarios climáticos. Dado que la simulación térmica detallada de edificios requiere datos meteorológicos locales a nivel horario, con parámetros como temperatura, humedad, radiación solar y viento, no se pueden usar directamente los resultados de los modelos regionales de cambio climático, ya que carecen de algunas de las variables necesarias para el proceso de simulación.

Tradicionalmente, la simulación térmica de edificios ha utilizado años representativos de datos horarios derivados de periodos de entre diez y treinta años de mediciones. Una metodología ampliamente aplicada es la construcción de un Año Meteorológico Típico (TMY, por sus siglas en inglés), que se ensambla a partir de meses de datos medidos que se acercan al comportamiento promedio mensual del periodo total. En el marco de este proyecto, se desarrolló el archivo TMY para Villahermosa, el cual sirvió como base para elaborar los años meteorológicos típicos futuros.

Desafortunadamente, México no cuenta con un modelo probabilístico para generar proyecciones climáticas futuras como el que existe en el Reino Unido (Harris *et al.*, 2014). Ante esta limitación, la opción más viable es generar archivos de datos climáticos futuros mediante el ajuste de información histórica (por ejemplo, Años Meteorológicos Típicos o TMY, por sus siglas en inglés) en función de los resultados de modelos regionales de cambio climático.

Existen diversos métodos para llevar a cabo estos ajustes, entre los cuales se encuentra el utilizado para el estándar CIBSE TM49 (Eames, 2016; M. Eames, comunicación personal, 2019). Este método ha sido programado para trabajar con el conjunto de datos CMIP5, publicado por el Programa Mundial de Investigación del Clima (CMIP5 - home, 2022). Actualmente, hay una amplia variedad de enfoques para ajustar los datos TMY y generar estimaciones del comportamiento térmico futuro de los edificios. En este sentido, se puede desarrollar un conjunto de bases de datos ajustadas y ordenadas de acuerdo con el cambio

previsto para un parámetro meteorológico específico, como la temperatura.

Esto permitiría realizar una serie de simulaciones térmicas de edificios y producir un rango de posibles impactos del cambio climático sobre el uso de energía o el confort térmico interior. Aquí está una versión más fluida y atractiva del texto original: la probabilidad relativa de cada escenario y su asignación pueden ser, en ocasiones, algo arbitrarias. Una manera alternativa de abordar este desafío sería reducir la cantidad de simulaciones, buscando criterios para seleccionar uno o dos modelos regionales de cambio climático y eligiendo los escenarios más apropiados para la región de estudio.

En este sentido, el trabajo de Sheffield *et al.* (2013) resulta de gran interés. Estos investigadores evaluaron los resultados obtenidos en los experimentos de simulación climática a escala regional para Norteamérica, incluyendo Centroamérica y México, llevados a cabo en el marco del CMIP5. Su análisis nos brinda una valiosa perspectiva sobre cómo abordar de manera más eficiente y pertinente los desafíos de la modelización climática regional. Al reducir la cantidad de simulaciones y enfocar en los modelos y escenarios más relevantes para una región en particular, se puede obtener proyecciones más precisas y confiables, facilitando la toma de decisiones informadas en materia de adaptación y mitigación del cambio climático. Este enfoque más selectivo y estratégico representa una alternativa prometedora a los enfoques tradicionales, que a menudo se caracterizan por una proliferación de simulaciones y un grado considerable de arbitrariedad en la asignación de probabilidades.

Los modelos de cambio climático regional han demostrado que el modelo MIRCO5 (Watanabe *et al.*, 2010) es el más adecuado para reproducir el comportamiento histórico (hindcasting) en Centroamérica y México. Por eso, se decidió utilizar los resultados mensuales promedio del escenario MIRCO5 rcp45 r1itp1 entre 2006 y 2100 para generar Años Típicos Meteorológicos (TMY) para los años 2020, 2030 y cada década posterior hasta 2100.

En la zona urbana de Villahermosa, el tipo de vivienda más común es la casa de dos pisos, con casas similares a los lados. Se ha considerado que, en el futuro, estas casas usarán iluminación LED y refrigeradores de consumo estándar, ya que es probable que no se utilicen tecnologías menos eficientes que las actuales. Este enfoque permite obtener una visión realista del consumo energético futuro de las viviendas típicas de la región, teniendo

en cuenta las proyecciones climáticas más precisas disponibles. De esta manera, se puede planificar mejor la infraestructura energética y las medidas de eficiencia que se necesitarán para satisfacer la demanda a largo plazo.

En el caso de Villahermosa, ubicada a los 17.59° de latitud norte, la situación presenta algunos desafíos interesantes. Durante el verano, la fachada orientada hacia el norte recibe insolación directa al mediodía, mientras que las fachadas sin sombra orientadas hacia el oeste reciben una cantidad considerable de radiación solar directa por la tarde.

Un análisis de la disposición de las calles en Villahermosa revela que muchas de las manzanas en las zonas residenciales tienen calles con ejes norte-sur, lo que resulta en fachadas orientadas hacia el este u oeste. Este patrón plantea consideraciones importantes a la hora de diseñar viviendas eficientes desde el punto de vista energético. La orientación de las edificaciones y la distribución de las calles son factores clave que deben tenerse en cuenta para optimizar el aprovechamiento de la luz solar y minimizar los efectos negativos de la radiación directa, especialmente en climas cálidos como el de Villahermosa. Un enfoque integral que considere estos aspectos puede contribuir a mejorar el confort y la eficiencia energética de las construcciones en esta localidad (Figura 3.1).

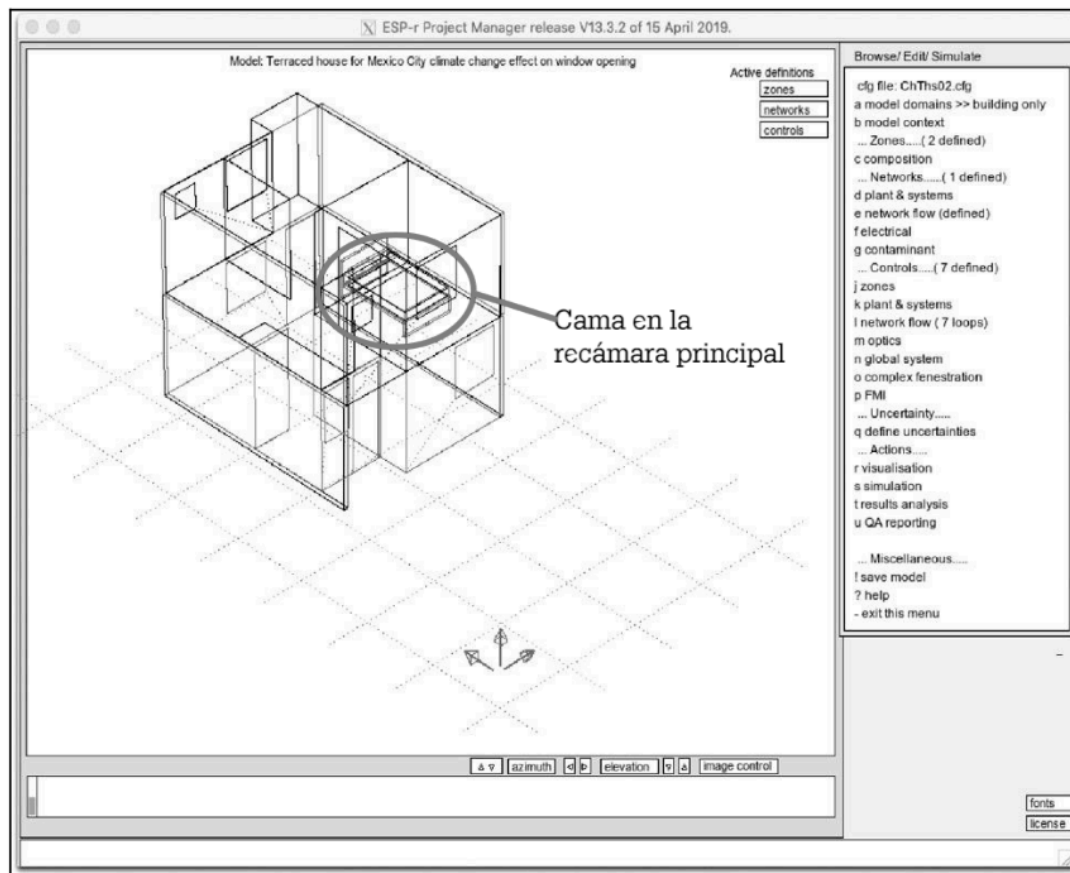


Figura 3.1. Casa representativa con cama y sensor de ambiente de temperatura de radiación encima de la almohada en la recámara principal.

Modelo de simulación

La simulación mediante el programa ESP-r es apropiada para situaciones donde la temperatura de la edificación se controla principalmente a través del uso de sistemas de aire acondicionado o calefacción, y no de forma natural. Este programa permite controlar de manera aproximada la temperatura interior mediante estrategias como la apertura de ventanas, debido a su sistema de uso de volúmenes finitos y conservación de energía (ESP-r Overview, 2022).

La simulación considera que las propiedades de los materiales de construcción, como la

densidad, conductividad y capacidad térmicas, se mantienen constantes a lo largo de la simulación. Esto simplifica el modelo, pero puede introducir cierta incertidumbre si estos parámetros varían significativamente en función de las condiciones. Para modelar el flujo de aire a través de grietas y escapes alrededor de ventanas y puertas, el programa utiliza la ecuación 1. Esta ecuación considera factores como la diferencia de presión a través de la abertura y el coeficiente de descarga. Adicionalmente, las ventanas abiertas se modelan como orificios utilizando la ecuación 2, que relaciona el caudal de aire con la diferencia de presión.

La simulación utiliza datos meteorológicos horarios, y realiza cuatro pasos de tiempo por hora tanto para la simulación térmica como del flujo de aire. Esto permite capturar con mayor detalle la dinámica de los intercambios de calor y las variaciones de las condiciones exteriores a lo largo del día. En general, el conjunto de programas ESP-r tiene capacidades y limitaciones bien documentadas, las cuales se pueden encontrar en la reseña realizada por Hand J. (ESP-r Overview, 2022). Estos antecedentes son importantes para entender el alcance y las restricciones del modelo de simulación utilizado.

$$\dot{m} = \rho k \Delta P^x \quad (\text{kg/s})$$

donde

$$x = 0.5 + 0.5 \exp(-500W)$$

$$k = L9.7(0.0092)^W/1000 \quad (\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^x)$$

$$W = \text{ancho de la grieta (mm)}$$

$$L = \text{largo de la grieta (m)}$$

(1)

$$\dot{m} = C_d A^2 \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (\text{kg/s})$$

donde

$$C_d = \text{factor de descarga} = 0.65$$

$$A = \text{área abierta} \quad (\text{m}^2)$$

(2)

El uso generalizado de aires acondicionados ha incrementado significativamente el consumo eléctrico en las zonas residenciales de Villahermosa y otras ciudades cálidas de México. En las últimas décadas, el consumo se ha disparado, llegando a ser 6.6 veces mayor en las áreas de climas cálidos, en contraste con un aumento de solo 3.2 veces en las

zonas templadas. Este incremento en el consumo eléctrico se debe principalmente a la creciente necesidad de mantener temperaturas frescas y confortables en el interior de las viviendas durante los meses más calurosos del año (Baez, 2020).

La mayoría de las viviendas en Villahermosa carecen de un diseño adecuado para soportar las altas temperaturas y ser energéticamente eficientes, lo que conlleva a un uso excesivo e ineficiente de los aires acondicionados. Muchas de estas casas y apartamentos, fueron construidos sin tener en cuenta principios de arquitectura bioclimática, como la orientación de las ventanas, la incorporación de aislamiento térmico o la utilización de materiales autóctonos que ayuden a regular la temperatura interior. Esto genera un aumento considerable en la demanda eléctrica y un mayor impacto ambiental, debido a las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las plantas de generación eléctrica (de Buen *et al.*, 2018).

Si bien se han implementado normativas de eficiencia energética para los equipos de aire acondicionado, lo que ha ayudado a mitigar el crecimiento del consumo eléctrico, aún existe un gran potencial para mejorar la eficiencia energética de las propias viviendas y reemplazar los equipos antiguos por modelos más eficientes. Además, es crucial promover entre la población la importancia de adoptar hábitos de ahorro energético, como mantener una temperatura adecuada en los aires acondicionados y evitar un uso excesivo de estos. La guía de la CONAVI sobre el uso eficiente de la energía en el hogar subraya la importancia de adquirir aires acondicionados eficientes como una medida clave para ahorrar energía. Además, destaca la relevancia del diseño bioclimático de las viviendas para reducir la necesidad de estos equipos. Esto incluye la incorporación de elementos arquitectónicos como toldos, voladizos, vegetación y ventilación natural, que permiten mantener temperaturas más agradables sin depender tanto de los aires acondicionados.

Modelando el confort térmico en el dormitorio principal

A la hora de determinar los niveles de vestimenta y actividad de los ocupantes de los dormitorios, nos basamos en los trabajos de Lai *et al.* (2018) y Lin y Deng (2008a). Lin y Deng (2008a) desarrollaron un modelo de confort térmico específico para recámaras en climas subtropicales, incluyendo medidas de aislamiento para ropa de cama y pijamas

(Ecuación 3). Por lo que, para evaluar el confort térmico de la vivienda, se utilizó el "Voto Medio Estimado" (PMV, por sus siglas en inglés), definido por Fanger (ASHRAE, 2021). El PMV es una escala que mide la satisfacción de un grupo de personas con las condiciones térmicas que experimentan, en una escala que va de -3 (frío) a +3 (caliente), pasando por neutro (0).

Además, consideramos la "unidad clo" como medida de la resistencia térmica de la ropa, el concepto de "clo" es una unidad de medida clave para comprender el aislamiento térmico proporcionado por la ropa que llevamos puesta. Esta escala nos permite cuantificar con precisión el nivel de confort que nos brindan nuestras prendas en diferentes entornos. Por ejemplo, estar completamente desnudos: en ese caso, tendríamos 0 clo de aislamiento. Por el contrario, un atuendo típico de hombre, con camisa, pantalones, ropa interior, calcetines y zapatos, se ubica en 1 clo. Una indumentaria muy abrigada, como ropa de lana, abrigo y sombrero, alcanza valores entre 3 y 4 clo.

Por otro lado, la ropa ligera de verano se encuentra en torno a los 0.5 clo, mientras que un uniforme militar de invierno llega a 1.5 clo. Como puedes ver, la escala de clo nos permite cuantificar con precisión el nivel de aislamiento de nuestras prendas, lo cual es fundamental para evaluar el confort térmico en distintos ambientes. Esta unidad de medida se ha convertido en una herramienta indispensable para ingenieros, diseñadores y expertos en climatización, quienes la utilizan para optimizar las condiciones de bienestar de las personas en espacios interiores o exteriores. Comprender el clo de nuestra ropa nos ayuda a tomar decisiones más informadas sobre qué vestir en función de las circunstancias. En el estudio 1 clo equivale a $0.155 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$ (ASHRAE, 2021).

Así mismo se considera que todos los seres vivos consumen energía para mantener sus funciones vitales. A esta cantidad de energía que gasta un organismo en un período de tiempo determinado se le conoce como tasa metabólica. Puede medirse en unidades como Joules, calorías o kilocalorías por unidad de tiempo, o bien en función del oxígeno que consume o el dióxido de carbono que produce.

La tasa metabólica basal (TMB) o tasa metabólica estándar (TMS) es la medición de la tasa metabólica de un animal en reposo, tranquilo y sin estrés, cuando no está activamente digiriendo alimentos. Según la teoría metabólica de la ecología, la tasa metabólica de un organismo está relacionada con su tamaño corporal y temperatura. Específicamente, se ha

observado que la tasa metabólica total (B) se relaciona con la masa corporal (M) siguiendo la ley de Kleiber: $B = B_0 * M^b$, donde B_0 es una constante y b un exponente cercano a 3/4. Además, la tasa metabólica aumenta a medida que lo hace la temperatura corporal, siguiendo el factor de Boltzmann: $B = B_0 * e^{(-E/kT)}$, donde E es la energía de activación, T la temperatura absoluta y k la constante de Boltzmann.

De acuerdo con la norma ASHRAE de 2021, esta medida permite comparar la tasa metabólica de organismos de diferente tamaño y temperatura. En el caso del estudio la tasa metabólica se define en términos de producción de calor por unidad de área de la piel, donde 1 met equivale a 58W/m² (ASHRAE, 2021). Con estos parámetros, pudimos modelar de manera más precisa el confort térmico de la vivienda y las necesidades de sus ocupantes.

$$PMV = 0.0998 \left\{ 40 - \frac{1}{R_t} \left[\left(34.6 - \frac{4.7 \bar{t}_r + h_c t_a}{4.7 + h_c} \right) + 0.3762(5.52 - p_a) \right] \right\} - 0.0998 [0.056(34 - t_a) + 0.692(5.87 - p_a)] \quad (3)$$

Es importante tener en cuenta que los valores de confort térmico en las viviendas modeladas dependen en gran medida de las costumbres y preferencias individuales de los residentes. Por lo tanto, los valores absolutos de PMV (Predicted Mean Vote) no necesariamente reflejan la realidad típica de estas viviendas. Sin embargo, es probable que durante el resto del siglo se produzcan cambios significativos en la distribución de PMV, lo que podría ser un indicador de las consecuencias del cambio climático en México, especialmente en términos del potencial de un mayor confort térmico y un uso más extendido del aire acondicionado en los hogares.

En el caso de los residentes que duermen en los pisos superiores de una vivienda representativa, se han considerado dos escenarios diferentes. En el primero, los ocupantes llevan un pijama ligero con una sábana de algodón ligera doblada para exponer el 52% del cuerpo (1,8 clo), mientras que, en el segundo escenario, se encuentran completamente cubiertos con ropa (2,7 clo). En ambos casos, se asume un nivel de actividad de 0,7 met. Para el dormitorio principal, se ha colocado un sensor de temperatura de radiación ambiente ligeramente por encima de la superficie de la almohada, con el fin de registrar

las condiciones térmicas del espacio de descanso. Por otro lado, se supone que el espacio de la planta baja de la vivienda se ocupa durante un breve período de tiempo por la mañana en los días laborables, y durante todo el día los fines de semana y festivos.

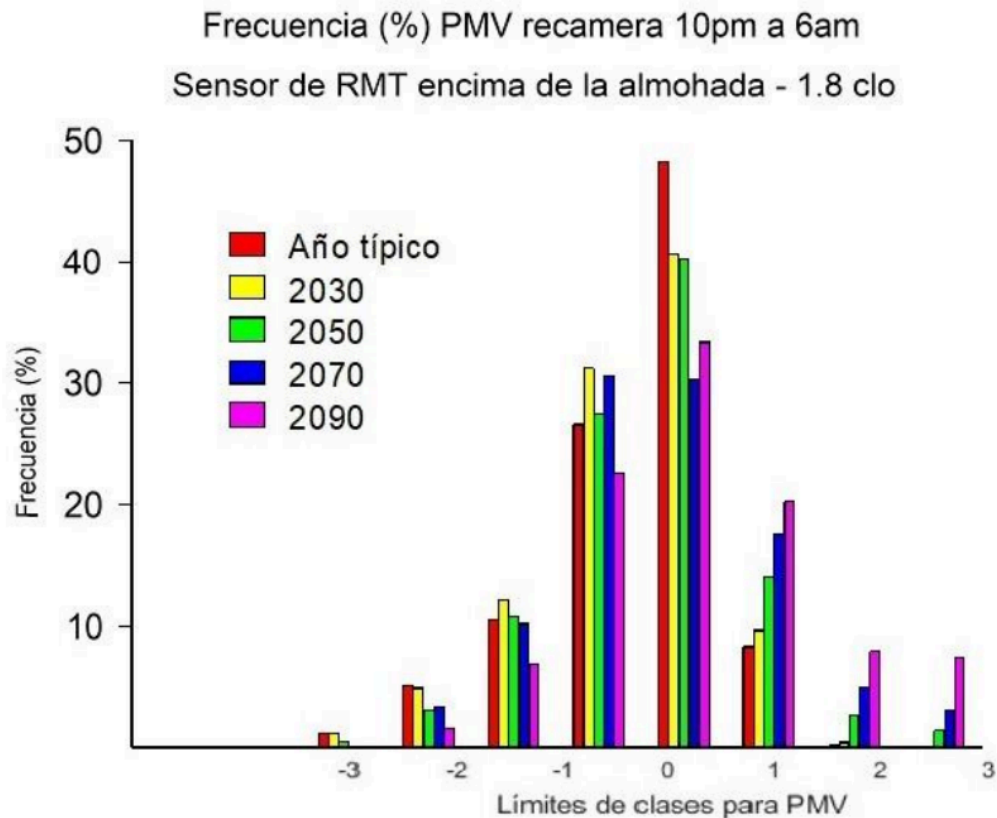
Esta distribución del uso del espacio es relevante para comprender las dinámicas de confort térmico y el potencial de ahorro energético en la vivienda. Aquí una versión más elaborada del pasaje original: Durante la noche, cuando las personas pasan la mayor parte de su tiempo en el hogar, se vuelve fundamental garantizar condiciones de confort adecuadas.

Es en este momento del día cuando las necesidades de climatización se hacen más evidentes y relevantes para el bienestar de los ocupantes. Dado que la vivienda unifamiliar se utiliza primordialmente durante las horas nocturnas, se considera que las condiciones de confort en ese período serían el principal factor motivacional para la adquisición e implementación de unidades de aire acondicionado.

Esto se debe a que, por lo general, es durante la noche cuando las personas buscan descansar, relajarse y disfrutar del hogar, por lo que contar con un ambiente térmicamente confortable se vuelve una prioridad. Más allá del uso diurno, las exigencias de climatización se intensifican en la noche, cuando las personas permanecen por períodos prolongados en la vivienda. Por ello, se entiende que la necesidad de garantizar un clima interior agradable y acorde a las preferencias de los ocupantes durante la noche sería el principal incentivo para la adquisición y uso de unidades de aire acondicionado en las casas unifamiliares.

Resultados

La gráfica 3.1 muestra los valores del PMV de confort térmico para la recámara principal usando la estrategia propuesta poner el ventilador a potencias mínimas. Aunque los resultados indican que se obtienen temperaturas templadas se debe incrementar la potencia de aire acondicionado para finales de siglo para lograr condiciones de confort. Sin embargo, en las ocasiones cuando las condiciones de confort son de incomodidad por calor sería muy difícil reducir el arropamiento a un nivel mucho menos de 1.8 clo. Se puede suponer que bajo tales condiciones el uso de ventiladores y aire acondicionado sería contemplado con una mayor potencia sobre todo si dichas condiciones ocurren en periodos de mayor duración.



Gráfica 3.1. PMV frecuencia entre 22:00 y 06:00 para una recámara con ventana de feb. 15 a jun. 15 y 1.8 clo de arropamiento. Sensor de temperatura medio radiante sobre la almohada de la cama.

La sensación de mayor incomodidad por altas temperaturas en la parte final del siglo será más común. El modelo climático predice un incremento de temperaturas en la década actual, pero, posteriormente, la frecuencia de temperaturas templadas acalorosas incrementa de manera significativa. Acercándose el final del siglo se puede apreciar que se predicen rachas con incomodidad por calor, mucho más severos, especialmente para vivienda con una orientación desfavorable.

La orientación de la casa sí tiene un impacto sobre la percepción de altos índices de PMV en la recámara. No obstante, esto es una característica del diseño específico de la casa. En este caso la disposición de una ventana con orientación al este sin sombreado externo

acumularía en junio radiación solar directa de manera importante, en particular cuando la luz solar cae sobre el piso antes de medio-día y, por lo tanto, almacenaría calor para su posterior liberación. Durante junio usualmente inicia la estación de lluvias y las tardes frecuentemente son nubladas, lo cual reduce la radiación solar entrando a una ventana con orientación hacia el oeste. Las diferencias en las frecuencias de PMV para las cuatro orientaciones de la casa típica muestran la necesidad para los diseñadores de realizar simulaciones detallados para sus proyectos específicos con datos de escenarios climáticos futuros (Heard *et al.*, 2013).

Esto permitiría a los diseñadores ganar una perspicacia en relación con la resiliencia o no de su propuesta de diseño. Sin embargo, los cambios de las distribuciones de las percepciones de PMV son similar para las cuatro orientaciones simuladas. En términos absolutos se encuentra que los PMV indicados caen dentro de los rangos de confort. Tomando en cuenta la estrategia optimista del uso de aire acondicionado en potencia mínima, y considerando que los supuestos de uso de ropa de cama son racionales y que la casa simulada no es particularmente propicia a sobrecalentamiento, es probable que, en la práctica, eventos de calor extremo fomentarán la compra de unidades de aire acondicionado para quienes aún no tengan este dispositivo y una vez instalados su uso típicamente se vuelve habitual y a mayores potencias por las rachas de calor previstas.

La Tabla 3.1 muestra una clara tendencia: a medida que aumenta la potencia del equipo de enfriamiento, también se incrementa el precio que el usuario final debe pagar. Esto se debe a que equipos más potentes requieren un mayor consumo de energía eléctrica, lo cual conlleva mayores costos de operación para el usuario. Asimismo, cuantas más horas requiera el equipo estar encendido, mayor será el consumo eléctrico y, por ende, el gasto mensual en la factura de luz.

Tabla 3.1. Consumo de energía eléctrica y Potencia de electrodomésticos.

Electrodoméstico	Potencia		Tiempo de uso	Horas mes	Precio	Precio	Precio
	W	(KW)			consumo básico	consumo intermedio	consumo excedente
<i>Ventilador de techo (CB)</i>	103	0.103	8	240	\$29.56	\$35.99	\$105.30
<i>Ventilador de torre (CB)</i>	50	0.05	8	240	\$14.35	\$17.47	\$51.11
<i>Ventilador de piso</i>	90	0.09	8	240	\$25.83	\$31.45	\$92.01
<i>Aire acondicionado de ventana</i>	1700	1.7	8	240	\$487.95	\$593.97	\$1,737.88
<i>Mini Split</i>	1600	1.6	8	240	\$459.25	\$559.03	\$1,635.66
<i>Clima portátil</i>	1400	1.4	8	240	\$401.84	\$489.15	\$1,431.20

Fuente: SENER (2016), actualizado por Selectra (2024).

Es importante destacar que la tabla 3.1 únicamente refleja el promedio de horas de uso en una ciudad típica de México. Este dato puede variar significativamente dependiendo de factores como el clima de la región, los hábitos de uso de los consumidores y la eficiencia energética de los propios equipos de aire acondicionado. Por ejemplo, en zonas con climas más cálidos y húmedos, probablemente los usuarios requieran mantener encendidos los equipos por un mayor número de horas al día, aumentando así su consumo eléctrico. Del mismo modo, aquellos usuarios que estén más conscientes del impacto ambiental y económico del uso excesivo de aire acondicionado tenderán a optimizar los tiempos de uso, buscando un mayor balance entre confort y ahorro.

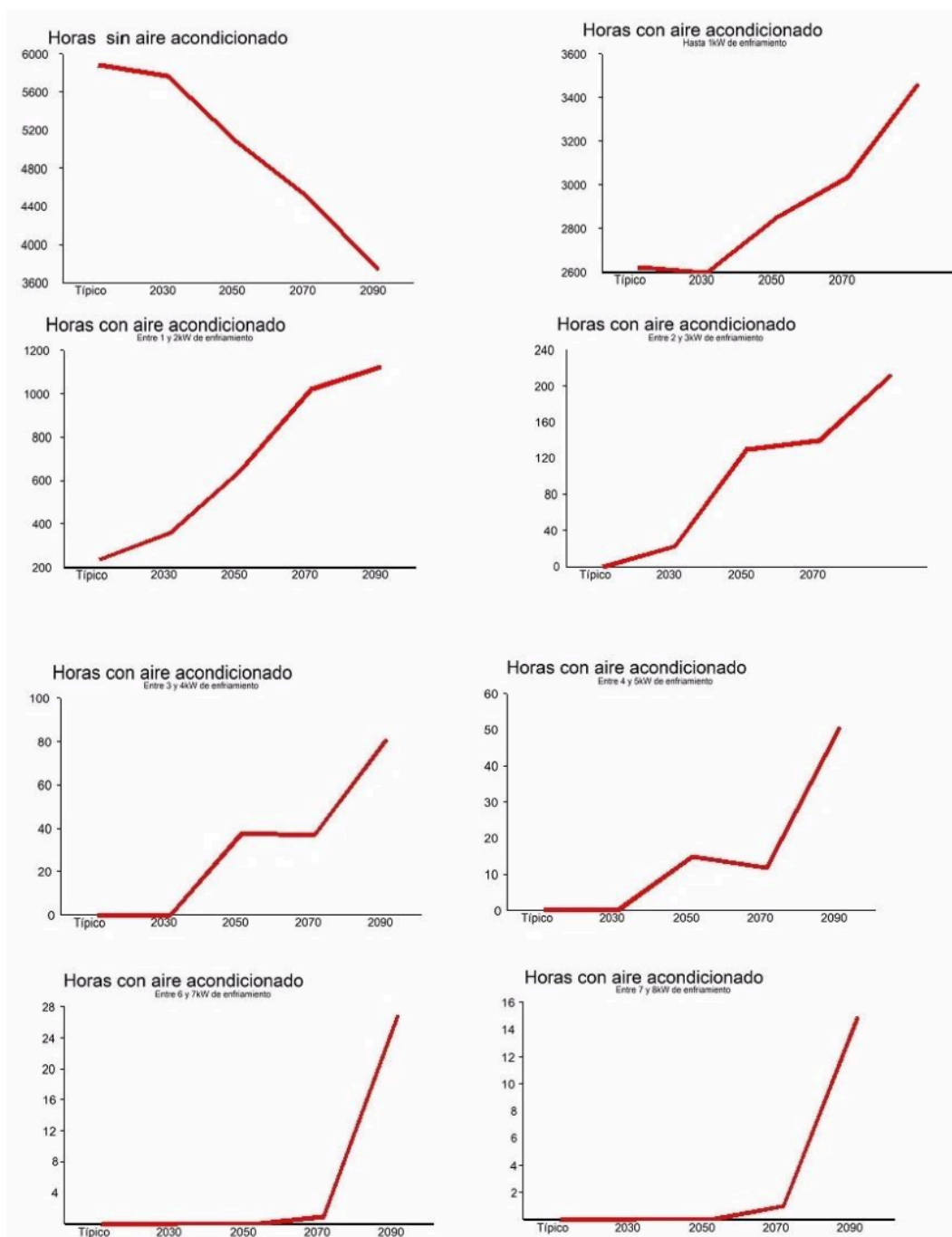
Al analizar esta información, se evidencia la necesidad de encontrar un equilibrio entre la capacidad de los equipos de aire acondicionado y su consumo energético. Seleccionar la potencia adecuada, así como optimizar los tiempos de uso, puede resultar clave para controlar tanto los costos como el impacto ambiental. Sin embargo, este balance debe considerar también otros factores como el nivel de abrigo o vestimenta (expresado en clo) y la actividad

metabólica de los ocupantes (expresada en PVM), los cuales influyen directamente en las necesidades de enfriamiento. De esta manera, se podrá lograr un ambiente interior confortable, eficiente y sostenible en el tiempo.

Mientras que la gráfica 3.2 se muestra la cantidad de horas de uso del aire acondicionado en función de su potencia de refrigeración, la cual va desde el apagado hasta los 8 kW, aumentando de 1 en 1 kW. Al analizar el uso típico actual y los escenarios de cambio climático para 2030, 2050, 2070 y 2090, observamos un incremento constante en las horas de uso del aire acondicionado.

Particularmente, en los escenarios futuros para finales de siglo, veremos que será necesario encender el aire acondicionado incluso en horas de la mañana y en momentos del día en los que actualmente no suele ser necesario. Esto se debe a que los aumentos proyectados en las temperaturas y los niveles de humedad harán que los espacios interiores se vuelvan cada vez más calurosos e incómodos, incluso durante las primeras horas del día, obligando a los usuarios a utilizar los equipos de aire acondicionado por períodos más prolongados.

Además, se aprecia que el equipo se encenderá a niveles de potencia cada vez más cercanos a sus límites de diseño, es decir, por encima de los 5 kW. Esto implica que, a medida que los equipos actuales lleguen al final de su vida útil, tenderán a ser reemplazados por modelos de mayor capacidad de refrigeración, capaces de hacer frente a las condiciones climáticas más exigentes.



Gráfica 3.2. Horas de uso y no uso de aire acondicionado según potencia de enfriamiento.

La Tabla 3.2 revela un preocupante incremento en el uso de aire acondicionado a medida que avanza el cambio climático. Actualmente, el aire acondicionado se utiliza durante 7.68 horas típicamente por la noche, es decir, el 32.70% del día. Sin embargo, se prevé que para finales de siglo esta cifra aumente casi un 57.32%, llegando a 13.75 horas de funcionamiento diario. Esto significa que prácticamente la mitad del día el aire acondicionado estará en pleno funcionamiento. Como se observa en la Figura 3, este aumento en el uso del aire acondicionado también conllevará un incremento notable en el consumo energético de estos equipos.

Tabla 3.2. Horas de uso y no uso de aire acondicionado, expresado en porcentajes.

Uso de aire acondicionado	Año Típico	2030	2050	2070	2090
Horas sin necesidad de aire acondicionado	67.30%	65.91%	57.86%	51.36%	42.68%
Horas con necesidad de aire acondicionado	32.70%	34.09%	42.14%	48.64%	57.32%

Discusión y conclusiones

La combinación de los diferentes escenarios de cambio climático y la simulación de una vivienda típica con uso de aire acondicionado propuesta en este estudio muestra el impacto potencial del cambio climático sobre las condiciones interiores de confort térmico en las viviendas de Villahermosa. Es crucial considerar el confort térmico nocturno, ya que es el periodo más importante para brindar una buena calidad de sueño y el momento en el que los ocupantes pasan más tiempo en sus hogares. Por lo tanto, el confort térmico en los dormitorios se considera el factor decisivo más importante a la hora de adquirir y utilizar unidades de aire acondicionado.

Si bien los valores específicos del índice PMV (Voto Medio Previsto) para una vivienda y sus ocupantes individuales pueden diferir de los resultados presentados aquí, este estudio logró su objetivo de evaluar los cambios potenciales del clima, el PMV y el uso de aire

acondicionado a lo largo del siglo. Es evidente que simular una gama más amplia de tipos de vivienda, niveles de aislamiento, vestimenta y actividad de los ocupantes sería de gran utilidad para obtener resultados aún más representativos de la realidad.

Los hallazgos de este estudio generan razones para preocuparse por la percepción de incomodidad térmica sobre todo en el horario nocturno que podría llevar a los habitantes a instalar aire acondicionado doméstico de manera cada vez más generalizada en las extensas áreas urbanas. Este aumento en el uso de sistemas de climatización, si bien puede mejorar las condiciones de confort interior, también conlleva implicaciones en términos de mayor demanda energética, emisiones de gases de efecto invernadero y costos económicos para los hogares. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones de diseño y estrategias de adaptación que permitan mitigar los efectos del cambio climático y lograr condiciones de confort térmico interior de manera más sostenible.

El incremento en el uso de aire acondicionado doméstico debido a las altas temperaturas tendrá un impacto significativo en las inversiones requeridas para la transmisión y distribución de energía eléctrica en áreas urbanas como Villahermosa. A medida que las temperaturas extremas se vuelvan más frecuentes e intensas, se producirán eventos de sobrecalentamiento que conllevarán consecuencias importantes para la salud pública y requerirán respuestas urgentes por parte de los gobiernos locales. Este cambio en los hábitos de consumo y en la demanda de equipos más potentes tendrá importantes implicaciones en términos de consumo energético, costos operativos y la necesidad de una mayor inversión en infraestructura eléctrica para satisfacer la creciente demanda de energía.

Es fundamental desarrollar programas integrales para prevenir los efectos adversos del cambio climático en la habitabilidad de las viviendas en Villahermosa. Estos programas deberán abordar no solo el aumento en el consumo de energía eléctrica, sino también garantizar el confort térmico y la protección de la salud de los habitantes. Esto implicará la implementación de medidas de eficiencia energética, el uso de materiales y diseños constructivos adaptados al clima, y el desarrollo de soluciones de enfriamiento pasivo y basadas en energías renovables.

Es importante destacar que los resultados del estudio actual se basan en las proyecciones de un solo modelo regional de clima futuro, el cual ha demostrado una buena capacidad para representar las condiciones históricas (hindcasting). Si bien este modelo indica que los

cambios serán de una magnitud considerable, existe cierta incertidumbre sobre la exactitud de estas proyecciones. Para tener una mejor comprensión de los posibles escenarios climáticos futuros, sería deseable realizar estudios que incorporen los resultados de una gama más amplia de modelos regionales de cambio climático.

A pesar de esta incertidumbre, los hallazgos presentados en este estudio son suficientes para concluir que es necesario adaptar el diseño de edificios y viviendas unifamiliares en Villahermosa. Esto implicará la adopción de estrategias de diseño bioclimático, la selección de materiales y soluciones constructivas más resilientes al clima, y la integración de sistemas de enfriamiento eficientes y sostenibles. Estas medidas son fundamentales para garantizar la habitabilidad de las viviendas, reducir el consumo energético y proteger la salud de los residentes ante los desafíos que plantea el cambio climático en la región.

Sería valioso ampliar y expandir este tipo de estudio a otras áreas urbanas con climas tropicales a lo largo de la República Mexicana. Analizar y comparar las características y condiciones específicas de diferentes ciudades y regiones con este tipo de clima en todo el país nos permitiría obtener una imagen más integral y enriquecedora. Al examinar en detalle las particularidades de cada localidad, podríamos identificar patrones, retos y oportunidades comunes, así como las diferencias que puedan existir.

Esto nos ayudaría a desarrollar soluciones más acertadas y adaptadas a las necesidades de las distintas comunidades, en lugar de aplicar enfoques genéricos. Un análisis comparativo a escala nacional sin duda aportaría una valiosa perspectiva para entender mejor la dinámica de los entornos urbanos tropicales mexicanos y diseñar estrategias de desarrollo más eficaces y sostenibles. Vale la pena invertir esfuerzos en esta línea de investigación tan relevante para el futuro de nuestras ciudades.

Por ejemplo, se podría estudiar cómo varían los patrones de desarrollo urbano, las dinámicas sociodemográficas, los desafíos ambientales y las soluciones de infraestructura en ciudades como Cancún, Acapulco, Veracruz, Tampico o Mérida, entre otras. Esto permitiría obtener una visión más integral y detallada de la realidad urbana en los entornos cálidos y húmedos de México. Asimismo, sería relevante involucrar a autoridades locales, expertos en planificación y desarrollo, así como a la propia ciudadanía, con el fin de comprender mejor las necesidades, percepciones y aspiraciones de quienes habitan estas regiones tropicales. De este modo, se podrían formular estrategias más efectivas y adaptadas a las

particularidades de cada contexto urbano.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo se benefició de la infraestructura y los recursos provenientes de dos importantes proyectos de investigación. Por un lado, el proyecto "Cambio climático y su impacto sobre el diseño de vivienda y edificios, y las necesidades de modificación de las NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001" (No. 246157), financiado por el Fondo Sectorial CONACyT-SENER-Sustentabilidad Energética. Y por otro, el proyecto "El diseño ante el cambio climático: Divulgación, normatividad e información climatológica", desarrollado por la División de Ciencias de la Comunicación y Diseño de la Unidad Cuajimalpa de la Universidad Autónoma Metropolitana. El acceso a esta infraestructura y recursos ha sido clave para el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

- Andersen, R., Fabi, V., Toftum, J., Corngati, S. P., & Olesen, B. W. (2013). Window opening behavior modeled from measurements in Danish dwellings. *Building and Environment*, 69, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.005>
- ASHRAE. (2021). Handbook Fundamentals (SI Edition), Capítulo 9. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- CMIP5 - home. (2022). Llnl.Gov. Retrieved Autumn 11, 2018, from <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>
- Baez Garcia, W. G. (2020). Desempeño De Modelos De Confort Térmico En Vivienda De Interés Social Ubicada En Clima Cálido De México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1436>
- CONUEE (2020) En México, las políticas públicas de eficiencia energética han logrado abaratar los servicios energéticos. <https://www.gob.mx/conuee/es/articulos/en-mexico-las-politicas-publicas-de-eficiencia-energetica-han-logrado-abaratar-los-servicios-energeticos?idiom=es>
- de Buen O., Navarrete J., & Jaime E. 2017. Resultados relevantes relativos a eficiencia energética del Módulo Hogares y Medio Ambiente de la Encuesta Nacional de los

- Hogares de INEGI, 2015. In C. N. p. e. U. E. d. l. Energía (Ed.), Cuadernos: 8. CDMX: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf>
- Eames, M. (2019.). [Letter to Christopher Heard].
- Eames, M. (2016). An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design. *Building Services Engineering Research and Technology*. <https://doi.org/10.1177/0143624416631131>
- ESP-r Overview. (2022). Strath.Ac.Uk. Retrieved Spring 1, 2019, from http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm
- Font, J. G. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante el cambio climático. Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, 52, 102-158.
- Harris, C. N. P., Quinn, A. D., & Bridgeman, J. (2014). The use of probabilistic weather generator information for climate change adaptation in the UK water sector: Climate change adaptation in the water sector using weather generators. *Meteorological Applications*, 21(2), 129-140. <https://doi.org/10.1002/met.1335>
- Heard, C. L., & Olivera Villarroel, S. M. (2013). Evaluación económica de la resistencia térmica de la vivienda de interés social en las ciudades tropicales de México. *Acta Universitaria*, 23(4), 17-29. <https://doi.org/10.15174/au.2013.458>
- Información Climatológica por Estado. (2024.). Gob.Mx. Retrieved Summer 6, 2019, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado>
- Jones, R. V., Fuertes, A., Gregori, E., & Giretti, A. (2017). Stochastic behavioural models of occupants' main bedroom window operation for UK residential buildings. *Building and Environment*, 118, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.033>
- Lai, D., Jia, S., Qi, Y., & Liu, J. (2018). Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones. *Building and Environment*, 142, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.030>
- Lin, Z., & Deng, S. (2008a). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building*

- and Environment*, 43(1), 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
- Lin, Z., & Deng, S. (2008b). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics. *Building and Environment*, 43 (5), 905-916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
- Markovic, R., Grintal, E., Wölki, D., Frisch, J., & Van Treeck, C. (2018). Window opening model using deep learning methods. *Building and Environment*, 145, 319-329. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.024>
- Mendoza Cárdenas, M. C. (2016). Evaluación del impacto del uso de estrategias de climatización pasiva en el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento de aire en viviendas en Monterrey (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). <http://eprints.uanl.mx/14150/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (2022). Plan de Acción en Enfriamiento México. Refrigerantes con Bajo Potencial de Calentamiento Global y Eficiencia Energética en Equipos de Refrigeración y Aire Acondicionado. México. Semarnat. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/775010/PAE_FINAL__1_.pdf
- Secretaria de Energía. (2016). Estudio de caracterización del uso de aire acondicionado en vivienda de interés social. Mexico: CONUEE/GIZ. http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164221/Conuee_2016_Estudio_Cara_cterizaci_n_Uso_Aire_Acondicionado_en_Vivienda.pdf
- Sheffield, J., Barrett, A. P., Colle, B., Nelun Fernando, D., Fu, R., Geil, K. L., Hu, Q., Kinter, J., Kumar, S., Langenbrunner, B., Lombardo, K., Long, L. N., Maloney, E., Mariotti, A., Meyerson, J. E., Mo, K. C., David Neelin, J., Nigam, S., Pan, Z., ... Yin, L. (2013). North American climate in CMIP5 experiments. Part I: Evaluation of historical simulations of continental and regional climatology. *Journal of Climate*, 26(23), 9209-9245. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00592.1>
- Vollman, F. (2019). Las ciudades, “causa y solución” del cambio climático. *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462322>
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa,

T., Hasumi, H., Tatebe, H., & Kimoto, M. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3679.1>

Weather Files for Current and Future Climate. (2022). Exeter.Ac.Uk. Retrieved February 6, 2016, from <http://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/research/newsandevents/>

Capítulo 4. Una introducción de la modelación climática y los escenarios de cambio climático

Mercedes Andrade Velázquez*

Resumen

En la actualidad, el tema de cambio climático es abordado en varias áreas del conocimiento y sectores de la sociedad para poder afrontar sus efectos, reducir la vulnerabilidad de las poblaciones y generar medidas de adaptación para el bienestar social. El presente capítulo abordará dos grandes temas relevantes para la comprensión del clima y el cambio climático. Éstos son 1) Modelos Globales del Clima, donde se aborda su desarrollo a nivel mundial y sus usos en México y 2) Escenarios de Cambio Climático, donde se describen sus fases de desarrollo a nivel mundial y los generados en México, particularmente para el sur- sureste del país.

Palabras clave: software, clima, proyecciones, modelos globales, variables.

Modelos globales del clima

El desarrollo tecnológico y científico ha permitido desarrollar herramientas para la comprensión del Clima, cómo son los modelos globales del Clima. Los resultados de estos modelos son empleados en la generación de proyecciones de variables de temperatura, precipitación, presión, viento, nivel del mar, etc. a diferentes periodos de tiempo, desde la parte histórica, como presente y futura. Estos modelos generan los escenarios de Cambio Climático, cuya información se utiliza como parte de los programas y acciones, principalmente gubernamentales y académicas (IPCC, 2021; INECC, 2024).

*Doctora en Ciencias. CONAHCYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-6003>

El desarrollo de modelos del clima

El desarrollo de modelos climáticos va de la mano con el desarrollo tecnológico y del conocimiento climático. A inicios de los 1950's se empieza a generar las computadoras, que apenas podía procesar cerca de centenas o miles de procesos por segundo, esto ya es superado por los celulares actualmente. Los primeros pasos en el tema de modelación, es el planteamiento de las ecuaciones de estado, conservación de energía, masa y *momentum* de manera discreta, con soluciones numéricas. El primer modelo del clima se concentraba en describir los procesos físicos en la atmósfera, a partir de la respuesta a la radiación proveniente del sol y que es la fuente de energía para que todos los procesos en el sistema climático se lleven a cabo. El sistema climático, se conforma de 5 grandes componentes, hidrosfera, atmósfera, biosfera, litosfera y criosfera, que se encuentran en constante interacción mediante procesos como el ciclo hidrológico, el ciclo de carbono, o el resto de los ciclos biogeoquímicos (Figura 4.1). Por lo que simular el clima, significa modelar a sus componentes e interacciones. Eso significa una gran complejidad en el cálculo de esos procesos y una gran demanda de supercómputo para lograrlo. Hemos de decir que México no cuenta con un modelo del clima global, Brazil es el único país en Latinoamérica que cuenta con uno y que forma parte del CMIP6 (Eyring, 2016; ver más adelante: sección de escenarios de cambio climático). Podemos decir que prácticamente los países del hemisferio norte del globo terráqueo y que pertenecen a los países denominados como en desarrollo, son los que cuentan con un modelo del clima global. La tabla 4.1 lista las instituciones que cuentan con un modelo climático global y que forma parte del CMIP6.



Figura 4.1. Componentes del Sistema Climático.

Tabla 4.1. Instituciones Internacionales de Modelación del Clima.

N o.	INSTITUCIÓN	PAÍS	N o.	INSTITUCIÓN	PAÍS	N o.	INSTITUCIÓN	PAÍS
1	AWI	ALEMANIA	12	DOE	E. U.	23	MRI	JAPÓN
2	BCC	CHINA	13	EC-EARTH-CONS	EUROPA	24	NASA-GISS	E. U.
3	BNU	CHINA	14	FGOALS	CHINA	25	NCAR	E.U.
4	CAMS	CHINA	15	FIO-RONM	CHINA	26	NCC	NORUEGA
5	CasESM	CHINA	16	INM	RUSIA	27	NERC	REINO UNIDO
6	CCCma	CANADA	17	INPE	BRASIL	28	NIMS-KMA	REPÚBLICA DE COREA
7	CCCR-IITM	INDIA	18	IPSL	FRANCIA	29	NOAA-GFDL	E. U.
8	CMCC	ITALIA	19	MESSY-CONS	ALEMANIA	30	NUIST	CHINA
9	CNRM	FRANCIA	20	MIROC	JAPÓN	31	TaiESM	TAIWÁN, CHINA
10	CSIR-CSIRO	SUDÁFRICA	21	MOHC	REINO UNIDO	32	THU	CHINA
11	CSIRO-BOM	AUSTRALIA	22	MPI-M	ALEMANIA	33	SEOULNAC. UNI.	REPÚBLICA DE COREA

Un modelo climático global debe considerar las siguientes procesos: a) radiativos, los cuales se concentran en la radiación solar entrante y absorbida y que se transforma en radiación infrarroja; los dinámicos, aquellos que se basan en las ecuaciones de dinámica de fluidos

(tanto de océano como atmósfera) y consideran los movimientos verticales, de turbulencia, convección o capa profundidad; los de procesos en superficie, el albedo, la vegetación, el hielo, etc.; los químicos, la composición química del océano, atmósfera, tierra y las interacciones entre ellas. Además de la resolución espaciotemporal de los procesos que pueden ser calculados por los modelos (McGuffie & Henderson-Sellers, 2014). Las ecuaciones que resuelve principalmente un modelo del clima son:

1. Conservación de momentum:

$$\frac{Dv}{Dt} = -2\Omega \times v - \rho^{-1} \nabla p + g + F \dots (1)$$

v = velocidad relativa a la rotación de la Tierra, t = tiempo, ρ = densidad atmosférica, g = aceleración gravitacional aparente, p = presión atmosférica, F = fuerza por unidad de masa, Ω = velocidad angular de la Tierra.

2. Conservación de la masa:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot v + C - E \dots (2)$$

E = tasa de destrucción de constituyentes atmosféricos, C = tasa de creación de constituyentes atmosféricos.

3. Conservación de energía:

$$\frac{DI}{Dt} = -p \frac{D\rho^{-1}}{Dt} + Q \dots (3)$$

I = energía interna por unidad de masa [= $c_p T$], Q = tasa de calor por unidad de masa, T = temperatura, c_p = calor específico del aire en presión constante.

4. Ley de gas ideal:

$$p = \rho RT \dots (4)$$

R = constante de los gases.

ii.- Usos en México

Estos modelos se desarrollan, principalmente, en países del hemisferio norte, dónde se encuentran los grandes centros de investigación del clima a nivel mundial. Sin embargo, en México, no se ha podido desarrollar un modelo global del clima que permita estudiar y mejorar la comprensión de fenómenos climáticos regionales para fortalecer la ciencia climática, ya sea por falta de infraestructura, recursos humanos o espacios de desarrollo científico y técnico. Es por ello, que solemos ser usuarios de la información internacional y adecuarla a escala regional o local, mediante técnicas estadísticas o dinámicas. En el caso de las últimas, se utilizan las salidas de los modelos globales como condiciones a la frontera de modelos regionales para poder calcular los estados de la atmósfera en zonas con dominios del tamaño del país, o del tamaño de cuencas hidrográficas, de estados o contenidos en ellos. Alcanzando resoluciones de hasta 8km X 8km, como es el caso del RegCM (IMTA, 2024). Por otro lado, con métodos estadísticos, se puede alcanzar resoluciones de hasta 25 km X 25 km. Sobre estos métodos se hablará más adelante en la sección de escenarios de cambio climático en el sureste de México. La reducción de escala estadística (SD, por sus siglas en inglés) se extiende a todos los lugares. Los requisitos computacionales podrían ser los de una computadora personal (UNFCCC, 2021), a diferencia de la reducción de escala dinámica que requiere de supercomputadoras o de muy alto rendimiento. Las ventajas de la SD son: relativamente fáciles de producir y las variables relevantes para el impacto, no simuladas por los modelos climáticos, se pueden reducir utilizando la SD. Pero sus desventajas son que existen supuestos estacionarios entre la dinámica de gran y pequeña escala cuando se usa SD, la dinámica de pequeña escala y la retroalimentación climática no se reflejan cuando se usa SD (NASA, 2021).

Es importante mencionar que los principales grupos climáticos en México se ubican en instituciones públicas, cómo son el Centro de Investigación y C Educativos (CICESE), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Y que los primeros en generar escenarios para México fueron los investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera, ahora Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Sin embargo, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en 2012, convocó a los principales expertos de dichas instituciones,

sumando a los del Servicio Meteorológico Nacional, para establecer una metodología estándar para todo el país (Cavazos *et al.*, 2013) y generar los nuevos escenarios del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012; más adelante se hablará de esto). La metodología usada se tomó de Giorgio y Mearns, (2002) y se conoce como REA, por sus siglas en inglés, corresponde a Confiabilidad de Ensamble Ponderado (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2019). No obstante, se migró a otras técnicas de reducción de escala (downscaling), y existen diferentes trabajos en México al respecto.

Escenarios de cambio climático

i.-Fases:

El Programa Mundial de Investigación en Modelos Acoplados, WCRP por sus siglas en inglés (WCRP, 2024). Está bajo la dirección de la Organización de las Naciones Unidas, el Panel Intergubernamental ante el Cambio Climático y la Organización Meteorológica Mundial (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014). WCRP es el encargado de llevar a cabo la generación de Escenarios de Cambio Climático, bajo el Proyecto de Intercomparación de Modelos, que en su inicio sólo incluían a los Modelos Atmosféricos (AMIP por sus siglas en inglés; Gates *et al.*, 1988), y ha evolucionado con la incorporación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) (Zhang y Moore, 2015). Este proyecto ha generado los escenarios de Emisiones en su fase 3 (CMIP3, por sus siglas en inglés), clasificados en dos familias A y B, de acuerdo con las características de desarrollo bajo condiciones con uso de combustible fósil, o amigable con el ambiente. Estos se clasifican en A1, A2, A1F1, B1 y B2, descritos en la tabla 2 (IPCC, 2000). Con el avance de la tecnología y del conocimiento de la modelación climática, se mejoran los modelos, tomando en cuenta, un nivel de complejidad mayor, lo que permite una nueva generación de modelos globales del clima, los cuáles son usado en el CMIP5 (por sus siglas en ingles). El enfoque con que se desarrolla el CMIP5, es en agrupar las múltiples trayectorias de los escenarios de emisiones de acuerdo con el forzante radiactivo y las concentraciones de CO₂-eq para finales del siglo, XXI (2100). Estas agrupaciones se clasifican en trayectorias representativas de concentración, RCP por sus siglas en inglés, ver tabla 3 (Moss *et al.*, 2008).

Sin embargo, el enfoque del CMIP5 permite evolucionar en su diseño en simultaneidad con la mejora de los modelos globales del clima, para dar paso al CMIP6 (Eyring *et al.*, 2016).

Este diseño, crea un DECK (por sus siglas en inglés), Diagnóstico, Evaluación y Caracterización del Klima, a partir de un grupo núcleo de experimentos que permitirán responder las preguntas 1) ¿Cómo el sistema Tierra responde a los forzamientos?, 2) ¿Cuáles son los orígenes y consecuencias de los sesos sistemáticos de los modelos?, y 3) ¿Cómo podemos evaluar los cambios futuros del clima, dadas la variabilidad climática interna, la predictibilidad, y las incertidumbres en los escenarios? Y qué se extrapolan a experimentos más específicos para responder preguntas asociadas al Paleoclima, a respuestas del Sistema Climático en condiciones de emisiones de CO₂-eq diferentes, a cuestiones específicas de la química atmosférica (Tabla 4.2; Figura 4.2).

Tabla 4.2. Escenarios de emisiones conocidos como SRES.

FAMILIA		A1			A2	B1	B2
A							
Grupo de	1990	A1FI	A1B	A1T	A2	B1	B2
escenarios							
Población		5.3					
(en miles de millones)							
2020		7.6 (7.4-7.6)	7.4 (7.4-7.6)	7.6 (7.4-7.6)	8.2	7.6 (7.4-7.6)	7.6
2050		8.7	8.7	8.7	11.3	8.7 (8.6-8.7)	9.3
2100		7.1 (7.0-7.1)	7.1 (7.0-7.1)	7.0	15.1	7.0 (6.9-7.1)	10.4
Energía primaria		351					
(1018J/año)							
2020		669	711	649	595	606	566

	(653-752)	(573-875)	(515-649)	(485-677)	(438-774)	(506-633)
	1431	1347	1213	971	813	869
2050	(1377-1601)	(968-1611)	(913-1213)	(679-1059)	(642-1090)	(679-966)
	2073	2226	2021	171	514	1357
2100	(1988-2737)	(1002-2683)	(1255-2021)	(1304-2040)	(514-1157)	(846-1625)
Dióxido de carbono, combustibles de origen fósil (GtC/año)	6.0					
2020	11.2 (10.7-14.3)	12.1 (8.7-14.7)	10.0 (8.4-10.0)	11.0 (7.9-11.3)	10.0 (7.8-13.2)	9.0 (8.5-11.5)
2050	23.1 (20.6-26.8)	16.0 (12.7-25.7)	12.3 (10.8-12.3)	16.5 (10.5-18.2)	11.7 (8.5-17.5)	11.2 (11.2-16.4)
2100	30.3 (27.7-36.8)	13.1 (12.9-18.4)	4.3 (4.3-9.1)	28.9 (17.6-33.4)	5.2 (3.3-13.2)	13.8 (9.3-23.1)

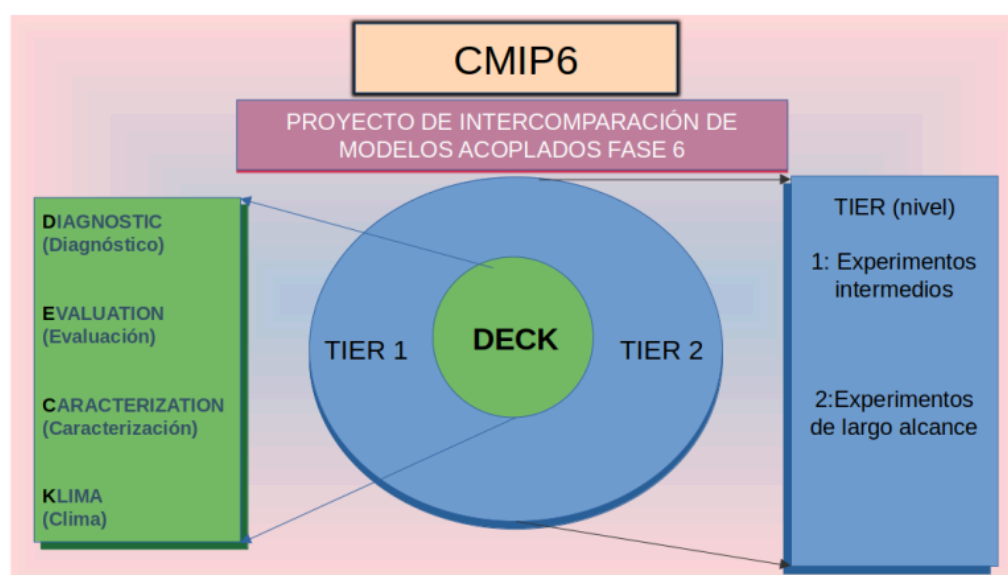


Figura 4.2. Representación del diseño del CMIP6.

Por lo que el CMIP6 cuenta con modelos más complejos que involucran varias componentes e interacciones en el Sistema Climático, además de contar con resoluciones temporales y espaciales más altas. Se resalta que los escenarios en esta fase son una combinación posible entre los escenarios socioeconómicos, conocidos como SSP por sus siglas en inglés (van Vuuren, et al. 2013) y los RCP, obteniendo así categorías como SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, la tabla 4.3 muestra las características.

Tabla 4.3. Escenarios de Vías de Concentración Representativas (RCP, siglas en inglés) y escenarios de vías socioeconómicas compartidas (SSP, siglas en inglés) y su combinación,

ESCENA- RIO DE CAMBIO CLIMÁT I-CO	FORZANTE RADIATIVO	CONCEN- TRACIONE S (ppm)	ESCEN A-RIO SOCIO- ECON ÓMI- CO	CARACTE- RÍSTICAS GENERALES	ESCENARI O COMBINAD O
RCP2.6	Pico de $\sim 3 \text{ W m}^{-2}$ antes de 2100	Pico de $\sim 490 \text{ CO}_2\text{-eq.}$ antes	SSP1	Desarrollo sustentable, bajos retos para	SSP1-2.6

	y después	declina de 2100 y después		mitigación y adaptación.
RCP4.5	~4.5 W m ⁻² estabiliza-ción después de 2100	~650 CO ₂ -eq. SSP2 Estabiliza-ción después de 2100		Caso intermedio entre SSP2-4.5 SSP1 y SSP3, retos moderados para mitigación y adaptación.
RCP6.0	~6 W m ⁻² estabiliza-ción después de 2100	~850 CO ₂ -eq. SSP3 Estabiliza-ción después de 2100		Rápido crecimiento SSP4-6.0 poblacional y moderado en económico. Retos altos para mitigación y adaptación.
RCP8.5	>8.5 W m ⁻² en 2100	>1,370 CO ₂ -eq. en 2100 SSP4		Un mundo muy SSP5-8.5 mezclado, con desarrollo tecnológico rápido, bajo consumo de energía sucia. Retos alto para adaptación y bajo para mitigación.
			SSP5	Ausencia de políticas climáticas, alta demanda energética basada en carbono. Retos alto para mitigación y bajo para adaptación.

ii.- Escenarios para el Sureste

Para conocer de manera global los esfuerzos en México para la generación de escenarios de Cambio Climático, y por ende sus proyecciones, les recomendamos consultar Montero-Martínez y Andrade-Velázquez (2024). Algunos ejemplos para para todo el país,

particularmente para el sureste de México, pueden ser encontrados en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático, del ¹² IMTA: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/atlas-2016/files/assets/basic-html/index.html#1 , el Atlas de Vulnerabilidad ante Cambio Climático del INECC: <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/> , y el sitio oficial de Cambio Climático del gobierno de México: <https://cambioclimatico.gob.mx/>.

Sin embargo, daré una descripción de las técnicas de reducción de escala estadísticas. Estas técnicas pueden clasificarse de manera general en dos, 1) Perfect Pronosis (PP) y Estadística de Salidas de Modelos (MOS por sus siglas en inglés; Bedia et al. 2020). Y en el sureste de México se han generado escenarios de cambio climático bajo el CMIP5 y el CMIP6, con el REA (Andrade-Velázquez *et al.*, 2021) y con corrección de sesgo (Andrade-Velázquez y Montero-Martínez, 2023a, b), respectivamente, para las variables de temperatura y precipitación.

Estos resultados en el sureste de México mantienen, en el caso de la temperatura, la tasa de calentamiento histórico en el periodo 1960-2016, es de ~ 0.01 °C/year, y para las proyecciones en el futuro cercano (2015-2039 del CMIP5 y 2021-2040 del CMIP6) para el escenario RCP6 y SSP4-6.0 respectivamente son muy similares. Esto, nos indica que existe consistencia en la generación de escenarios del CMIP5 al CMIP6. Además de señalar un panorama con condiciones socioeconómicas ponderantes en la zona que tienen una inercia a extrapolarse para el futuro cercano. Estas condiciones engloban acciones sustentables, dado que en la región existe, gran parte de ecosistemas y cobertura de suelo no degradado, como es el caso de la cuenca del río Usumacinta, que engloba al sureste de Tabasco y parte de Chiapas. Esto determina que haya grandes sumideros de CO₂ y amortiguadores del calentamiento.

En el caso de los otros periodos de tiempo futuros, puede emplearse la misma técnica, como lo aplican Andrade-Velázquez y Montero-Martínez (2023a, b), esto suponiendo que dichas condiciones se mantengan y se vinculen al SSP4. No obstante, los escenarios en el futuro cercano (2021-2040) son muy parecidas sus evoluciones, lo que resulta difícil discriminar entre los escenarios de cambio climático. Es por ello por lo que la propuesta de Andrade-Velázquez y Montero-Martínez proporciona una ventana de decisión entre los escenarios, de acuerdo a la tendencia que muestran los registros históricos. Para los futuros mediano y largo

alcance, la tendencia de evolución de los escenarios diverge en mediados de siglo y a finales del mismo, indicando que hay otros factores que podrían cambiar la tendencia, es decir, intensificar el calentamiento o controlarlo, esto último sí se opta por buenas estrategias para la mitigación de gases de efecto invernadero.

Referencias

- Andrade-Velázquez, M. y Montero-Martínez, M.J. (2019). Fiabilidad de los modelos del CMIP5 para la cuenca del río Usumacinta bajo el método REA. *Digit. Cienc*, 12, 14–21. Available online: <http://ciencia.uaq.mx/index.php/ojs/article/view/26>
- Andrade-Velázquez, M., Medrano-Pérez, O.R., Montero-Martínez, M.J. y Alcudia-Aguilar, A. (2021). Regional Climate Change in Southeast Mexico-Yucatan Peninsula, Central America and the Caribbean. *Appl. Sci.*, 11, 8284. <https://doi.org/10.3390/app11188284>
- Andrade-Velázquez, M. y Montero-Martínez, M.J. (2023a). Historical and Projected Trends of the Mean Surface Temperature in South-Southeast Mexico Using ERA5 and CMIP6. *Climate*, 11, 111. <https://doi.org/10.3390/cli11050111>
- Andrade-Velázquez, M. y Montero-Martínez, M.J. (2023b). Statistical Downscaling of Precipitation in the South and Southeast of Mexico. *Climate*, 11, 186. <https://doi.org/10.3390/cli11090186>
- Bedia, J., Baño-Medina, J., Legasa, M.N., Iturbide, M., Manzanar, R., Herrera, S., Casanueva, A., San-Martín, D., Cofiño, A.S. y Gutiérrez, J.M. (2020). Statistical downscaling with the downscaleR package (v3.1.0): Contribution to the VALUE intercomparison experiment. *Geosci. Model Dev.*, 13, 1711–1735
- Cavazos, T., Salinas, J.A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto, R., Conde, C., Quintanar, A., Santana, J.S., Romero-Centeno, R. *et al.* (2013). Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional; Informe Final del Proyecto al INECC: Ciudad de México, México, 150p. <https://www.researchgate.net/publication/321274898>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. y Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958.

- Gates, W. L., Boyle, J., Covey, C., Dease, C., Doutriaux, C., Drach, R., Fiorino, M., Gleckler, P., Hnilo, J., Marlais, S., Phillips, T., Potter, G., Santer, B., Sperber, K., Taylor, K. y Williams, D. (1998). An Overview of the Results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP I). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1962-1970.
- Giorgi, F. y Mearns, L.O. (2002). Calculation of average, uncertainty range and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the Reliability Ensemble Averaging (REA) method. *J. Clim.*, 15, 1141-1158.
- IPCC (2000) – Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570 Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND. <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896
- IMTA (2024). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. RegCM Model. Sitio visitado en Junio 2024: <http://cordex.imta.mx/views/regcm/regcm>
- INECC (2024). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, sitio visitado en Junio de 2024: <https://www.inecc.gob.mx/>
- NASA (2021). Regional Climate Model Evaluation System. Jet Propulsion Laboratory. NASA. Available at: <https://rcmes.jpl.nasa.gov/content/statistical-downscaling>
- McGuffie, K. y Henderson-Sellers, A. (2014). The Climate Modelling Primer, Fourth Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Published 2014 by John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 978-1-118-74684-4. Length, 464 pages.
- Montero-Martínez, M.J. y Andrade-Velázquez, M. (2024). Análisis sobre las proyecciones de cambio climático en México. *Tlamati Sabiduría*, 18, 7-22.
- Moss, R., Mustaf, B., Sander, B., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.F., Manning,

- M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., van Ypersele, J.P., Wilbanks, T. y Zurek, M. (2008). Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, pp. 25.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., y Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485–498, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- UNFCCC (2021). Statistical downscaling. United Nation. Available at: https://unfccc.int/files/adaptation/methodologies_for/vulnerability_and_adaptation/application/pdf/statistical_downscaling.pdf
- Van Vuuren et al. (2013). A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122, 373–386. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>
- WCRP (2024). World Climate Research Programme. Sitio visitado en Junio de 2024: <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>
- Zhang, Z., y Moore, J.C. (2015). Climate and Earth System Models. *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change*, 457–472. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800066-3.00014-0>

Capítulo 5. Más allá de los mapas: la información geoespacial como herramienta para entender el cambio global

Candelario Peralta-Carreta[§]

Gladis Yanet Martínez-Martínez^{**}

Resumen

El cambio global y climático son fenómenos que afectan tanto a los sistemas naturales como a los humanos. Estos cambios han alterado patrones climáticos, provocando eventos meteorológicos extremos, pérdida de diversidad, sequías, inundaciones, etc. El aumento en la periodicidad de estos cambios afecta la economía e incluso exacerba las desigualdades sociales. El monitoreo de las consecuencias de estos cambios (climático y global) es de suma importancia y la información geoespacial es una herramienta esencial para comprender y gestionar estos cambios. Los sistemas de información geográfica (SIG) y la Percepción Remota son fundamentales para monitorear ecosistemas, debido a que permiten detectar cambios en tiempo real y predecir tendencias futuras. Los SIG permiten mapear áreas vulnerables y planificar medidas de adaptación y mitigación, mientras que la percepción remota facilita el monitoreo de fenómenos a gran escala, como la deforestación y el retroceso de los glaciares. La aplicación de la información geoespacial es crucial para el modelado y la predicción climática, ayudando a anticipar los impactos socioeconómicos del cambio climático y a diseñar políticas públicas efectivas. También se destaca su aplicación en la planificación urbana y rural, donde permite optimizar la gestión de recursos naturales y mejorar la calidad de vida, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Palabras claves: *cambio global, cambio climático, SIG, percepción remota.*

[§] Maestro en Ciencias Ambientales. Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-9791>

^{**} Dra. en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Investigadora independiente. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2041-1440>

Introducción

Contexto general del Cambio Global

El cambio global y climático son fenómenos que provocan transformaciones profundas y multifacéticas tanto en los sistemas naturales como en los humanos. Estos cambios son impulsados y acelerados en gran medida por las actividades antropogénicas, con actividades como la quema de combustibles fósiles, la deforestación, y la industrialización intensiva, lo que ha aumentado significativamente las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, llevando a un aumento de la temperatura global promedio. De acuerdo con el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), el calentamiento global ha provocado una serie de cambios ambientales, incluyendo la alteración de los patrones climáticos, el derretimiento de los glaciares, la subida del nivel del mar y un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, sequías e inundaciones (Jia, 2020). Estos cambios, también repercuten en la salud humana, la economía y las estructuras sociales. Los cambios en la temperatura han incrementado la incidencia de enfermedades relacionadas con el calor. Las inundaciones extremas incrementan la inseguridad alimentaria debido a la pérdida de cosechas, y la ruptura de las cadenas de suministro globales (Wu, 2019). Además, el aumento del nivel del mar amenaza a las comunidades costeras, causando desplazamientos masivos y pérdidas económicas significativas, lo que agrava las desigualdades sociales y económicas existentes (Garnett *et al.*, 2018).

Entender estos procesos es crucial no solo para mitigar sus impactos, sino también para desarrollar estrategias de adaptación que permitan a las comunidades ser más resilientes frente a los desafíos que presenta el cambio global. Las políticas públicas deben basarse en una evidencia científica robusta y con un enfoque integrado, que no solo considere las dimensiones ambientales del cambio climático, sino que también incorpore los aspectos socioeconómicos. De acuerdo con Callaghan *et al.* (2020), el éxito en la implementación de estrategias efectivas para abordar el cambio global depende de la capacidad para combinar conocimientos técnicos con un profundo entendimiento de los contextos sociales y económicos en los que se aplican estas políticas. El enfoque interdisciplinario es esencial

para enfrentar los desafíos complejos y multifacéticos que el cambio climático presenta a nivel global (Fargher, 2019).

Relevancia de la Información Geoespacial

La información geoespacial se ha consolidado como una herramienta esencial para la investigación y la gestión del cambio global y climático (Schrodt *et al.*, 2019). Cuando hablamos de información geoespacial nos referimos a cualquier dato que describe un fenómeno en un espacio terrestre específico, asociado a coordenadas geográficas (Al-Yadumi *et al.*, 2021). Esta información puede ser mapeada y analizada en función de su posición geográfica, proporcionando una amplia gama de posibilidades para el análisis y la resolución de problemas (Ley García y Mas, 2018). Las tecnologías geoespaciales, como los sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos, sistemas de posicionamiento global (GPS), así como los programas informáticos, permiten adquirir, gestionar, y explotar datos georrefenciados. Estas herramientas son fundamentales para monitorizar el estado de los ecosistemas, detectar cambios en tiempo real y predecir tendencias futuras. Gracias a estas tecnologías, es posible identificar patrones de deforestación, degradación del suelo y otros fenómenos ambientales que son indicadores críticos de cambios globales en el planeta (Tsatsaris *et al.*, 2021).

Los términos SIG y Percepción Remota, en ocasiones, se confunden y usan como sinónimos. Sin embargo, a pesar de que son conceptos complementarios, su enfoque es distinto en el manejo de la información geoespacial (Figura 5.1). Los SIG son herramientas que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos espaciales, integran diversas fuentes de información y facilitan el manejo de grandes flujos de datos (Koldasbayeva *et al.*, 2023; Fargher, 2019). Por otro lado, la Percepción Remota o teledetección se refiere a la técnica de recopilación de información de la superficie terrestre sin estar en contacto directo con ella, generalmente a través de sensores montados en satélites, aviones o drones (Chuvienco, 2016). Esta tecnología permite la observación y medición de fenómenos naturales a gran escala, como la deforestación o el retroceso de los glaciares, mediante la captura de imágenes y otros datos desde el espacio o el aire (Figura 5.2). La información obtenida mediante percepción remota es procesada y analizada en un SIG, complementándose para

generar productos que fortalecen la gestión y toma de decisiones en diversos problemas ambientales (Fargher, 2019).



Figura 5.1. Los componentes de los Sistemas de Información Geográfica (SIG.) Fuente: Elaboración propia.

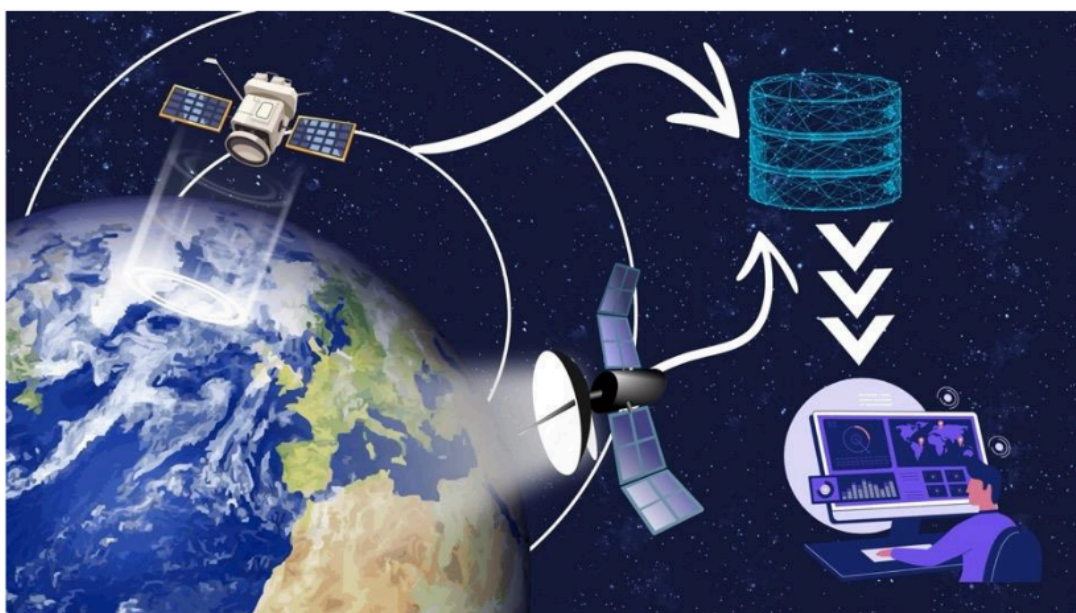


Figura 5.2. Representación gráfica de la captura de información mediante la percepción remota. Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de los SIG para integrar y analizar grandes cantidades de datos es fundamental para resolver problemas ambientales y planificar mejor las políticas de adaptación y mitigación (Jia, 2020). Los SIG pueden mapear áreas vulnerables a fenómenos como inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra, información que es crítica para que los gobiernos y las comunidades puedan implementar medidas apropiadas de prevención y respuesta, minimizando los daños y protegiendo los ecosistemas y ciudades (Koldasbayeva *et al.*, 2023). Por otro lado, la teledetección ha transformado nuestra capacidad para monitorear cambios ambientales a gran escala, permitiéndonos llegar a áreas de difícil acceso. En el Amazonas, el análisis de imágenes satelitales permitió a Hansen *et al.* (2013) identificar una pérdida significativa de cobertura forestal, cuantificando la deforestación en más de 2,3 millones de kilómetros cuadrados entre 2000 y 2012. En Groenlandia y la Antártida, Shepherd *et al.* (2018) encontraron que se han perdido aproximadamente 6,4 billones de toneladas de hielo desde 1992, lo que contribuye significativamente al aumento del nivel del mar.

La información geoespacial nos brindan la oportunidad de generar modelos que simulen variables y construyan escenarios futuros, que permitan dar una perspectiva más clara y

urgente sobre los desafíos que enfrentamos, ayudándonos a predecir riesgos y planificar estrategias de mitigación para minimizar los impactos negativos del cambio climático. Por ejemplo, los modelos basados en SIG pueden predecir la expansión de las zonas secas o la migración de especies debido al calentamiento global, proporcionando a los tomadores de decisiones la información que necesitan para diseñar respuestas apropiadas y efectivas. En la planificación urbana y rural, la información geoespacial nos permite identificar las mejores ubicaciones para el establecimiento de parques o corredores ecológicos, que contribuyen a mitigar el efecto de isla de calor urbano y mejoran la calidad del aire (Figura 5.3). En áreas rurales, se puede optimizar la gestión del agua y otros recursos naturales relacionados con la agricultura, haciendo que los procesos sean más sostenibles y sustentables haciendo frente a las variaciones climáticas (Creutzig *et al.*, 2018). El contar con ciudades bien estructuradas nos permitiría reducir la huella de carbono, dado que las ciudades son las responsables de generar gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por tanto, una planificación adecuada no solo mejora la calidad de vida en las zonas urbanas y rurales, sino que también participa como un elemento crucial en la mitigación del cambio climático.



Figura 3. Vista aérea de la ciudad de Villahermosa. Fuente: Tomada por Candelario Peralta.

En la gestión de emergencias y desastres, la información geoespacial ayuda a desarrollar sistemas de alerta temprana, proporcionando advertencias rápidas sobre eventos como tsunamis, terremotos, o erupciones volcánicas, permitiendo una evacuación eficiente y salvando vidas. Además, facilitan la evaluación de daños y la coordinación de rescate y reconstrucción, garantizando que los recursos se dirijan de manera eficiente a las áreas más afectadas (Wu, 2019). Finalmente, la información geoespacial también participa en la educación y la sensibilización pública sobre el cambio global y climático. Permite representar datos complejos en mapas sencillos, que ayudan a comunicar de manera efectiva y a un público más amplio los impactos de estos fenómenos (Figura 5.4). Mantener a la sociedad informada, no solo genera conciencia sobre la gravedad de la situación ante el cambio climático y global, sino que también motiva a las personas a tomar medidas para reducir su huella de carbono y apoyar políticas sostenibles (Kerski, 2008).



Figura 5.4. Elaboración de mapas participativos durante los talleres de la actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico de Tabasco. Fuente: Arisbeth Hernández Alonso, Karla Beatriz de la Cruz Burelo.

1. Aplicaciones de la Información Geoespacial en la Investigación del Cambio Global

La información geoespacial, es una herramienta invaluable en la investigación del cambio global y climático. Su capacidad para integrar, analizar y visualizar grandes cantidades de datos provenientes de múltiples fuentes de datos ayuda a monitorear diferentes procesos ambientales y sociales asociados a una escala temporal.

Monitoreo ambiental

Hoy en día, el monitoreo ambiental se ha convertido en la herramienta más importante e inmediata de la información geoespacial. Es capaz de proporcionar datos precisos y actualizados sobre la detección de cambios relacionados con la superficie de la Tierra, analizando fenómenos a gran escala como la deforestación, la desertificación, la expansión urbana y la degradación de los ecosistemas. Las imágenes de satélite permiten la observación de grandes porciones de la superficie terrestre de forma periódica y repetitiva. Esto se convierte en una característica clave para áreas remotas o de difícil acceso, donde las observaciones terrestres pueden ser limitadas o imposibles (Gorelick *et al.*, 2017). Los sensores remotos (p. ej. Landsat, Sentinel y MODIS) capturan imágenes en múltiples resoluciones espaciales y espectrales (Roy *et al.*, 2014), almacenando la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre en diferentes longitudes de onda (Figura 5.5). Cada tipo de cobertura terrestre (p. ej. agua, el suelo desnudo o la vegetación) refleja y absorbe la luz de manera diferente; a esta variación se le conoce como "*firma espectral*" (Figura 5.6)

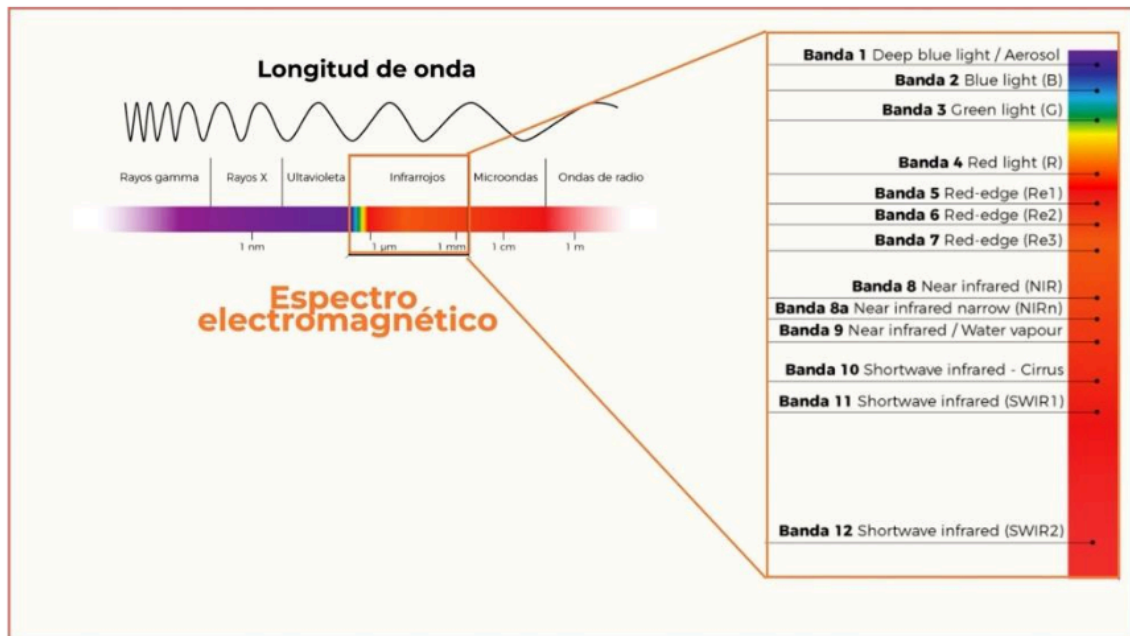


Figura 5.5. Representación del espectro electromagnético en el cual las imágenes de satélite capturan la información de la superficie, el sensor Sentinel-2, del programa Copernicus, tiene 13 bandas diferentes. Fuente: Modificado de <https://www.edu-sat.com/>.

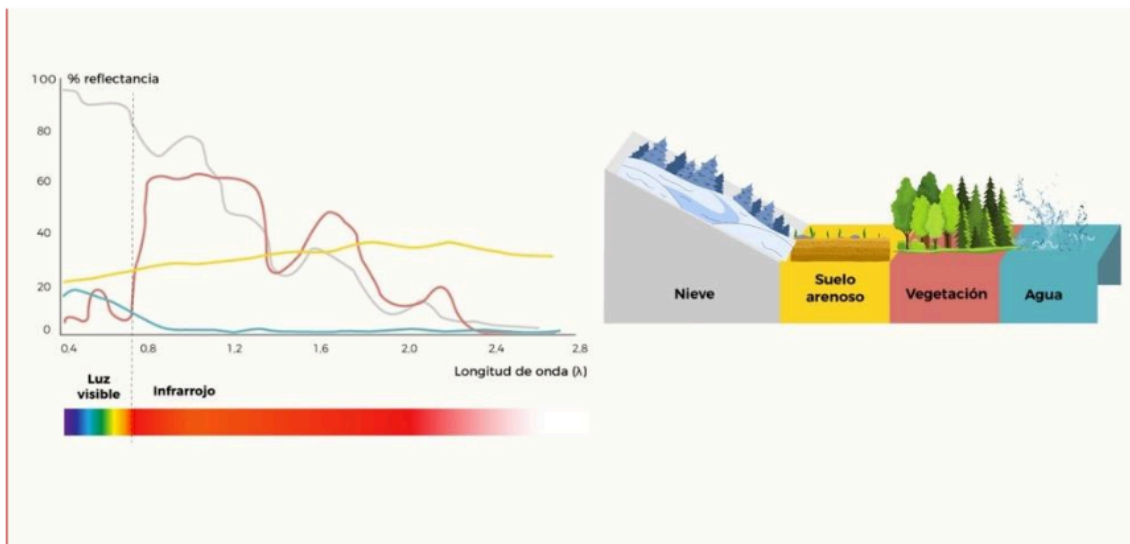


Figura 5.6. Representación gráfica de la firma espectral de diferentes coberturas terrestres. Fuente: Modificado de <https://www.edu-sat.com/>.

La firma espectral permite diferenciar los diferentes tipos de cobertura, lo que nos lleva a generar mapas de uso de suelo y de vegetación (Figura 5.7), pero también nos ayuda a monitorear fenómenos como la deforestación, tan solo con analizar el comportamiento de la firma espectral en una escala temporal. Estos análisis son posibles gracias a que la vegetación densa refleja mucho la luz en el espectro del infrarrojo cercano y absorbe la luz visible, particularmente en el espectro del rojo, debido a la clorofila. En contraste, las áreas deforestadas o degradadas tendrán firmas espectrales diferentes, reflejando menos en el infrarrojo cercano y más en el espectro visible, lo que facilita su identificación (Jensen, 2007), permitiendo identificar la pérdida de bosques incluso en etapas tempranas, algo imposible de detectar a simple vista (Townshend *et al.*, 2012). La deforestación es uno de los procesos que más se han estudiado a nivel mundial mediante el uso de imágenes satelitales, obteniendo datos importantes sobre la pérdida de los bosques, permitiendo realizar acciones para su conservación y monitoreo (Asner *et al.*, 2009; Hansen *et al.*, 2013).

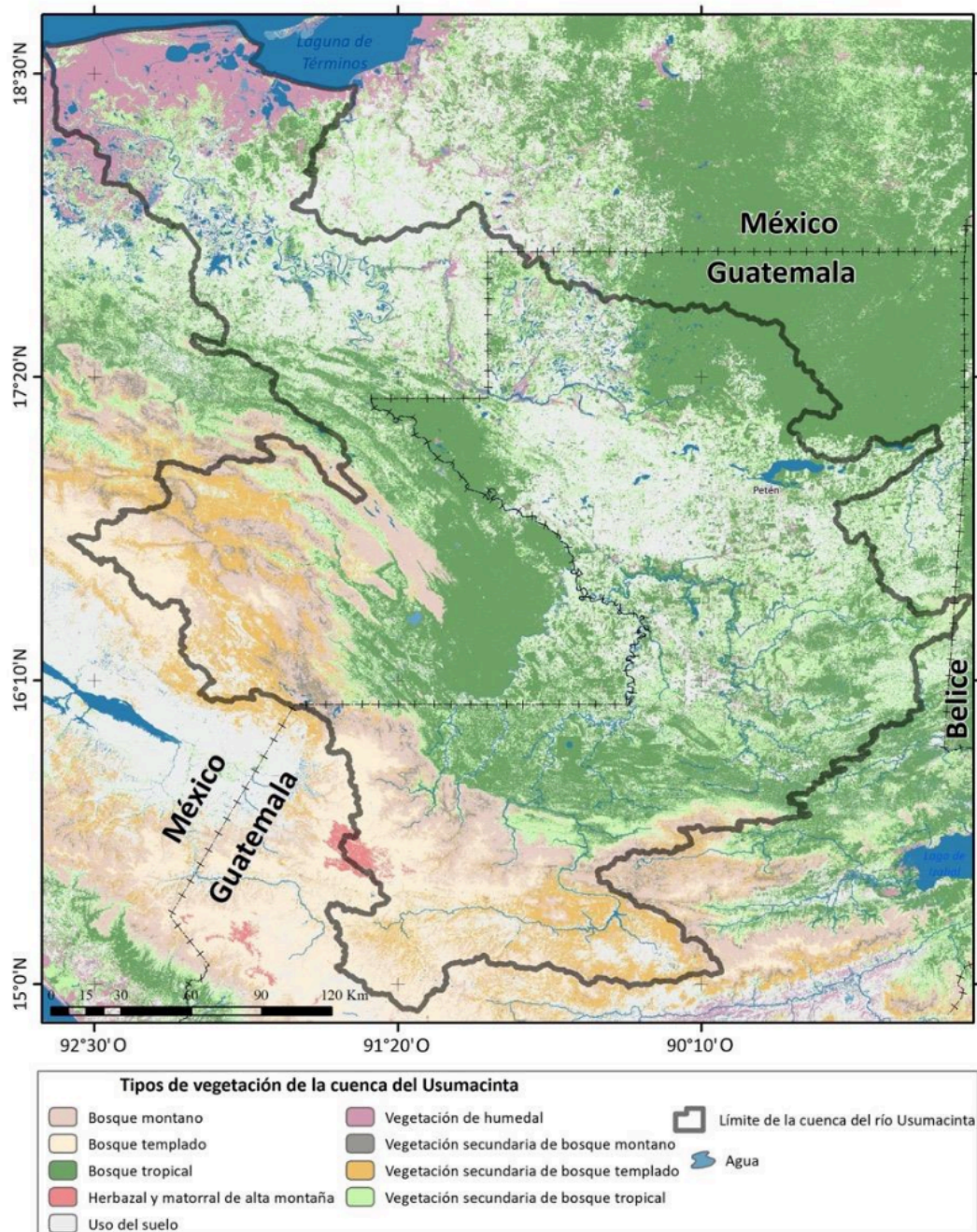


Figura 5.7. Mapa de la vegetación en 2021 de la cuenca del río Usumacinta. Este mapa es resultado del primer ejercicio para evaluar el estado actual de la cubierta vegetal en una cuenca binacional. Tomado de Meave et al. (2021).

Además de la deforestación, mediante el uso de información geoespacial es posible monitorear otros procesos ambientales importantes, como es el caso de la desertificación, esto mediante la identificación de áreas donde el suelo se está degradando y la vegetación está disminuyendo, lo que es un indicador clave de este fenómeno. En el Sahel, la región subsahariana, la información espacial ha servido para evaluar la efectividad de las iniciativas de reforestación y restauración del paisaje, proporcionando evidencia sobre qué áreas están recuperándose y cuáles necesitan intervención adicional (Herrmann *et al.*, 2005). Por otra parte, la expansión urbana también es analizada eficientemente con información espacial, debido a que permite mapear la extensión de la urbanización y su impacto en los ecosistemas circundantes. Estos análisis son la base para lograr una planificación urbana sostenible, ya que proporciona datos sobre las consecuencias de la expansión urbana en la calidad del aire, el acceso a recursos hídricos y la biodiversidad local (Xie *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020).

Modelado y predicción climática

El clima tiene una naturaleza dinámica y caótica, debido a que involucra una gran cantidad de variables interrelacionadas (p. ej. temperatura, humedad, presión atmosférica, corrientes oceánicas), y un pequeño cambio en una variable puede afectar al resto del sistema. Es por ello que, a pesar de los avances tecnológicos y el gran número de datos capturados en la actualidad, sigue siendo un reto importante poder generar modelos exactos para predecir los cambios climáticos. Sin embargo, de acuerdo con la escala temporal, la complejidad de predicción tiende a variar. A corto plazo, como el pronóstico del tiempo para unos días, tienden a tener predicciones bastante precisas (Parashar y Johri, 2021). En la medida en que el tiempo se alarga queriendo predecir semanas, meses o períodos estacionales (p. ej. fenómeno del niño y niña), la precisión disminuye, pero estas predicciones siguen siendo útiles para informar sobre tendencias generales (Esteves *et al.*, 2019). Ahora bien, si la predicción abarca décadas o siglos, los análisis se centran en realizar escenarios posibles, los cuales permiten comprender las respuestas de los ecosistemas a los diferentes cambios en las variables modeladas (Figura 5.8), incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Brown y Caldeira, 2017).

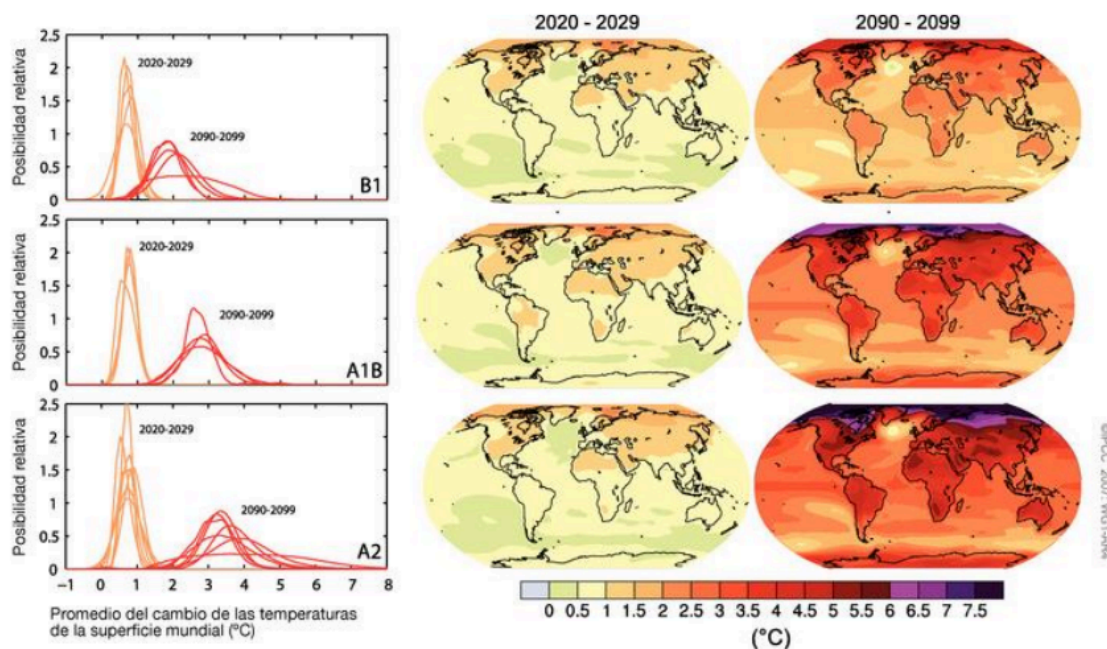


Figura 5.8. Cambios de temperatura proyectados para principios y finales del siglo XXI con respecto al periodo 1980–1999. Los paneles centrales y el derecho muestran el promedio de las proyecciones multimodelos MCGAO para los escenarios IE-EE I B1 (arriba), A1B (en el medio) y A2 (abajo) promediados en los decenios 2020–2029 (centro) y 2090–2099 (derecha). Los paneles a la izquierda muestran las incertidumbres correspondientes como probabilidades relativas del calentamiento medio mundial estimado en varios estudios de MCGAOs y del Modelo del Sistema Terrestre de Complejidad Intermedia para los mismos periodos. Algunos estudios solo presentan los resultados de un subconjunto de escenarios del IE-EE, o de varias versiones de los modelos. Por tanto, la diferencia en el número de curvas mostradas en los paneles de la izquierda sólo se debe a diferencias en la disponibilidad de los resultados. Fuente: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.

Los modelos climáticos geoespaciales no solo permiten anticipar los cambios físicos, sino que también brindan perspectivas cruciales sobre los impactos socioeconómicos del cambio climático. Realizar modelos sobre la expansión de zonas áridas en consecuencia del calentamiento global, permite anticipar cómo estos cambios afectarán la producción agrícola, la disposición del agua y la migración de poblaciones. La información geoespacial facilita la

identificación de áreas particularmente vulnerables, lo que permite a los tomadores de decisiones priorizar recursos y esfuerzos en las zonas que más lo necesitan (Liu *et al.*, 2020). Otra dimensión importante de la predicción climática es la capacidad para evaluar la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos, como huracanes, inundaciones y sequías. Los datos históricos geoespaciales permiten identificar tendencias en la ocurrencia de estos eventos, los cuales son utilizados para predecir futuros escenarios (Xie *et al.*, 2018). Los modelos proporcionan a los responsables políticos la información necesaria para tomar decisiones informadas y estratégicas. Esto es esencial para diseñar políticas públicas efectivas que no solo respondan a los desafíos actuales, sino que también mitiguen los riesgos futuros del cambio.

Caso de estudio en el Sureste: uso de imágenes satelitales para identificación de parcelas de limón Persa con presencia de Huanglongbing

El cambio climático afecta directamente la seguridad alimentaria global, al influir en el cambio de las condiciones agroclimáticas con las que se desarrolla cada cultivo. Con la alteración de los patrones de temperatura y precipitación, se crean condiciones que favorecen la expansión de diversas plagas y enfermedades (FAO, 2021), las cuales llegan a provocar pérdidas que oscilan entre el 20% y el 40% de la producción mundial de alimentos (FAO, 2020). Un ejemplo significativo es el Huanglongbing (HLB), causado por bacterias del género *Candidatus Liberibacter*, que afecta principalmente a los cítricos. Esta enfermedad es considerada la más compleja, destructiva e incurable dentro de la industria citrícola, causando grandes pérdidas económicas a nivel global (NAPPO, 2012; Gottwald *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2020). Para lograr detectar esta enfermedad de forma más eficaz se realizó un estudio en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México, principal zona citrícola de la región. Con un clima cálido y húmedo, caracterizado por una temperatura promedio de 26.2 °C y una precipitación anual de 2,290.3 mm, Huimanguillo proporciona un entorno favorable para la proliferación de esta enfermedad.

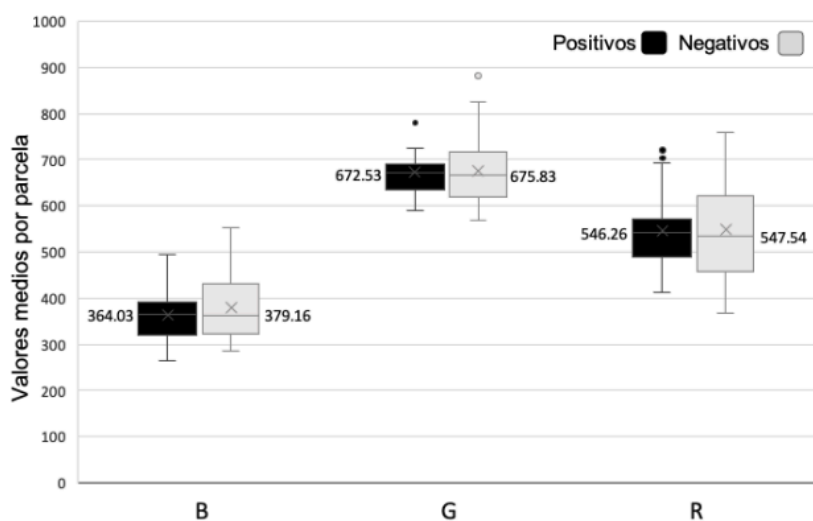
Para la detección y monitoreo del HLB, se utilizaron imágenes satelitales del satélite Landsat 8, capturadas por el sensor OLI (Operational Land Imager). Estas imágenes se procesaron en Google Earth Engine, creando un mosaico anual que representó las condiciones del año del

muestreo (2014). Las bandas procesadas fueron azul, verde, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, con una resolución espacial de 30 metros. El análisis se centró en 60 parcelas de limón, 36 parcelas de limón libres de HLB y 24 parcelas infectadas. A partir de las parcelas y con la superposición de las imágenes de satélite, se calcularon estadísticas de reflectancia, agrupando el resultado de acuerdo a su nivel de infección (parcelas infectadas y las sanas). Este análisis permitió ver las diferencias espectrales asociadas al HLB. Adicionalmente, para hacer más robusto el análisis se utilizaron dos índices espectrales. El índice de clorofila (GCI, por sus siglas en inglés) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El GCI representa el estrés fisiológico de los árboles, para calcularlo se utilizan las bandas NEAR y G (ecuación 2). El NDVI es un índice ampliamente utilizado en el análisis de la vegetación, se calcula utilizando las bandas NIR y R (ecuación 1). Este índice se basa en el principio de que la clorofila absorbe fuertemente la luz visible y refleja la luz en el infrarrojo (particularmente en el NIR) (Li *et al.*, 2015). Las fórmulas de los índices para Landsat 8 son las siguientes:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Banda 5 (NEAR)} - \text{Banda 4 (R)}}{\text{Banda 5 (NEAR)} + \text{Banda 4 (R)}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

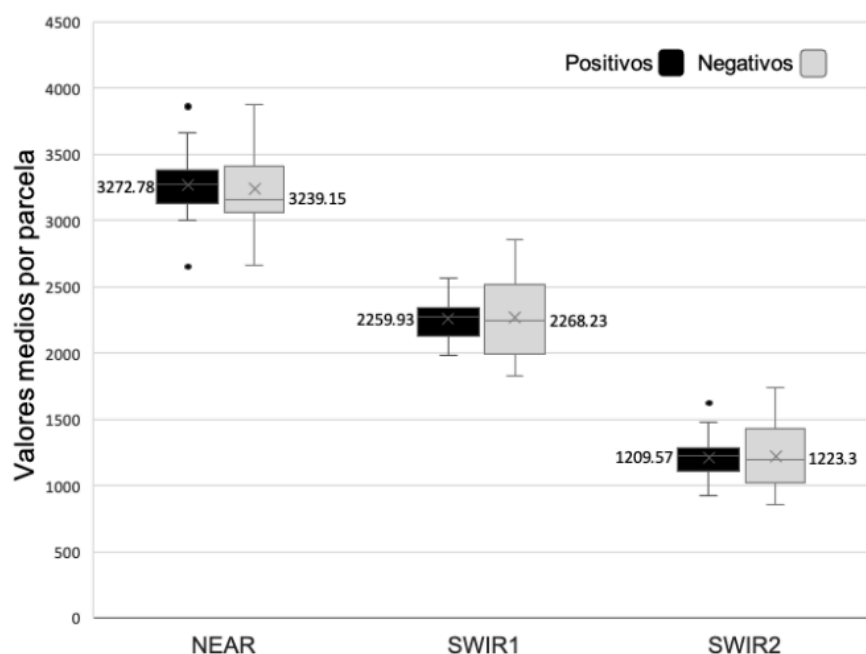
$$\text{GCI} = \frac{\text{Banda 5 (NEAR)} - 1}{\text{Banda 3 (G)}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Los resultados del análisis mostraron que las bandas del espectro visible sí presentan una variación en los valores de la reflectancia espectral promedio entre las parcelas infectadas y las sanas (Gráfica 5.1). Las parcelas sanas presentaron mayores valores promedio de reflectancia en las tres bandas visibles, pero solo la banda Azul (B) mostró diferencias estadísticamente significativas ($t = 0.87$, $p\text{-valor} = 0.38$). Este comportamiento se alinea con lo mencionado por Peña *et al.* (2019), quienes señalan que la luz es fuertemente absorbida en el espectro azul debido a los pigmentos fotosintéticos.



Gráfica 5.1. Resumen de las estadísticas de bandas espectrales individuales del espectro visible del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativos (sanas).

En cuanto a la banda del Infrarrojo Cercano (NIR), se observó una asimetría positiva en las parcelas sanas, con un valor medio de 3,239.15 (desviación estándar = 282.84), mientras que otras bandas mostraron una distribución más simétrica (Gráfica 5.2). Las bandas SWIR1 y SWIR2, que ayudan a detectar la humedad y el estrés en la vegetación, presentaron menor reflectancia promedio en las parcelas infectadas, sugiriendo un posible estrés en las plantas afectadas, tal como lo reporta Franklin (2001).



Gráfica 5.2. Resumen de las estadísticas de las bandas cinco, seis y siete del satélite Landsat 8 calculados para las parcelas con categoría Positiva (con HLB) y Negativas (sanas).

El análisis estadístico reveló que la banda Azul (B) fue la única que mostró diferencias estadísticamente significativas entre parcelas infectadas y sanas. Aunque las bandas SWIR1 y SWIR2 no mostraron diferencias significativas en este estudio, podrían tener un potencial considerable para futuras investigaciones en la detección del HLB. En cuanto los índices de vegetación NDVI y GCI. Aunque se esperaba una clara diferenciación entre parcelas infectadas y sanas, la prueba t de Student no mostró diferencias significativas en las medias de ambos grupos ($t = 0.24$, $p\text{-valor} = 0.81$). No obstante, los valores extremos de estos índices (mínimos y máximos) sí revelaron diferencias significativas, sugiriendo variaciones que podrían reflejar distintos niveles de estrés en las plantas. Estos índices son herramientas valiosas para obtener información sobre clorofila, carotenoides, agua y otros compuestos, como se ha demostrado en estudios previos, incluido el de Morillo *et al.* (2018) con imágenes Landsat 8.

Las imágenes de mediana resolución como las Landsat 8 tienen un potencial prometedor para la detección del Huanglongbing (HLB) en parcelas de cítricos, especialmente al estar disponibles de manera gratuita y presentan un periodo largo de datos. La banda azul (B) demostró ser particularmente útil, mostrando diferencias estadísticamente significativas en la reflectancia entre parcelas infectadas y sanas, lo que indica su capacidad para distinguir entre estos estados. Sin embargo, las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR1 y SWIR2), mostraron tendencias, pero estas no fueron significativas, limitando su efectividad en este contexto. En el marco del cambio climático y global, donde el aumento de plagas y enfermedades agrícolas es exacerbado por las alteraciones climáticas, este tipo de herramientas de monitoreo se vuelven esenciales para fortalecer la resiliencia del sector agrícola. Por tanto, estos resultados, aunque preliminares, resaltan la necesidad de continuar investigando y mejorando el uso de imágenes satelitales para la detección temprana de enfermedades, contribuyendo así a la seguridad alimentaria en un mundo cada vez más vulnerable a los efectos del cambio climático.

Referencias

- Al-Yadumi, S., Xion, T. E., Wei, S. G. W., y Boursier, P. (2021). Review on integrating geospatial big datasets and open research issues. *IEEE Access*, 9, 10604-10620.
- Asner, G. P., Flint Hughes, R., Varga, T. A., Knapp, D. E., y Kennedy-Bowdoin, T. (2009). Environmental and biotic controls over aboveground biomass throughout a tropical rain forest. *Ecosystems*, 12, 261-278.
- Brown, P. T., y Caldeira, K. (2017). Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget. *Nature*, 552(7683), 45-50.
- Callaghan, M. W., Minx, J. C., y Forster, P. M. (2020). A topography of climate change research. *Nature Climate Change*, 10(2), 118-123.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentos de percepción remota* (3.^a ed.). Ediciones Paraninfo.
- Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W. F., Azevedo, I. M., Bruine de Bruin, W., Dalkmann, H., ... y Weber, E.U. (2018). Towards demand-side solutions for mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 8(4), 260-263.

- Deng, X., Zhu, Z., Yang, J., Zheng, Z., Huang, Z., Yin, X., Wei, S., y Lan, Y. (2020). Detection of citrus huanglongbing based on multi-input neural network model of UAV hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing*, 12(17), 2678.
- Esteves, J.T., de Souza Rolim, G., y Ferraudo, A. S. (2019). Rainfall prediction methodology with binary multilayer perceptron neural networks. *Climate Dynamics*, 52, 2319-2331.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). *Sanidad vegetal y seguridad alimentaria*.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2021). *Plagas y enfermedades de las plantas*.
- Fargher, M. (2019). The role of geography and geospatial technologies in ‘Taking on the world’. *Geospatial Technologies in Geography Education*, 175-182.
- Franklin, S.E. (2001). *Remote sensing for sustainable forest management*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ley García, J., y Mas, J.-F. (2018). *Análisis geoespacial en los estudios urbanos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073001465e.2018>
- Garnett, S. T., Burgess, N. D., Fa, J. E., Fernández-Llamazares, Á., Molnár, Z., Robinson, C. J., ... y Leiper, I. (2018). A spatial overview of the importance of Indigenous lands for conservation. *Nature Sustainability*, 1(7), 369-374.
- 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.
- Gottwald, T.R., Graça, J.V.D., y Bassanezi, R.B. (2007). Citrus huanglongbing: the pathogen and its impact. *Plant Health Progress*, 8(1), 31. <https://doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV>
- Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., ... y Townshend, J.R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *science*, 342(6160), 850-853.
- Herrmann, S M., Anyamba, A., y Tucker, C.J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(4), 394-404.

- Jensen, J.R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Education India.
- Jia, G. (2020). The role of big Earth data in understanding climate change. *Big Earth Data*, 4(2), 91-93.
- Kerski, J.J. (2008). The role of GIS in Digital Earth education. *International Journal of Digital Earth*, 1(4), 326-346.
- Koldasbayeva, D., Tregubova, P., Gasanov, M., Zaytsev, A., Petrovskaia, A., y Burnaev, E. (2023). Challenges in data-based geospatial modeling for environmental research and practice. *arXiv preprint arXiv:2311.11057*.
- Li, X., Lee, W. S., Li, M., Ehsani, R., Mishra, A.R., Yang, C., y Mangan, R.L. (2015). Feasibility study on Huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery. *Biosystems Engineering*, 132, 28-38.
- Liu, D., Clarke, K. C., y Chen, N. (2020). Integrating spatial nonstationarity into SLEUTH for urban growth modeling: A case study in the Wuhan metropolitan area. *Computers, Environment and Urban Systems*, 84, 101545.
- Morillo-Díaz, G., Aldana-Villasmil, G. J., Pineda, Á., y Royero-Orozco, G.A. (2018). Estimación de clorofila a en el Lago de Maracaibo, Venezuela utilizando imágenes LANDSAT 8. *Mapping (1131-9100)*, 27(188).
- NAPPO (North American Plant Protection Organization). (2012). *Protocolos de diagnóstico de la NAPPO. PD 02. Huanglongbig de los cítricos*. México-USA-Canadá. 11 pp.
- Peña, L., Rentería, V., Velásquez, C., Ojeda, M.L., y Barrera, E. (2019). Absorbancia y reflectancia de hojas de Ficus contaminadas con nanopartículas de plata. *Revista Mexicana de Física*, 65(1), 95-105.
- Parashar, N., y Johri, P. (2021, March). Short-Term Temperature and Rainfall Prediction at Local and Global Spatial Scale: A Review. In *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)* (pp. 742-746). IEEE.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., ... y Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.

- Sun, X., Crittenden, J.C., Li, F., Lu, Z., y Dou, X. (2018). Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA. *Science of the Total Environment*, 622, 974-987.
- Schrodt, F., Bailey, J.J., Kissling, W.D., Rijdsdijk, K.F., Seijmonsbergen, A.C., Van Ree, D., ... y Field, R. (2019). To advance sustainable stewardship, we must document not only biodiversity but geodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(33), 16155-16158.
- Shepherd, A., Ivins, E.R., Rignot, E., Smith, B., Van Den Broeke, M., Velicogna, I., ... y Briggs, K.H. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558(7709), 219-222. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
- Townshend, J.R., Masek, J.G., Huang, C., Vermote, E.F., Gao, F., Channan, S., ... y Wolfe, R. E. (2012). Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 5(5), 373-397.
- Tsatsaris, A., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Louka, P., Tsanakas, K., Tssemelis, D. E., ... y Chalkias, C. (2021). Geoinformation technologies in support of environmental hazards monitoring under climate change: An extensive review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), 94.
- Xie, W., Huang, Q., He, C., y Zhao, X. (2018). Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: A case study in Beijing, China. *Ecological indicators*, 84, 183-193.
- Wu, C.D. (2019). Application of geospatial information technologies in assessing changes in regional health risks related to climate change. *Hu Li Za Zhi*, 66(3), 14-22.

Capítulo 6. Indicadores de arribazón de sargazo por medio del uso de drones

Oscar Frausto-Martínez*

Linda Rachel Martell-Hernández^{††}*

José Francisco Rodríguez-Castillo***

Sergio Esteban De León-López****

Jonathan Alfredo Solís-Sánchez*****

Resumen

La función de los ecosistemas presenta clara tendencia de incertidumbre ante el impacto del cambio del clima. Una de estas evidencias es la producción de algas, en específico de algas pelágicas de sargazo en el Caribe y que, en la actualidad, se reconoce como el Gran Cinturón del Atlántico de Sargazo. Si bien, la identificación de las zonas de crecimiento y génesis es importante, para el caso de las costas del Caribe mexicano, lo imperante se centra en el arribazón de las masas y su acumulación a lo largo de los ecosistemas costeros. Uno de los retos principales del arribazón de sargazo se centra en la determinación de éste, lo cual se ha derivado en modelos gruesos a nivel regional (por la fuente y escala de resolución) y que, en este estudio, a través de la implementación de drones, se detalla la escala y los procesos de gestión en la costa. Para ello, se desarrollaron vuelos de cohorte en el año 2019 en tres playas de la costa oriental de isla Cozumel, cuyo fin fue estimar los arribazones y, a partir de ello,

* Doctor ingeniero geógrafo por la Universidad Bauhaus, Alemania. Profesor investigador de la División de desarrollo sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Miembro de la Academia de Geografía de la Sociedad Mexicana de Geografía y estadística e Integrante de la Red desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos del CONAHCyT. ORCID: 0000-0002-6610-5193. ofrausto@uqroo.edu.mx

^{††} Doctoranda en Desarrollo sostenible, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Integrante de la Red desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos del CONAHCyT, ORCID: 0009-0000-7194-2570; martell2909@hotmail.com.

*** Maestro en ciencias marinas y costeras, licenciado en manejo de recursos naturales. Investigador asociado del laboratorio de observación e investigación espacial de la Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo. ORCID: 0000-0003-3573-0591; 1620096@uqroo.mx

**** Maestro en Planeación por la Universidad Autónoma del estado de México. Facultad de Planeación Urbana. Universidad Autónoma del Estado de México. Integrante de la Red desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos del CONAHCyT ORCID: 0000-0002-9445-0701; cheko76@hotmail.com

***** Licenciatura en manejo de recursos naturales por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, auxiliar de investigación del laboratorio de observación e investigación espacial; 2332948@uqroo.mx

determinar indicadores para desarrollar una prospectiva de gestión local del sargazo en un contexto de incertidumbre ante el cambio climático, centrados en el cálculo de biomasa, recolecta de sargazo y tipo de balsas de sargazo.

Palabras clave: *gestión, sargazo pelágico, islas, métricas, cuantificación*

Antecedentes

El aumento del arribo de grandes cantidades de algas en la zona costera es reconocido como un problema de gestión a nivel mundial (Smetacek y Zingone, 2013; Joniver *et al.*, 2021). Los primeros reportes de proliferación y arribazón de sargazo se registraron en 1981, en las playas de Bermudas (1988). Desde 2011 han recalado en las costas del Caribe, de manera inesperada y abrupta, algas de tipo *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, y es un fenómeno recurrente y cada vez conde mayor intensidad (Arita *et al.*, 2023); estos arribazones atípicos de sargazo y su acumulación en las playas se reportó primeramente en las costas de África occidental (Addico y de Graft-Johnson, 2016). Su transporte se asocia a la circulación oceánica y vinculada al Gran cinturón de sargazo del Atlántico, con una variabilidad interanual entre primavera y verano (Wang y Hu, 2017).

Según Marsh *et al.* (2023), los impactos del cambio climático, principalmente el aumento de temperatura, puede ser la causa de una extraordinaria proliferación de especies pelágicas de sargazo en el Atlántico tropical desde 2011, siendo su nivel récord en el verano de 2022. Así, el arribazón de sargazo trae como consecuencia la modificación de las condiciones de la zona próxima a la playa, en los estuarios y en los sistemas de playa – duna a lo largo de la costa y genera la eutroficación, el cambio de las condiciones del agua de mar (reducción de luz, oxígeno y pH) (van Tussenbroek *et al.*, 2017) y la muerte de especies marinas demersales y crustáceos, principalmente (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2019).

Ante este escenario, la importancia de los estudios sobre sargazo va en aumento, de unos cuantos, en 2011, a más de 250 en 2022; el 70% de estos estudios se concentran en el análisis y caracterización natural del sargazo y 30% en estudios aplicados vinculados con salud humana, valorización económica y gestión del problema (Arita *et al.*, 2023). En este último tipo de estudios, Sanseverino *et al.* (2016), destacan el impacto a cuatro sectores

socioeconómicos principales: a) salud humana, b) pesquerías comerciales, c) turismo/recreación, y d) la gestión/monitoreo de los arribazones.

En el caso particular del Caribe mexicano, se reconoce que las capacidades económicas y operativas del gobierno en sus tres niveles, así como de las empresas dedicadas a los servicios turísticos que han sido excedidas por la problemática del arribazón de sargazo y se ha actuado de manera reactiva, dejando de lado la gestión sostenible de la biomasa arribada a las playas; por lo que, los resultados que han sido efímeros impactando económica social y ambientalmente a la región (Fraga y Robledo, 2022).

Además, las investigaciones han girado en torno de dos necesidades: conocer biológicamente a la especie y reconocimiento de los impactos sociales, ambientales y económicos que trae consigo este fenómeno (Van Tussenbroek, 2017; Rodríguez-Martínez y van Tussenbroek, 2017). Conjuntamente, se estableció en el año 2019, la “Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico en México” que coordinó el CONACYT (2019), en el cual se establecieron 9 líneas estratégicas (colección, recolección y disposición; normatividad, comunicación y educación, monitoreo, modelación y alerta temprana; origen e importancia ecológica; impactos socioeconómicos y ambientales; aprovechamiento y usos; cooperación internacional y restauración), donde el monitoreo, la modelación y la alerta temprana son fundamentales.

Para el monitoreo y modelación del sargazo a través de sensores remotos, al inicio se orientó a la identificación de clorofila, seguido del reconocimiento de distribución y abundancia en el océano; además de destacar las grandes limitantes del uso de estas técnicas (periodicidad de captura, resolución, nubosidad, intensidad de luz, profundidad del agua, turbidez, área de análisis, entre otras) (Lazcano-Hernández *et al.*, 2023) y el estudio para el análisis de sargazo en la playa – costa y a nivel local es reciente (Rodríguez-Martínez, 2022). Aunado a lo anterior, para la toma de decisiones, se hace necesario evitar la redundancia y, con ello, generar indicadores base que permitan tener información certera para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas (Shuai Zhang *et al.*, 2022; de la Barreda-Bautista *et al.*, 2023).

Lo anterior ha generado preguntas básicas: ¿Cuál es la extensión y cobertura del sargazo a lo largo de las costas y playas? ¿cuál es el volumen de sargazo en el mar? ¿Cuánta es la cantidad de biomasa que arriba a la playa? ¿Qué tipos de parches son comunes del arribazón? Las

respuestas a estos cuestionamientos ayudaran a mejorar los pronósticos y modelos de manejo del arribazón del sargazo pelágico a nivel local, por lo que este trabajo tiene por objetivo definir indicadores para la gestión del arribazón del sargazo usando drones (vehículos aéreos no tripulados – VANTs).

Materiales y métodos

Área de estudio

La isla de Cozumel se ubica en el noroeste de la península de Yucatán, a 16 km del sector continental, es parte de los sistemas insulares del Caribe mexicano. Se localiza a 20° 28' N, 86° 55' W (Figura 6.1). El clima es cálido y húmedo con abundantes lluvias en verano. La temperatura media anual es de 25,5°C y las precipitaciones alcanzan los 1.504 mm al año. Los ciclones tienen un efecto importante, aumentando la cantidad de precipitaciones en verano (Orellana *et al.*, 2007). Las corrientes marinas en el mar caribe de México se origina en las Antillas rumbo Cozumel, donde se bifurcan hacia el norte y sur, donde hay acarreo de materiales transportados (Sandoval, 2007) y donde las velocidades son discontinuas, paralelas a la línea de costa con corrientes de deriva (Chávez *et al.*, 2003; Alcérreca-Huerta *et al.*, 2019). Estas corrientes tienen gran influencia en el transporte y deposición de sargazo (Zhang *et al.*, 2024). Los sitios de muestreo se distribuyen en el sector oriental de la isla de Cozumel: a) Mezcalitos b) Playa Chen Río y c) Playa Bonita (Figura 6.2).

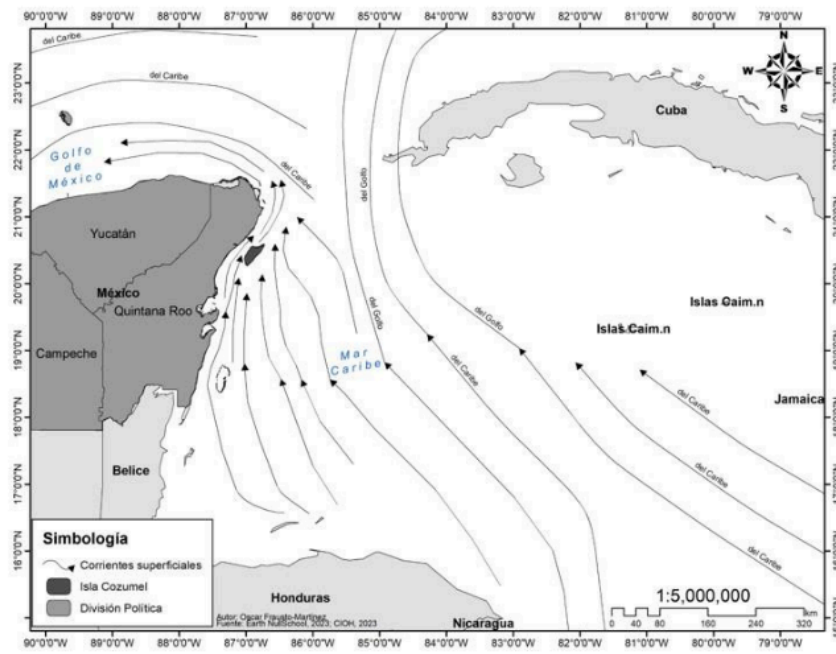


Figura 6.1. Isla Cozumel, contexto en el Caribe y corrientes marinas.

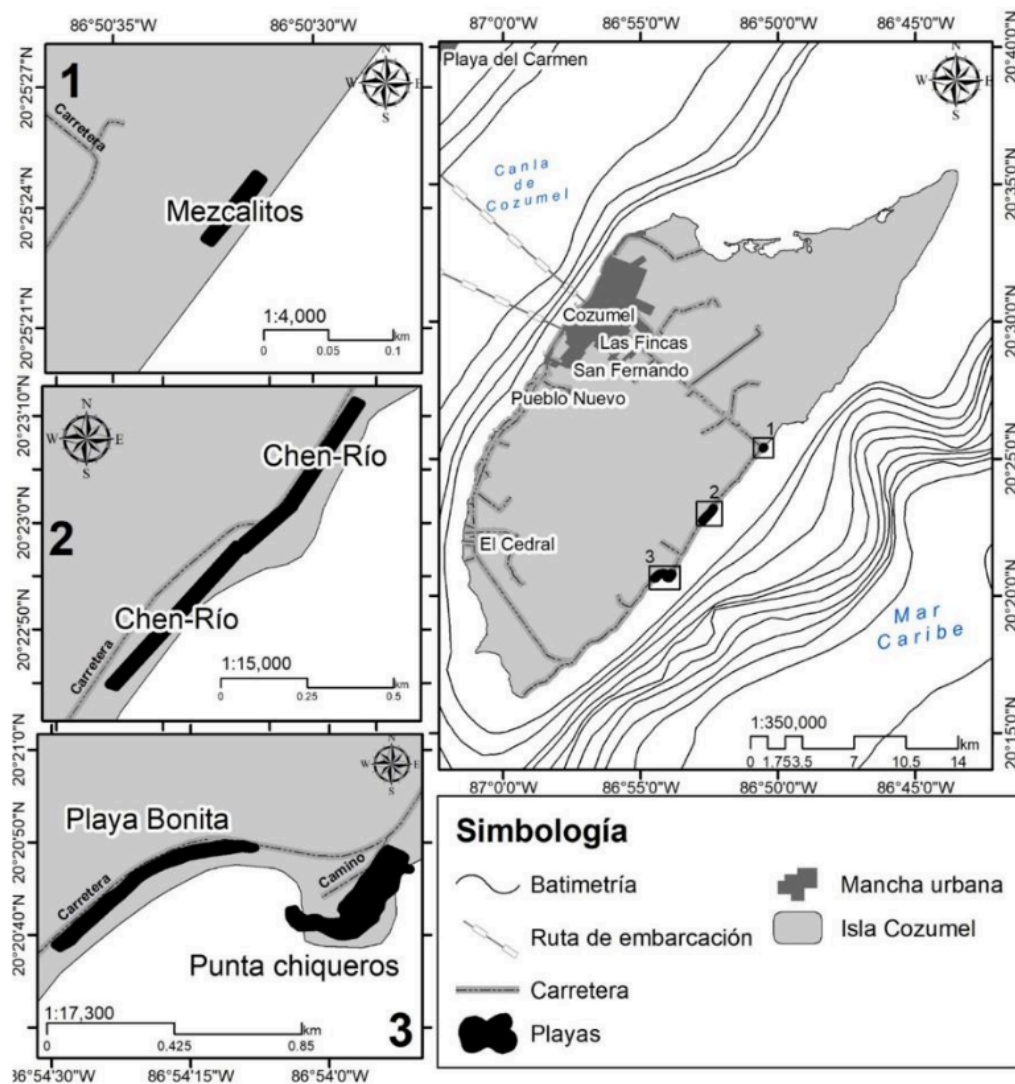


Figura 6.2. Sitos de muestreo de las tres playas a analizar.

Materiales y métodos

Se establecieron 5 fases para el análisis metodológico (Figura 6.3):

- Definición de vuelos y área de cobertura espacial y temporal. Consiste en el reconocimiento de la misión de vuelo del polígono de las cuatro playas a estudiar, donde se incluye el cálculo de la imagen y la resolución espacial; el vuelo se realizó a 150 m de altura, con un pixel promedio de 5.9 cm; la fecha de vuelo fue el 26 de

mayo de 2019. Para el procesamiento de datos se utilizó el software OpenDroneMaps (2020).

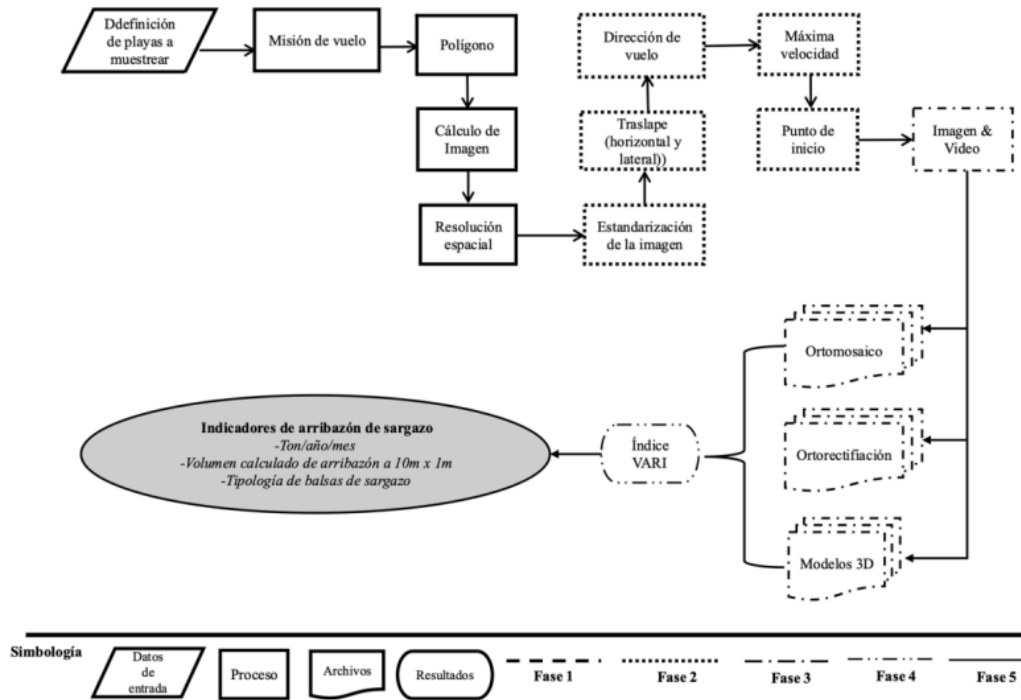


Figura 6.3. Secuencia metodológica.

- b) Estandarización de la imagen. Se estableció un traslape horizontal y lateral del 60% con una dirección automática del plan de vuelo, cuya máxima velocidad se estableció en función de los vientos locales en 15m/s y se utilizó el software DroneDeploy para la estandarización.
- c) Imagen y video. Se obtuvieron imágenes RGB con resolución espacial de hasta 4 cm por píxel, con dimensiones 4854 x 3648, con resolución horizontal y vertical de 72 ppp, con una profundidad de bits de 24; estas imágenes y videos se lograron para la fecha de vuelo en las tres playas analizadas. En la Tabla 6.1 se muestran las características de las imágenes y longitud analizada.

Tabla 6.1. Características de las imágenes del DRONE.

Playa	# imágenes	Longitud m	cm/pixel	Error cuadrático m
Mezcalitos	33	629	3	0.6
Chen Rio	33	443	4.1	3.2
Bonita	16	451	8.1	1.3

- d) Índice VARI. Las imágenes capturadas y los modelos ortorectificados obtenidos, se convierten en los insumos fundamentales para el análisis y la cuantificación de los arribazones de sargazo. Existen índices que trabajan sobre los valores digitales de píxel nativos de las bandas roja, verde y azul (RGB), para generar un índice de vegetación alternativo al NDVI. Por lo anterior se determinó hacer uso del Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), ya que este índice está diseñado para resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos, situación que se presenta en el monitoreo con drones a baja altitud (Martell-Hernández, 2021). El rango de valores que se obtienen con este índice puede contener números positivos y negativos, con los valores negativos se identifica la presencia de sargazo y la paleta de color que se emplea es un color análogo al NDVI. La fórmula de tratamiento espacial del índice VARI es:

$$\text{VARI green} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE})$$

- e) Indicadores de arribazón de sargazo. Para poder hacer comparables los resultados obtenidos en cada playa, es necesario tener una unidad de medida uniforme, por ello se eligió una distancia de diez metros lineales por un metro de anchura; de esta manera las medidas son estandarizadas para cada uno de los sitios de medición, permitiendo estimar las variaciones de los volúmenes entre playas y entre las imágenes de distintas épocas en cada una. Par ello los indicadores seleccionados son:
- Volumen de sargazo en playas. Modelado en función de una longitud de 10 m por 1.0 m para cada playa.
 - Arribazón anual de sargazo. Reportado por la ZOFEMAT – Local

- Tipología de las cinco clases de balsas de sargazo, con base en Ody *et al.* (2019):
a) aislado y disperso, b) hileras flotantes, c) hileras flotantes con parches pequeños (parques menores a 10 m de diámetro), d) hileras flotantes con dominio de parches grandes (de más de 10 m de diámetro) y e) parches grandes semicirculares (superan los 100 m de dimensión).

Resultados

Se procesaron 146 imágenes con una resolución de entre 3.0 y 8.1 cm/píxel, con promedio de 5.96 cm/píxel; con una longitud total de playa analizada de 5,123 m y l error cuadrático promedio total es de 1.68 cm (Figura 6.4).

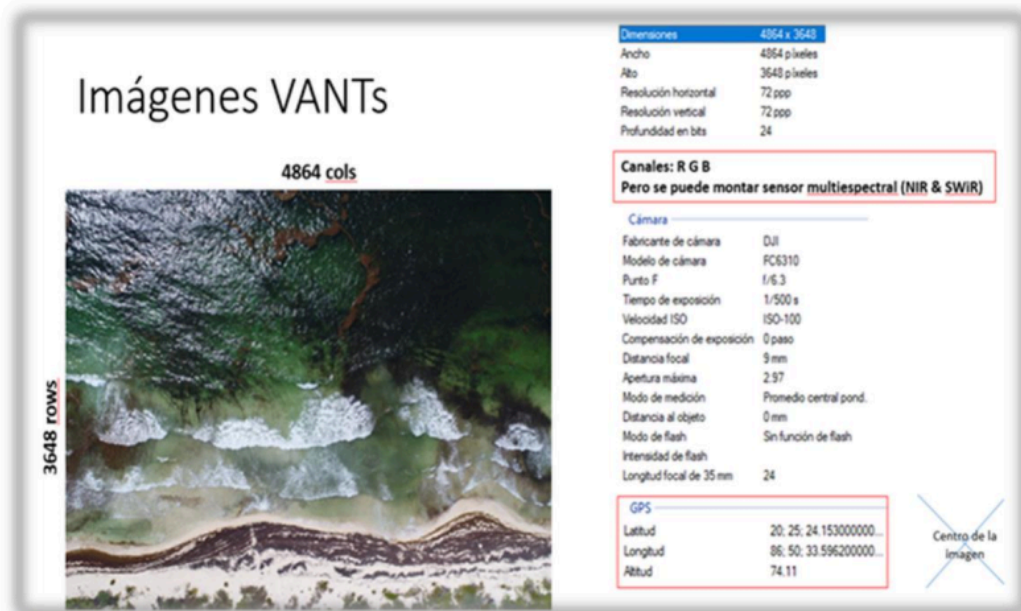


Figura 6.4. Ejemplo de imagen obtenida para el procesamiento de datos.

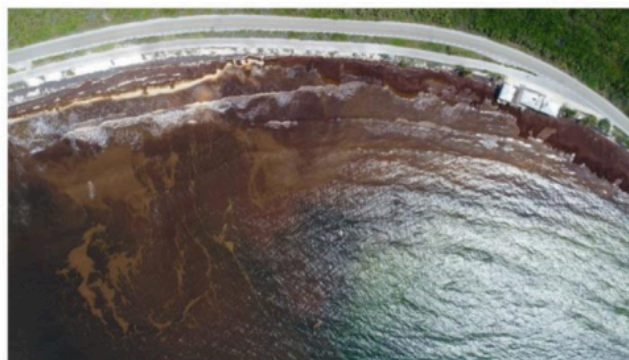
Las playas analizadas son de tipo bajas arenosas (Mezcalitos y Playa Bonita) (Figura 6.5) y de tipo abrasivas con plataformas de erosión (Chen Río).



Mezcalitos



Chen río



Playa Bonita

Figura 6.5. Ejemplo de las playas estudiadas.

- *Índice VARI*

Tradicionalmente se usa el índice de algas flotantes (Floating Algae Index, FAI, por sus siglas en inglés) propuesto por Hu (2009) y Hu *et al.*, (2015), el cual resulta de la diferencia entre la reflectancia a 859 nm ("borde rojo" de la vegetación) y una línea de base lineal entre la banda roja (645 nm) y la banda infrarroja de onda corta (1240 o 1640 nm). Para este estudio se usó el Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), con el fin de resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos, situación que se presenta en el monitoreo con drones a baja altitud. Los valores que se obtienen con este índice son positivos y negativos, en los valores negativos se identifica la presencia de sargazo y la paleta de color que se emplea es un color análogo al Índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI, por sus siglas en inglés. La figura 6.6 muestra el modelo de DRONE de playa Mezcalitos del 2021.

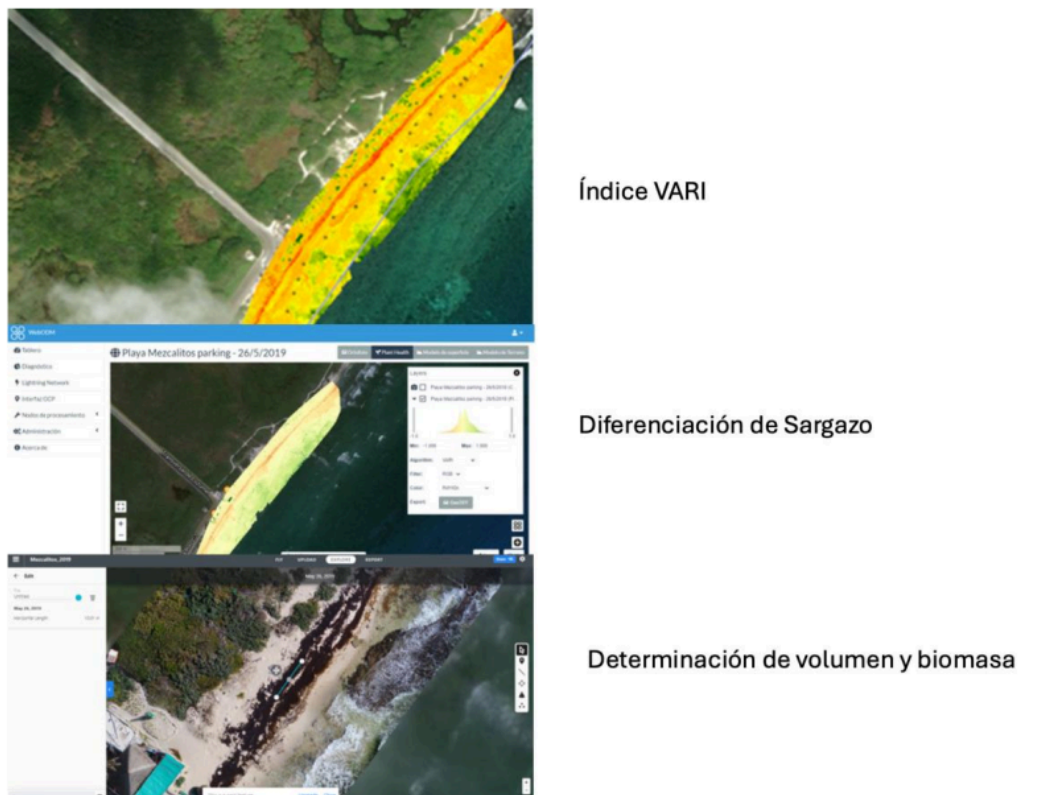


Figura 6.6. Reconocimiento del índice VARI, Diferenciación de Sargazo y Determinación de volumen y biomasa en playa Mezcalitos en 2019.

- *Indicadores de volumen y biomasa*

El cálculo de volumen se realizó para el año 2019 por medio de las calculadoras de modelado, en función de una longitud de 10 m por 1.0 m para cada playa (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. *Cálculo de volumen y biomasa para el año 2019.*

Playa	Área m ²	Volumen m ³	Biomasa m ³ /m
Mezcalitos	10.20	0.43	0.042
Chen Rio	10	0.56	0.056
Bonita	10	0.80	0.77

Fuente: Elaboración propia con datos de vuelo de Drone.

-Arribazón de sargazo en la isla de Cozumel

El seguimiento al monitoreo de colecta de sargazo en la isla de Cozumel se inició en octubre del 2018, con un seguimiento para los años 2019, 2020 y hasta octubre 2021 (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. *Recolecta de sargazo toneladas en la isla de Cozumel.*

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2018										37.07	73.1	46.1
2019	80.81	72.34	82.97	55.47	93.54	163.17	198.01	124	139	77	9.5	18.35
2020	13.1	74.65	114.21	3.1	62.18	132.11	219.45	143.89	159.99	15.75	56.99	64.71
2021	95.04	142.67	254	437.62	534.57	410.77	443.57	220.94				

Fuente: información proporcionada por la oficina de ZOFEMAT – Cozumel.

-*Tipo de balsas de sargazo*

Se distinguieron las siguientes balsas de sargazo para las cuatro playas, se reconoce la dirección de la corriente y la distribución de las balsas con respecto a la costa:

Para la playa Mezcalitos predominan balsas aisladas y dispersas, con hileras flotantes de hasta 3 km y ancho de 1 a 1.5m (Figura 6.7).



Figura 6.7. Balsas de sargazo en playa Mezcalitos. Mayo de 2019.

Por otra parte, para la playa Chen río se identifican hileras flotantes con dominio de parches grandes de entre 1m y 10m de diámetro (Figura 6.8).

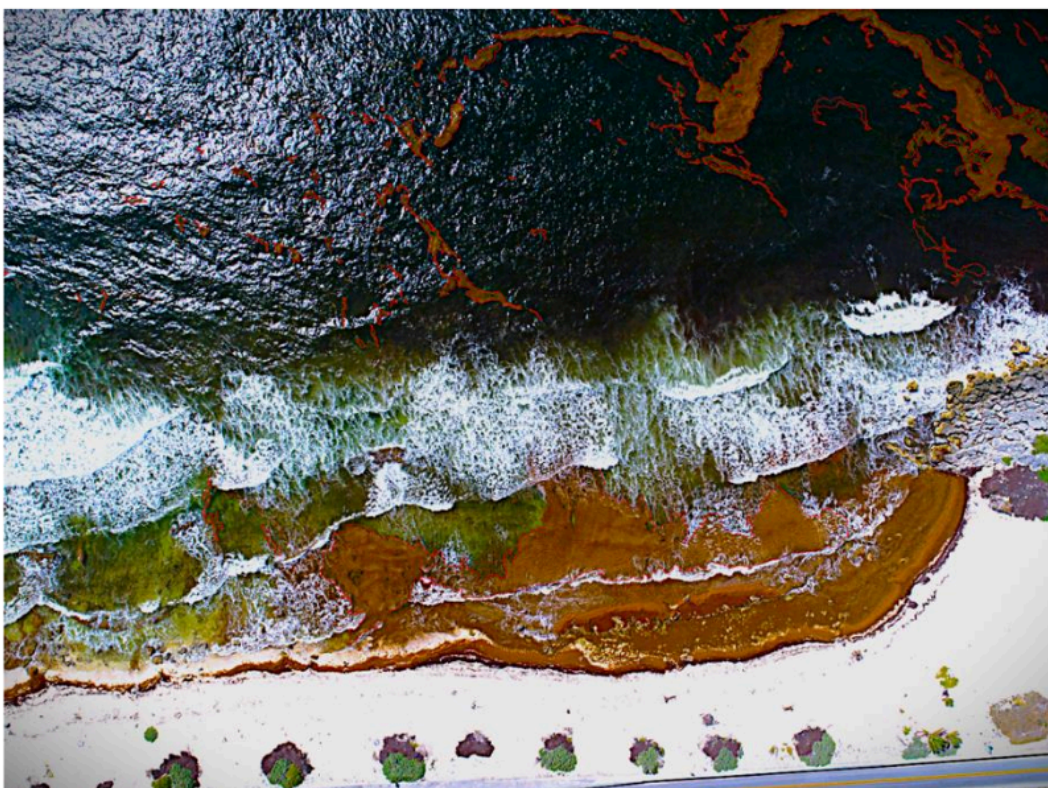


Figura 6.8. *Balsas de sargazo en playa Chen río. Mayo de 2019.*

Finalmente, para Playa Bonita, se identifican parches grandes, semicirculares que superan los 100 m de dimensión. Además de hileras flotantes de hasta 1 km de longitud y 3m de ancho (Figura 6.9). Esta playa es la más afectada, anualmente, por arribazones masivos desde el inicio de los arribazones en 2011.

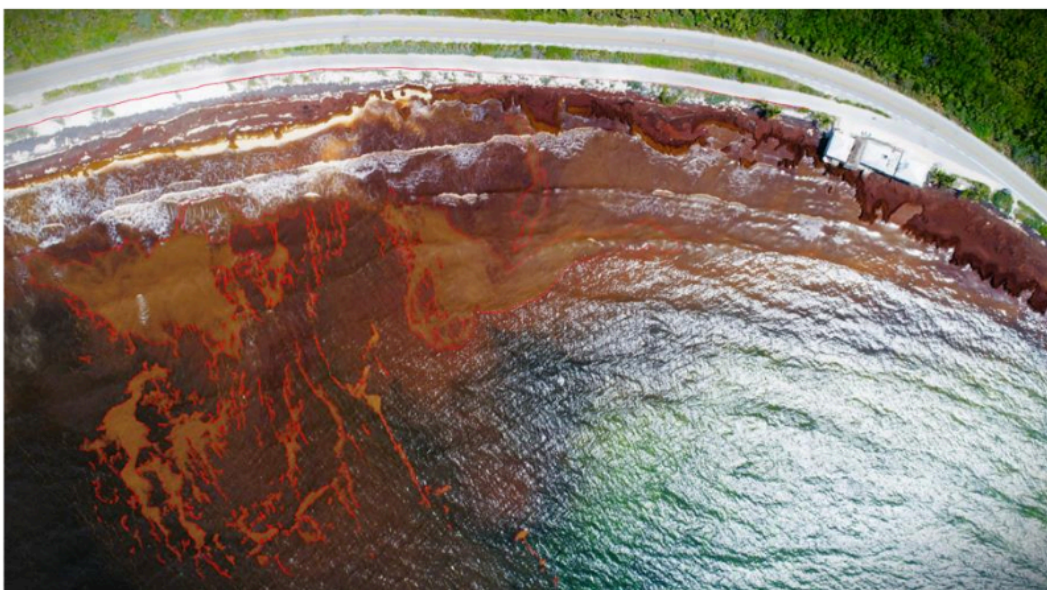


Figura 6.9. Balsas de sargazo en playa Bonita. Mayo de 2019.

Discusión

Las grandes tendencias de incertidumbre de los ecosistemas ante el impacto del cambio del clima muestran la necesidad de contar con monitoreos y procesos de seguimiento estandarizados y de alta confianza. El principal problema radica en los niveles de redundancia de datos para la toma de decisiones; para ello, coincidimos con Shuai Zhang *et al.*, (2022) en el diseño y creación de indicadores base que permitan tener información certera para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas fundamentado en las necesidades de los usuarios. En este estudio se proponen los siguientes:

- A) Estandarizar los procesos de captura de imágenes, desde la planificación del vuelo, la imagen y el video, que permita una restitución fotogramétrica de apoyo y que fundamente levantamientos posteriores del mismo sitio para generar bases de datos comparables en tiempo y en espacio. Esto permite, de acuerdo con Lazcano-Hernández *et al.* (2023), subsanar las grandes limitantes del uso de técnicas de percepción remota (periodicidad de captura, resolución, nubosidad, intensidad de luz, profundidad del agua, turbidez, área de análisis, entre otras).
- B) Uso del índice VARI como alternativa de uso en la estimación del arribazón de sargazo. El índice de algas flotantes (FAI) es el más usado teniendo en cuenta la

reflectancia, sin embargo, al no contar con imágenes periódicas, sensores espectrales se recurre al *Visible Atmospherically Resistant Index* (VARI), con el fin de resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos para vuelos de baja altura, donde los valores negativos del índice son congruentes con la identificación del sargazo arribado en la costa y, con el fin de representarlo cartográficamente, se emplea la paleta del NDVI. Lo anterior coincide con las recomendaciones de Hu *et al.* (2015), Chávez *et al.* (2020) y Rodríguez-Martínez (2022) para estudios a escala detallada.

- C) Si bien existen algoritmos que permiten el cálculo de la biomasa a través de la percepción remota, las externalidades representan una limitante fundamental en el uso de imágenes de satélite (Uribe-Martínez *et al.*, 2022; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023), por lo que el uso de Drones permite mejorar los monitoreos de periodicidad de captura de información, resolución y calidad e la imagen, minimizar la influencia de la nubosidad, reducir la influencia de la intensidad de luz, reconocer la influencia de la profundidad del agua en la diferenciación del sargazo, diferenciar áreas de turbidez y afinar las áreas de análisis, lo que reduce las limitantes de la percepción remota en el análisis del sargazo (Rodríguez-Martínez, 2022; Lazcano-Hernández *et al.*, 2023).
- D) El arribazón de sargazo en la isla de Cozumel es un caso singular a lo largo de la costa Caribe de México. Lo anterior debido a que este proceso se da en la costa oriental, la cual se caracteriza por sistemas naturales con bajo impacto. La colecta de sargazo en la isla de Cozumel entre 2018 y 2021 muestra una tendencia heterogenia, con altos niveles de variabilidad en la acumulación costera. En el mes de mayo de 2021 se registró una colecta de 534.57 toneladas en la costa oriental, superando el acumulado anual de los años anteriores. El mes de julio se identifica como el de mayor concentración para los tres años de monitoreo.
- E) Los tipos de arribazones de sargazo representan un reto en el diseño de las estrategias para la contención. Las tipologías se han orientado a describir las Balsas de sargazo en mar abierto (Ody *et al.*, 2019); En este estudio, se reconocieron los siguientes tipos: a) balsas aisladas y dispersas, b) hileras flotantes con parches y c) parches grandes semicirculares.

Conclusiones

La definición de indicadores para la gestión del arribazón del sargazo usando drones fue el reto fundamental de este trabajo, el cual parte de las grandes tendencias de incertidumbre de los ecosistemas ante el impacto del cambio del clima y se fundamenta en la necesidad de contar con monitoreos y procesos de seguimiento estandarizados y de alta confianza. Para ello, el uso de estos sistemas de indicadores reconoce los procesos de presión (arribazón de sargazo), estado (cálculo de cantidad de biomasa, tipología de balsas) y respuesta (proceso sistematizado para el monitoreo de arribazon de sargazo y colecta de sargazo).

Estos indicadores se fundamentan en el modelo Presión – Estado- Respuesta (PER) para la gestión de los ecosistemas y se orientan en la toma de decisiones informadas. El sistema de integra de cinco indicadores de fácil entendimiento y que pueden ser implementados a bajo costo y a una escala detallada.

El uso de vehículos aéreos no tripulados – VANTs (Drones) es una alternativa económica y de acción local para el monitoreo de sargazo, con lo cual se contribuye a reducir las tendencias de incertidumbre que representa un fenómeno con pocos datos a escala detallada. En conjunto con el uso de índices y datos de colecta, así como tipologías de las balsas de sargazo se pueden proponer alternativas para el manejo integrado de los arribazones en áreas de mayor complejidad.

Finalmente, generar indicadores base permite tener información certera para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas, sin embargo, continúa siendo un reto debido a la ausencia de casos de estudio para una escala de interpretación y análisis a detalle.

Referencias

- Addico, G.N.D. y de Graft-Johnson, K.A.A. (2016). Preliminary Investigation into the Chemical Composition of the Invasive Brown Seaweed *Sargassum* along the West Coast of Ghana. *AJB*, 15, 2184–2191. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.15177>
- Alcérreca-Huerta, J.C., Encarnacion, J.I., Ordoñez-Sánchez, S., Callejas-Jiménez, M., Gallegos Diez Barroso, G., Allmark, M., Mariño-Tapia, I., Silva Casarín, R., O'Doherty,

- T., Johnstone, C., *et al.* (2019). Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 147. <https://doi.org/10.3390/jmse7050147>
- Arita, J.T., Iporac, L.A.R., Bally, N.K., Fujii, M.T. y Collado-Vides, L. (2023) Integrative Literature Analysis of Holopelagic Sargassum (Sargasso) in the Western Atlantic (2011–2022): *Status, Trends, and Gaps. Phycology*, 3, 447-458. <https://doi.org/10.3390/phyecology3040030>
- Chávez, G., Candela, J. y Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transport in Cozumel. Channel. *Journal of geophysical research*, 108. <https://doi.org/10.1029/2002jc001456>
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R.E., van Tussenbroek, B.I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L.B., Monroy-Velázquez, L.V., Leal-Bautista, R., *et al.* (2020). Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12, 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- CONACYT (2019). Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México. Consejo Nacional de Ciencia y tecnología. México. https://conahcyt.mx/sargazo/images/Agenda/2020/Agenda_Conacyt_Sargazo-2020_.pdf
- de la Barrera-Bautista, B., Metcalfe, S.E., Smith, G., Sjögersten, S., Boyd, D.S., Cerdeira-Estrada, S., López-Ramírez, P., Magaldi, A., Ressler, R., Perera-Valderrama, S., Caballero-Aragón, H., Siordia, O.S., Couldridge, J., Gray, P., Silva, R., Van Tussenbroek, B.I., Escalante-Mancera, E. y Foody, G. (2023). Monitoring holopelagic Sargassum spp. along the Mexican Caribbean coast: understanding and addressing user requirements for satellite remote sensing. *Front. Mar. Sci.* 10, 1166000. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1166000>
- Fraga, J. y Robledo, D. (2022). Covid-19 and Sargassum blooms: impacts and social issues in a mass tourism destination (Mexican Caribbean). *Maritime Studies*, 21, 159-171. <https://doi.org/10.1007/s40152-022-00267-0>
- Hu, C. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sens. Environ.*, 113, 2118–2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>

- Hu, C., Feng, L., Hardy, R.F., y Hochberg, E.J. (2015). Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic sargassum macroalgae. *Remote Sens. Environ.*, 167, 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.022>
- Joniver, C.F.H.; Photiades, A.; Moore, P.J.; Winters, A.L.; Woolmer, A. y Adams, J.M.M. (2021). The Global Problem of Nuisance Macroalgal Blooms and Pathways to Its Use in the Circular Economy. *Algal Res.*, 58, 102407. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102407>
- Lazcano-Hernández, H.E., Arellano-Verdejo, J. y Rodríguez-Martínez, R.E. (2023). Algorithms applied for monitoring pelagic Sargassum. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1216426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1216426>
- Marsh, R., Skliris, N., Tompkins, E.L., Dash, J., Dominguez-Almela, V., Tonon, T., *et al.* (2023). Climate-sargassum interactions across scales in the tropical Atlantic. *PLOS Clim*, 2(7), e0000253. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000253>
- Martell-Hernández, L.R. (2021). Implementación de VANTs para cuantificar los arribazones de sargazo en Isla Cozumel, Quintana Roo – México, 2019-2021. Tesis de maestría en análisis espacial y geoinformática. Universidad Autónoma del Estado de México. México.
- Ody, A., Thibaut, T., Berline, L., Changeux, T., Andre, J-M., Chevalier, C., *et al.* (2019). From In Situ to satellite observations of pelagic Sargassum distribution and aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean. *PLoS ONE*, 14(9), e0222584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222584>
- OpenDroneMap (2020). Authors ODM – A command line toolkit to generate maps, point clouds, 3D models and DEMs from drone, balloon or kite images. OpenDroneMap/ODM GitHub Page 2020; <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>
- Orellana, R., Nava, F., y Espadas, C. (2007). El clima de Cozumel y la Riviera Maya. En: Mejía, O. (edt.). Biodiversidad Acuática de la isla de Cozumel. UQROO – Plaza y Valdés, México, pp. 23-32.
- Rodríguez-Martínez, R.E., y van Tussenbroek, B.I. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa. Floreciminetos Algales Nocivos En México, (December 2016), 438. <https://www.researchgate.net/publication/317222216>

- Rodríguez-Martínez, R.E., Jordan-Dahlgren, E., y Hu, C. (2022). Spatio-temporal variability of pelagic sargassum landings on the northern mexican caribbean. *Remote Sens. Applications: Soc. Environ.*, 27, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>
- Sandoval, V. (2007). Dinámica de corrientes costeras. En: Mejía, O. (Edt.). Biodiversidad Acuática de la isla de Cozumel. UQROO – Plaza y Valdés, México. 43 - 47.
- Sanseverino, I., Conduto, D., Pozzoli, L., Dobricic, S. y Lettieri, T. (2016). Algal bloom and its economic impact. *European Union*, <https://doi.org/10.2788/660478>
- Shuai, Z., Hu, H., Barnes, B.B. y Harrison, T.N. (2022). Monitoring Sargassum Inundation on Beaches and Nearshore Waters Using PlanetScope/Dove Observations, *IEEE. Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, (1-5). <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3148684>
- Smetacek, V. y Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504 (7478), 84-88. <https://doi.org/10.1038/nature12860>
- Uribe-Martínez, A., Berriel-Bueno, D., Chavez, V., Cuevas, E., Almeida, K.L., Fontes, J.V.H., Van Tussenbroek, B.I., Mariño-Tapia, I., Liceaga-Correa, M.A., Ojeda, E., Castañeda-Ramírez, D.G. y Silva, R. (2022). Multiscale distribution patterns of pelagic rafts of sargasso (*Sargassum* spp.) in the Mexican Caribbean (2014–2020). *Front. Mar. Sci.*, 9, 920339. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920339>
- Van Tussenbroek, B.I., Hernández-Arana, H.A., Rodríguez-Martínez, R.E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H.M., González-Godoy, C.E., Barba-Santos, M.G., Vega-Zepeda, A., y Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Mar. Pollut. Bull.*, 122, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Wang, M., y Hu, C. (2017). Predicting sargassum blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations. *Geophysical Res. Lett.*, 44 (7), 3265-3273. <https://doi.org/10.1002/2017GL072932>
- Zhang Y., Hu C., McGillicuddy D.J., Barnes B.B., Liu Y., Kourafalou V.H., Zhang S., y Hernandez F.J (2024). Pelagic sargassum in the Gulf of Mexico driven by ocean currents and eddies. *Harmful Algae*, 133, 102566. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102566>

Apartado 2. Perspectivas del desarrollo sostenible en socioecosistemas y cambio climático

José Guadalupe Chan Quijano

El desarrollo sostenible en los socioecosistemas y su relación con el cambio climático son temas cruciales para el futuro de la humanidad y el planeta. El concepto de desarrollo sostenible busca equilibrar las necesidades humanas con la preservación del medio ambiente, asegurando que las generaciones futuras puedan disfrutar de los mismos recursos y oportunidades que tenemos hoy. Por ejemplo, interconexión entre los socioecosistemas y el cambio climático, es decir, que existen sistemas que integran los componentes sociales y ecológicos. En ellos, las actividades humanas influyen directamente en el medio ambiente, y viceversa. Esto hace que el cambio climático afecte no solo a los ecosistemas naturales, sino también a las comunidades que dependen de ellos.

Además, los cambios en patrones climáticos (como aumento de la temperatura, eventos climáticos extremos y alteración de ciclos biológicos) tienen efectos directos sobre los recursos naturales y la calidad de vida de las personas. Las áreas más vulnerables son las que dependen de la agricultura, la pesca, los bosques y el acceso al agua. Asimismo, se busca estrategias de adaptación y resiliencia de los socioecosistemas, debido a que las comunidades deben desarrollar medidas para adaptarse a los impactos del cambio climático. Esto incluye mejorar las infraestructuras, cambiar prácticas agrícolas hacia métodos más sostenibles, restaurar ecosistemas degradados y proteger los recursos naturales. Dentro de la resiliencia de los socioecosistemas de los sistemas humanos y ecológicos deben lograr recuperarse de los impactos del cambio climático. Para fortalecer esta resiliencia, es crucial una gestión integrada de los recursos naturales, promoviendo la conservación de biodiversidad, la restauración de ecosistemas y el manejo sostenible de los recursos.

Otras alternativas como la transición hacia economías sostenibles son modelos de economía circular que buscan reducir, reutilizar y reciclar los recursos, minimizando la extracción de nuevos recursos naturales y reduciendo los desechos. Esto es esencial para mitigar los efectos del cambio climático, ya que la producción y el consumo desmedido de recursos contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero. Por otro lado, la transición hacia energías limpias, como la solar, eólica e hidroeléctrica, es fundamental para reducir la huella de

carbono de las sociedades humanas. La adopción de tecnologías limpias y eficientes puede transformar los socioecosistemas hacia modelos más sostenibles.

Las políticas integradas de gestión de recursos como la gobernanza efectiva de los recursos naturales, como el agua, los bosques y los suelos, debe estar orientada a la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático. Esto implica políticas que promuevan la cooperación entre gobiernos, comunidades locales y sector privado. En este sentido, se debe impulsar una economía que valore y proteja el capital natural y, que, además, pueda ayudar a reducir los efectos negativos del cambio climático. Las políticas públicas deben fomentar la conservación de los ecosistemas, la restauración de paisajes degradados y el impulso de prácticas agrícolas y urbanísticas sostenibles. Es por ello, que, para crear una concientización sobre el cambio climático, la educación es clave para movilizar a las sociedades hacia un modelo de desarrollo más sostenible. Las campañas educativas deben enfocarse en mostrar cómo el cambio climático afecta a los socioecosistemas y la vida cotidiana, promoviendo comportamientos responsables y sostenibles en individuos, comunidades y empresas.

Por otro lado, se debe lograr un empoderamiento de las comunidades locales, es decir, que las personas que viven en zonas vulnerables al cambio climático deben ser capacitadas para comprender los riesgos y las oportunidades de adaptación. La participación de las comunidades en la toma de decisiones es esencial para lograr soluciones más eficaces y sostenibles. Un ejemplo de la participación social en la conservación es la restauración de los ecosistemas degradados, esto es esencial para recuperar los servicios ecosistémicos, como la captura de carbono, la regulación hídrica y la protección contra desastres naturales. Las iniciativas de restauración ayudan tanto a mitigar el cambio climático como a mejorar las condiciones de vida de las comunidades. La biodiversidad es fundamental para la estabilidad de los socioecosistemas. La pérdida de biodiversidad puede debilitar la capacidad de los ecosistemas para adaptarse a los cambios climáticos. Las estrategias de conservación deben ser globales, pero también deben tener en cuenta las particularidades locales.

Por último, un enfoque clave para el desarrollo sostenible es centrar la economía en el bienestar humano, no solo en el crecimiento económico. El Índice de Bienestar Económico Sostenible o indicadores similares podrían medir la salud, la educación, el acceso a los recursos naturales, la justicia social y el equilibrio ecológico, proporcionando una visión más completa del progreso. El desarrollo sostenible en los socioecosistemas en el contexto del

cambio climático requiere una acción colectiva e integrada, que considere tanto las dimensiones sociales como ecológicas. La adaptación y resiliencia de los sistemas humanos y naturales son fundamentales para enfrentar los desafíos del cambio climático. Sin embargo, la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible exige cambios profundos en las políticas públicas, las prácticas empresariales, las tecnologías y las mentalidades de las personas. La cooperación internacional y el compromiso de todos los sectores de la sociedad son esenciales para asegurar un futuro próspero y equilibrado para las generaciones venideras.

Capítulo 7. Un modelo para analizar la cuenca del río Usumacinta como sistema complejo^{††}

Fernando Tudela^{§§}

Julia Carabias Lillo^{***}

María Zorrilla^{†††}

Jonathan V. Solórzano Villegas^{†††}

I. Sistemas socioambientales: interdisciplina y sistemas complejos

a) Bases de la interdisciplina

Todas las acciones humanas que involucran el uso y la configuración de un territorio^{§§§} forman parte de un entramado a la vez social y ecológico o ambiental^{****} (Ostrom, 2009). Una comprensión adecuada de los problemas de la Cuenca del río Usumacinta y su Zona Marina de Influencia (CRUZMI, en lo sucesivo) relacionados con el cambio global, el cambio climático en particular, y la sustentabilidad de los procesos de desarrollo que en ella se desenvuelven, requiere la construcción de un modelo que permita analizar el sistema socioambiental caracterizado por componentes sociales y ambientales, así como por el conjunto de sus interrelaciones, que configuran su estructura sistémica. Estos sistemas, o “totalidades organizadas”, operan como modelos analíticos o cognitivos, que permiten conocer y transformar la realidad del objeto de estudio. El modelo a cuya concreción se aspira

[#] El presente texto está basado en el informe del Objetivo 1. Modelo Analítico del proyecto FORDECYT 273646. Cambio global y sustentabilidad en la Cuenca del río Usumacinta y su Zona Marina de Influencia (CRUZMI). Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio, llevado a cabo por el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, bajo la dirección de Rafael Loyola, la coordinación científica de Julia Carabias y la responsabilidad técnica de Alberto Gallardo (2016 y 2017) y Luzma Fabiola Nava Jiménez y Yair Asael Alpuche (2018 y 2019). En el Objetivo 1 de este proyecto participaron: María Zorrilla, Jonathan Vidal Solórzano, Fernando Tudela, Julia Carabias, Marcela Martínez y Esmeralda Pliego.

^{§§} Consultor independiente

^{***} Facultad de Ciencias, UNAM

^{†††} Centro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad; Universidad Iberoamericana.

^{†††} Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia (ENES Morelia), UNAM

^{§§§} Territorio (etimología): del latín *terra torium* o “la tierra que pertenece a alguien” o bajo alguna jurisdicción. Diccionario de la RAE: 1) Porción de la superficie terrestre perteneciente a una nación, región, provincia, etcétera. 2) Terreno: campo o esfera de acción. El concepto adquiere aquí un sentido más específico en el marco de la disciplina geográfica, como construcción social.

^{****} “ecológico” o “ambiental” son términos que se utilizan con frecuencia de manera intercambiable. Sin embargo, lo “ecológico” hace referencia a una entidad que incluye necesariamente algún elemento biótico, mientras la extensión del concepto “ambiental” es más amplia, pudiendo incluir también aspectos geofísicos no bióticos.

no es pues una representación gráfica de una situación cuya estructura y funcionalidad han sido ya entendidas y asimiladas de antemano. La construcción del modelo es un proceso que permite ir comprendiendo la realidad del objeto de estudio, como base para su transformación. Los modelos de referencia no se desprenden por lo tanto de esa realidad por vía de la simple observación, no “están dados” en la realidad, sino son producto de la interacción entre el bagaje teórico o conceptual de quienes participan en el análisis y los rasgos constitutivos y funcionales del ámbito analizado y sus transformaciones.

La selección del modelo no es unívoca y depende de los intereses, supuestos y preguntas que se formulan como punto de partida explícito o implícito de la investigación, y que constituyen su “marco epistémico” (Piaget y García, 1982; García, 2000). Por ejemplo, preguntarse por las relaciones entre los “seres humanos” y la “naturaleza” sugiere un marco epistémico en el que los humanos **no** son parte de la naturaleza, creencia bastante común que no compartimos los autores.

En su sentido más amplio, un marco epistémico conlleva una concepción del mundo, en la que se sustenta la pregunta, o conjunto coherente de preguntas, orientadoras de la investigación. El sistema o modelo se va construyendo a partir de abstracciones, selecciones o sucesivos recortes de la realidad con base en su pertinencia en función de las preguntas asumidas, muchas veces en forma implícita.

Las distintas disciplinas, social e históricamente constituidas como paradigmas epistemológicos y sociales, pueden resultar indispensables para arrojar luz sobre algunas partes del modelo y algunas de sus interacciones, pero no pueden tratar de utilizarse como puntos absolutos de partida para desarrollar un enfoque inter o transdisciplinario. La realidad que analizamos **no** es disciplinaria, y no es por lo general reductible a una interacción entre disciplinas establecidas, por más que ocasionalmente dé origen a denominaciones compuestas.

Sin una visión sistémica compartida, la simple conjunción de especialistas diversos no conduce a una integración interdisciplinaria en el marco de un análisis territorial. Su producto habitual suele consistir en una secuencia de subcapítulos inconexos, temáticamente diferenciados, pero prácticamente imposibles de articular entre sí, con independencia de la calidad técnica de cada uno de ellos.

El planteamiento adecuado para facilitar una articulación transdisciplinaria^{†††} como la que requiere el análisis socioambiental corresponde a la construcción de un sistema complejo, mediante aproximaciones sucesivas. En el sentido aquí utilizado, la “complejidad” no conlleva necesariamente “complicación”^{††††}. Las acotaciones que aquí se incluyen tienen un elevado nivel de generalidad, por lo que son de aplicación en múltiples dominios de la realidad, no solo en el ámbito socioambiental. Por su adecuación y productividad, el enfoque de sistemas complejos se asume aquí como conceptualización básica de referencia.

Se considera “complejo” un sistema que presenta un conjunto de características entre las que figuran las siguientes, algunas de las cuales no son exclusivas de los sistemas complejos, pero que deben concurrir simultáneamente (De la Maza y Carabias 2011; Gallopín, Funtowicz y O'Connor, 2001; García, 2011).

- Se trata de sistemas abiertos, con capacidad de intercambiar materia, energía e información con su entorno. Las relaciones significativas entre el sistema adoptado (o también alguno de sus subsistemas) y la realidad más amplia en la que se inserta constituyen sus “condiciones de contorno”. Se pueden representar por flujos (de materia, energía, información, créditos, inversiones, etc.), cambiantes en el tiempo y que reflejan el efecto integrado de lo que “queda fuera” del sistema, sin tener que ahondar en el conocimiento de la realidad exterior.
- Sus componentes son interdefinibles: el sentido propio de cada uno de ellos depende de las interrelaciones con otros.
- Las propiedades del conjunto no son un simple agregado de las de sus elementos constitutivos o subsistemas. La totalidad que se intenta modelizar impone condiciones a las funciones de sus componentes (“función de organización”).
- La estructura del sistema está constituida por las interrelaciones internas. Esta estructura no constituye una entidad estática. Examinado a la escala temporal y

^{†††} De acuerdo con Juliana Merçon, la investigación transdisciplinaria busca “a) comprender una parte relevante de la complejidad del problema, b) tomando en cuenta la diversidad de percepciones experienciales y científicas y (c) conectando conocimiento abstracto y de casos específicos, (d) para desarrollar conocimientos y prácticas que promuevan lo que es percibido como el bien común” Merçon (2022:4)

^{††††} Un sistema puede ser “simple”, en el sentido de no complicado, como las relaciones gravitatorias entre tres cuerpos, y constituir sin embargo un sistema complejo, de predecibilidad limitada a pesar de su carácter determinista. Al revés, algunos sistemas complicados como la red hidráulica de un asentamiento urbano, pueden no ser complejos, en el sentido aquí utilizado.

espacial apropiada, un sistema complejo está sometido a “procesos de estructuración” y de “desestructuración” en función de cambios en sus elementos o en las condiciones de contorno que exceden ciertos umbrales. A periodos de relativa estabilidad se suceden transformaciones que se expresan como cambios estructurales. La existencia de estos umbrales fundamenta la no linealidad de las relaciones sistémicas que se analizan, en la medida en que sean formalizables.

Sobre la base de la caracterización anterior, y en su sentido más general, el enfoque de sistemas complejos conlleva enfrentar problemas metodológicos como los que se enlistan a continuación:

- Construcción progresiva del objeto de estudio: delimitación de un sistema. Determinación mutua de elementos y sistema total. Interacciones del sistema con su realidad externa: condiciones de contorno. Estrategia progresiva de construcción del sistema. Incorporación o exclusión de elementos.
- Distinción y articulación de escalas y niveles en la relación sistema- subsistemas. Niveles de análisis de un mismo proceso. Especificidad de las escalas espaciales y temporales.
- Articulación de fases de integración y diferenciación en el transcurso del trabajo de investigación, evitando siempre posponer la integración hasta “el final”, dejándola como tarea inalcanzable del lector.
- Distinción de niveles de procesos. Dominios disciplinarios propios de cada nivel de proceso. Concatenación de explicaciones / descripciones.
- Caracterización de las condiciones estructurales y funcionales del sistema en construcción. Funcionamiento del sistema y función de cada componente o subsistema. Estabilidad, vulnerabilidad, fragilidad, resiliencia de la estructura.
- Detección de tendencias, cambios en elementos e interrelaciones. Procesos de estructuración y desestructuración del sistema. Mecanismos internos y externos de autoorganización y cambio. Discusión de la permanencia del sistema. Condiciones de estabilidad. Umbrales de cambio.
- Reconocimiento y caracterización de propiedades emergentes del sistema, no reductibles a la agregación de las propiedades de sus elementos. Problemas de reversibilidad / irreversibilidad.

- Mecanismos internos y externos de autoorganización y cambio. Cambios en las condiciones de contorno. Rangos de fluctuación observados en los elementos. Cambios estructurales de origen exógeno o endógeno. Problemas de predictibilidad de los cambios.
- Potencial de transformación inducida del sistema. Rangos de estados posibles. Atractores. Estados deseables / posibles / probables. Posibilidades reales de intervención, como por ejemplo mediante cambios de políticas públicas que incidan en las condiciones de contorno.

En su conjunto, estas cuestiones metodológicas representan un serio desafío, pero profundizar en su análisis desborda el objetivo de este documento. Se recurrió al enfoque de sistemas complejos por su valor heurístico, como promisorio vía para enfrentar problemas de conocimiento interdisciplinario, que representan todavía un fuerte obstáculo práctico y organizativo para los sistemas institucionales de educación superior e investigación, establecidos por lo general como “silos” de conocimiento.

b) Un modelo de análisis

A partir de un esquema elemental de relaciones entre componentes sociales, económicos y ecológicos, el modelo se fue construyendo con base en el conocimiento antecedente, las referencias compartidas y la información generada por el proyecto 273646 del Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECyT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). El trabajo se orientó en un sentido dinámico, aspirando no solo a comprender el actual esquema sectorial, identificándolo como insustentable, sino también a sentar bases para transitar hacia otra estrategia territorial y sustentable, adaptada al cambio global representado por el cambio climático en curso. Como resultado del proceso iterativo antes referido, se construyó el modelo analítico (Figura 7.1). Además, se ofrece a continuación una breve descripción de los componentes incluidos en el modelo (Tabla 7.1).

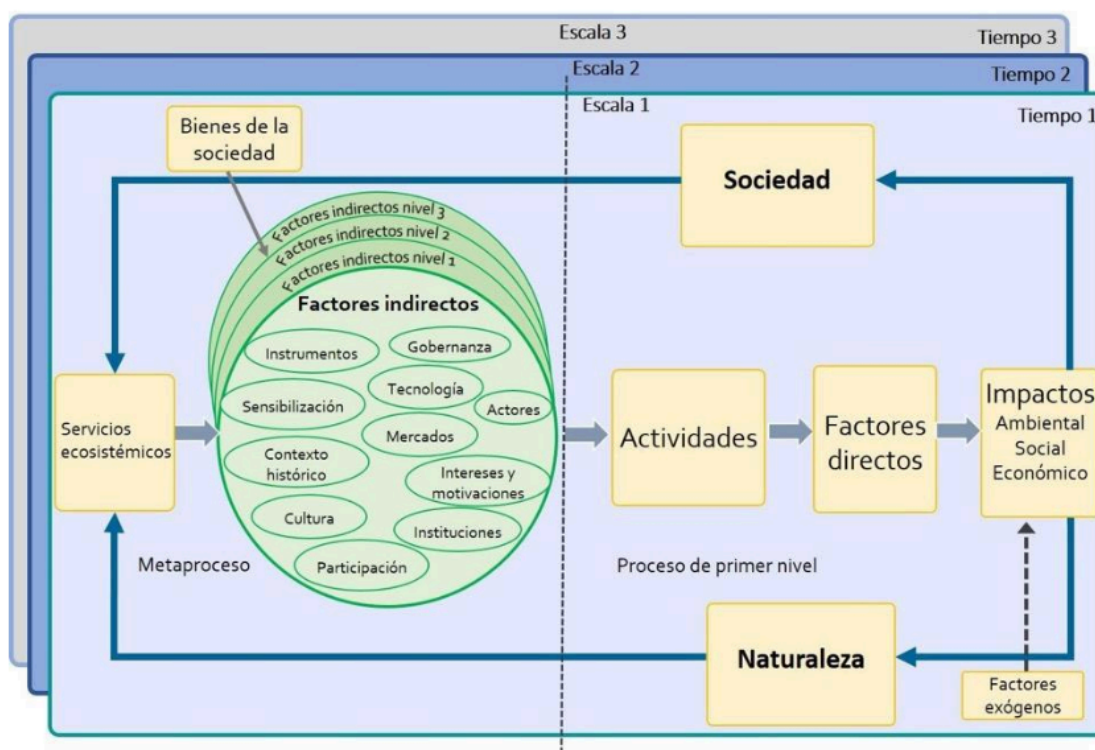


Figura 7.1 Modelo analítico propuesto para la CRUZMI. Fuente: Objetivo 1. Modelo Analítico del proyecto FORDECyT 273646. Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio. Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, ajustado del modelo IPBES (Díaz *et al.*, 2015).

Tabla 7.1. Componentes del modelo analítico para la descripción y aportes para la comprensión de la CRUZMI.

Componente	Descripción
Naturaleza	Atributos que caracterizan el estado de la naturaleza, en particular aquellos que describen la atmósfera, la biodiversidad de ecosistemas, de especies y de propiedades genéticas, el suelo, los recursos hídricos y su calidad, tanto lénticos, como lagos o lagunas, o lóticos, como ríos o arroyos, aguas costeras y marinas.

Servicios ecosistémicos	Beneficios que reciben los seres humanos de la naturaleza y que contribuyen al bienestar de los diferentes actores. Son resultado de la interacción entre las condiciones sociales y naturales. Atributos que caracterizan el nivel de bienestar de los distintos grupos sociales y la calidad de vida de las poblaciones. Incluye aspectos culturales, económicos, sociales y tecnológicos que afectan la producción de servicios ecosistémicos y el uso de los recursos naturales. Se suelen distinguir subsistemas, como el demográfico/poblacional, el económico, como las condiciones de empleo e ingreso, o sectoriales, como la salud, la educación, la alimentación, los asentamientos y la vivienda.
Sociedad	Características de la sociedad que afectan el desarrollo de actividades en el territorio y el sistema de gobernanza, como la tenencia de la tierra, la tecnología, la demografía, la cultura, los individuos o grupos sociales, los mercados en donde los actores interactúan para intercambiar bienes y servicios, las normas, reglas, instituciones, procedimientos y prácticas mediante los que se deciden y regulan los asuntos que atañen a un medio social.
Factores indirectos	Procesos productivos (p. ej. agricultura, ganadería, silvicultura, pesca) o no directamente productivos (conservación, pago por servicios ambientales, restauración) que se desarrollan en un territorio y que definen el estado y uso del suelo y de los elementos naturales a diferentes escalas.
Actividades en el territorio	Procesos que se generan como consecuencia de las actividades en el territorio y que inducen cambios en los elementos naturales y en las condiciones sociales. En la CRUZMI se identifican cinco factores directos: deforestación, degradación, contaminación, agotamiento de recursos y aprovechamiento. Este último factor será sustentable en ausencia de los cuatro primeros.
Factores directos	
Impactos	Efectos ambientales, sociales y económicos que resultan de una actividad y sus factores directos.

Factores exógenos	Eventos o circunstancias que no se originan o explican por las actividades realizadas en el territorio, pero que afectan a las circunstancias sociales o naturales del mismo. Ejemplos: cambio climático, terremotos, ciclones, conflictos armados, incidencia del crimen organizado, migración o crisis económica general, cambios en los mercados internacionales que afectan a la producción territorial, cambios en la política exterior, entre muchos otros.
----------------------	---

Fuente: elaboración propia con base en Díaz *et al.* (2015).

Un conjunto de elementos o componentes, como los aquí indicados, no define un sistema. Lo que lo estructura y lo constituye propiamente es, además, y sobre todo, el conjunto de relaciones entre ellos. En la representación gráfica de sistemas de esta índole estas relaciones se suelen representar en forma muy simplificada por “flechas” mono o bidireccionales, algunas de las cuales pueden agrupar varios tipos de relación.

Lo realmente complejo consiste en describir y explicar adecuadamente cada una de las flechas del diagrama, lo cual requiere una narrativa específica, para posibilitar la comprensión del funcionamiento conjunto y su dinámica. Los diagramas, por sí mismos, no son un “reflejo de la realidad”, ni siquiera una abstracción de la misma, sino una ayuda-memoria para ubicar, orientar e intentar ordenar los trabajos del equipo interdisciplinario de investigación. El valor del diagrama radica en el uso que se le dé. El diagrama analítico no es “verdadero” o “falso”, sino más o menos útil para ir desentrañando el problema en el que se centra la investigación.

En la representación analítica del sistema antes incluida, se observará una línea punteada que separa dos ámbitos, correspondientes a lo que la literatura de sistema complejos denomina “niveles”. El de la derecha, caracterizado como “procesos de primer nivel”, alude a los mecanismos que describen la concatenación de eventos que determinan los impactos directos sobre los elementos naturales y sociales. El de la izquierda corresponde a lo que se suele denominar “metaprocesos” o procesos de segundo nivel. Se trata del conjunto de condiciones que determinan el desencadenamiento de los mecanismos antes aludidos. Aunque no se explicita aquí, ni se desarrolla por desbordar los alcances del trabajo, se podría agregar un tercer nivel, en el que se incluirían aspectos como la organización general de la economía

nacional y su inserción en un contexto internacional, como pudiera ser por ejemplo el Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). La descripción a un nivel explica la dinámica a un nivel inmediatamente inferior. La distinción de niveles es fundamental para evitar cortocircuitar los análisis, atribuyendo por ejemplo al “capitalismo” la razón de un deterioro edáfico específico en una porción del territorio de la CRUZMI.

La bidimensionalidad gráfica de un diagrama analítico impone también costos. En el diagrama aquí propuesto se alude a una distinción de escalas espaciales y temporales que pudieran articularse como entidades que embonan unas con otras. En el primer nivel, “sociedad” y “naturaleza” nunca deberían interpretarse como entidades separadas, que se pudieran someter a un tratamiento cognitivo diferenciado e independiente uno del otro. Desde el inicio de los trabajos se necesitó enfatizar las flechas que las unen entre sí y con los “servicios ecosistémicos”, sin las cuales carecería de sentido asumir como objeto de estudio un sistema socioambiental.

El trabajo de abstracción es indispensable: no se trata de abordar “todos” los aspectos sociales o ambientales que se nos pudiera ocurrir *a priori*, sino tan solo aquellos esenciales para relacionar los impactos con el deterioro de los servicios ecosistémicos. Recortar la realidad mediante abstracciones no constituye un defecto del análisis sino una condición indispensable para avanzar en su comprensión, sin dejar de reconocer que habrá recortes más funcionales que otros. La definición del objeto de estudio, y el conjunto de recortes que implica, no puede asumirse como un punto de partida absoluto e inamovible, previo al inicio de los trabajos de investigación, sino como un producto de la investigación misma, en la etapa en la que se encuentre.

II. Elementos de una narrativa derivada del modelo

La metodología central del trabajo interdisciplinario para el estudio de un sistema complejo exige el recurso a un doble proceso de diferenciación de una totalidad, y de (re)integración de esta. En la fase de diferenciación, el estudio puede ceñirse a un ámbito disciplinario, cuando así lo demanda el dominio propio de algún elemento del sistema. De cualquier forma, un análisis disciplinario centrado en un objeto definido por diferenciación del sistema adquiere características diversas y más ricas que cuando se plantea inicialmente a partir de un paradigma disciplinario establecido. La diferenciación se basa en un ulterior recorte de

la realidad de un elemento del sistema o de un subconjunto de elementos de este, con criterio conceptual, temporal o espacial. En este último caso se centra el análisis que sintetizamos a continuación utilizando solo algunos elementos destacados que caracterizan a la CRUZMI.

a) La naturaleza

La CRUZMI, que incluye territorios contiguos de Guatemala, México y Belice, posee un valor único en Mesoamérica por su patrimonio natural y cultural. Aunque su calidad ambiental se puede considerar todavía como “buena”, las tendencias de deterioro se están agudizando como consecuencia de sistemas socioeconómicos insustentables y actividades productivas ineficientes que, no solo degradan el medio ambiente, sino que empeoran también las condiciones de vida de su población mayoritaria. Se han implementado múltiples ejemplos de procesos locales alternativos que apuntan hacia una mayor sustentabilidad, pero no se han podido escalar, ni convertir en políticas públicas o arraigarse en nuevas formas de gobernanza.

La funcionalidad general del sistema CRUZMI incluye la de operar como un repositorio de extraordinarios recursos naturales y de biodiversidad, que suscitan un poderoso interés tanto a nivel nacional como internacional. En primer lugar, destacan los recursos hídricos del territorio. Con un escurrimiento promedio anual estimado en 1768 m³/s (estación de Boca del Cerro), el río Usumacinta es el más caudaloso de Mesoamérica, con una extensa red fluvial que incluye 22 ríos tributarios. El Usumacinta se origina en el punto de encuentro entre los ríos Lacantún y Chixoy, unos kilómetros después de la confluencia entre los ríos Chixoy y La Pasión, formando la frontera fluvial entre Chiapas y el Petén Guatemalteco antes de adentrarse en la parte baja de la cuenca en Tabasco (Saavedra *et al.*, 2015). En su tramo final, a 20 km antes de su desembocadura deltaica en el Golfo de México, el brazo principal del Usumacinta se une al río Grijalva, confluencia inducida por la antigua (1675) desviación voluntaria del Grijalva- Mezcalapa. Los abundantes cuerpos de agua de la cuenca operan como elementos de conexión, regulación y amortiguamiento de avenidas (Gallardo-Cruz *et al.*, 2017).

El gradiente altitudinal de la CRUZMI, cuyo descenso inicia por encima de los 3,800 m.s.n.m. en la sierra de los Cuchumatanes en Guatemala, determina una variada secuencia de climas y tipos de vegetación (Meave *et al.*, 2023). Esta gama de ecosistemas alberga una

de las mayores riquezas florísticas de Meso y Norteamérica, con 6,977 especies, 1,892 géneros y 274 familias de plantas vasculares (Jiménez-López *et al.*, 2023). Destaca también su riqueza faunística, que incluye cerca de mil quinientas especies de vertebrados (Gallardo-Cruz *et al.*, 2017). Un factor que ayuda a mantener la particular biodiversidad ictícola (77 especies) es la diversidad de hábitats a lo largo de la cuenca, su buen estado de conservación y su conectividad, derivada de que el Usumacinta no ha sufrido -hasta ahora- intervenciones significativas (Ramírez *et al.*, 2015; Esqueda *et al.*, 2017).

b) Servicios ecosistémicos

Son invaluable los servicios ecosistémicos que presta la CRUZMI: generación de grandes cantidades de agua dulce, aportación de nutrientes para las pesquerías del Golfo de México, depositación de sedimentos, movilización de una amplia variedad de polinizadores, secuestro de carbono en humedales y masas forestales, regulación del clima y una biodiversidad de la cual se pueden derivar bienes como alimentos, medicinas, madera y leña, fibras, valores culturales y objetos de investigación, entre muchos otros. Todo ello confiere a la conservación de la cuenca una muy elevada prioridad regional, nacional e internacional.

c) Sociedad

La realidad demográfica de la región que se desprende del Censo de Población (INEGI, 2011)^{§§§§}, apunta también hacia la oportunidad de una integración analítica. De los 3.5 millones de habitantes de la Cuenca, 2.3 millones se ubican en la parte guatemalteca que está conformada por 45 municipios de seis departamentos (Petén, Huehuetenango, Quiché, Totonicapán, Alta Verapaz y Baja Verapaz; Tabla 7.2).

Tabla 7.2. Articulación de ciudades en Guatemala y la CRUZMI

Gabriela Quiroz Cázares

Yosu Rodríguez Aldabe

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo)

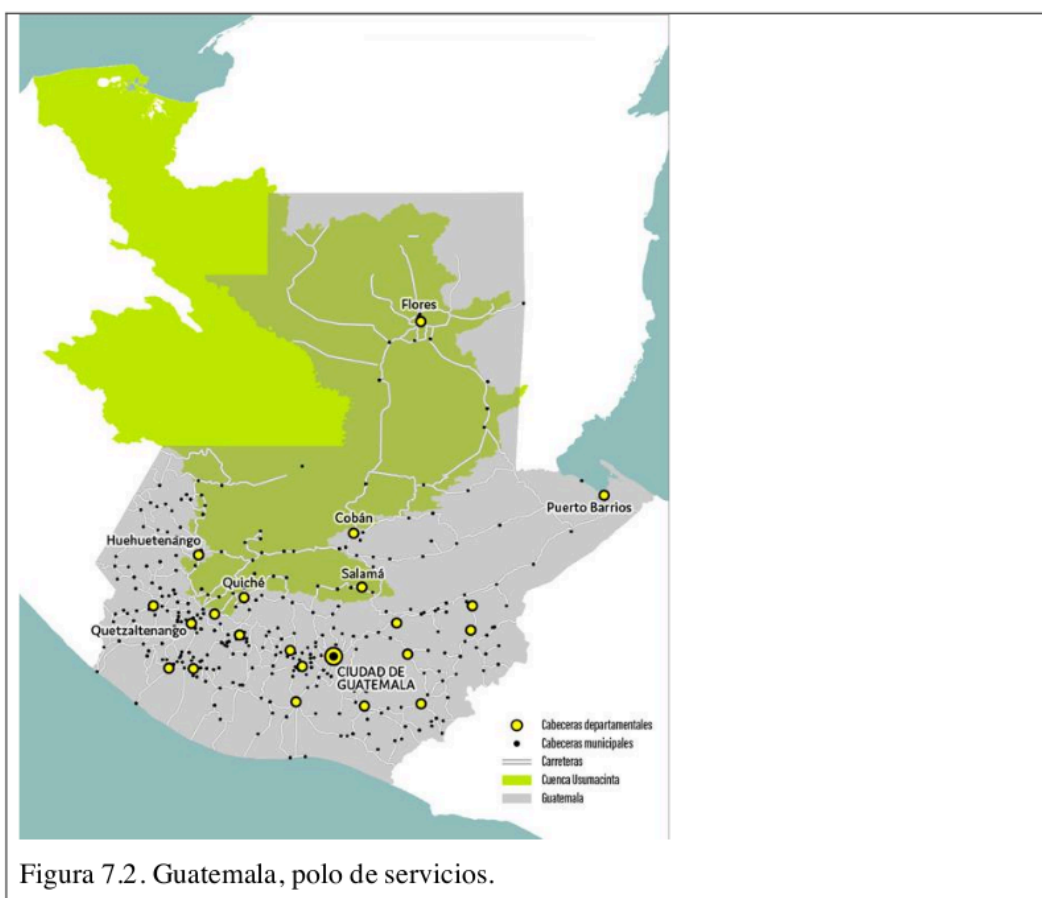
^{§§§§} Para el proyecto FORDECyT se utilizó el dato del Censo de Población y Vivienda del 2010, sin embargo, hacer la comparación con los resultados del 2020 (INEGI, 2021) aporta información sobre el crecimiento poblacional por arriba de la media nacional (1.2%) y, además, este es mayor en los municipios de la porción chiapaneca de la CRUZMI.

Para Guatemala, la CRUZMI representa el 40 % de la superficie terrestre del país, en la que vive solamente el 16 % de su población, distribuida en 45 municipios (INE,2018). En esta porción, la densidad de población es de 54 habitantes/km², que contrasta con los 185 hab/ km² fuera de la cuenca. Solamente una cabecera departamental, la de Flores en el Petén, tiene mayor vinculación con la dinámica de la cuenca, pues Salamá y Quiché, en su parte meridional, se relacionan con el eje Quetzaltenango - Ciudad de Guatemala, zona en donde se concentra la mayor población del país. Esta última localidad constituye el principal polo urbano de atracción de la zona, en lo que atañe a la provisión de servicios (Figura 7.2).

Dos principales ejes de comunicación vial atraviesan la parte guatemalteca de la cuenca:

1. Eje Flores - Ciudad de Guatemala, con orientación norte – sur, pasando por las cabeceras departamentales Cobán y Salamá, ambas ya fuesen de la CRUZMI.
2. Eje Huehuetenango – Cobán, con orientación este – oeste, con prolongación hacia la ciudad fronteriza de Puerto Barrios.

Desafortunadamente la falta de información geoespacial sobre localidades y población no permite caracterizar a detalle el sistema de localidades para Guatemala. Desde la década de los noventa del siglo pasado, el relativamente despoblado Petén ha sido el segundo departamento que mayor número de inmigrantes internos ha atraído, debido a las políticas nacionales de expansión de la frontera agrícola.



En la parte mexicana, en el 2010, habitaban 1.2 millones de personas en los 21 municipios de la porción mexicana, uno de ellos en Campeche, 5 en Tabasco y el resto en Chiapas (Tabla 7.3). Hay que desatacar que para el 2020 la población en estos 21 municipios aumentó a 1.3 millones de personas; si bien la tasa de crecimiento media anual (TCMA) de la población de la región fue de 1.5% entre 2010 y 2020, hay municipios, sobre todo en la porción chiapaneca, donde la TCMA fue de 2.8%.

Tabla 7.3. Articulación de ciudades en la parte mexicana de la CRUZMI

Gabriela Quiroz Cázares, Yosú Rodríguez Aldabe
Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo)

La parte mexicana de la CRUZMI, que representa el 1.7% del territorio nacional, se localiza en los estados de Chiapas, Tabasco, ubicándose una pequeña fracción en el estado de Campeche.

La parte baja de la cuenca consta de tres elementos: a) el corredor petrolero en la costa, b) las planicies inundables de Jonuta y Palizada y c) articulación Los Ríos - Palenque. La ciudad de Villahermosa funciona como su principal articulador. El corredor petrolero es articulado por las ciudades de Coatzacoalcos – Villahermosa – Ciudad del Carmen. Jonuta y Paliza sufren afectaciones frecuentes por inundaciones, es una zona relativamente aislada. Los Ríos (Tenosique, Emiliano Zapata y Balancán) – Palenque está dominado por pastizales ocupados por ganado vacuno y en años recientes están en expansión plantaciones de palma de aceite.

En la parte media y alta de la Cuenca Usumacinta en México se forma un arco que articula tres ciudades: Comitán, Ocosingo y Palenque que envuelve de oeste a este por el norte a la Región Selva Lacandona (RSL) que colinda con Guatemala al sur y al este. En torno al arco existen un conjunto de sistemas productivos: café, ganadería vacuna y agricultura intensiva, sobre todo en el valle comiteco y conforman una franja que flanquea la RSL. Estas ciudades, a su vez, se conectan con San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez, ya en la cuenca del Grijalva (Figura 7.3).

La RSL presenta baja densidad de población, con 133 mil habitantes en poco más de un millón de hectáreas, que incluyen siete Áreas Naturales Protegidas. En relación con la infraestructura vial, solo la mitad de la población del polígono de la RSL (casi 71 mil habitantes) vive en localidades que están a un kilómetro o menos de las carreteras, destacando entre ellas tres ciudades: Nueva Palestina, Benemérito de las Américas y Frontera Corozal. Adicionalmente, poco más de un tercio de la población reside a menos de un kilómetro de algún camino de terracería. La RSL es fundamental debido a los servicios ambientales que nos proporciona. Para proteger su función ambiental, es crucial reducir la presión que actualmente ejerce la atracción de población hacia la RSL y, en su lugar, fomentar el desarrollo del arco Comitán–Ocosingo–Palenque como un nuevo polo de atracción poblacional fuera de la RSL.

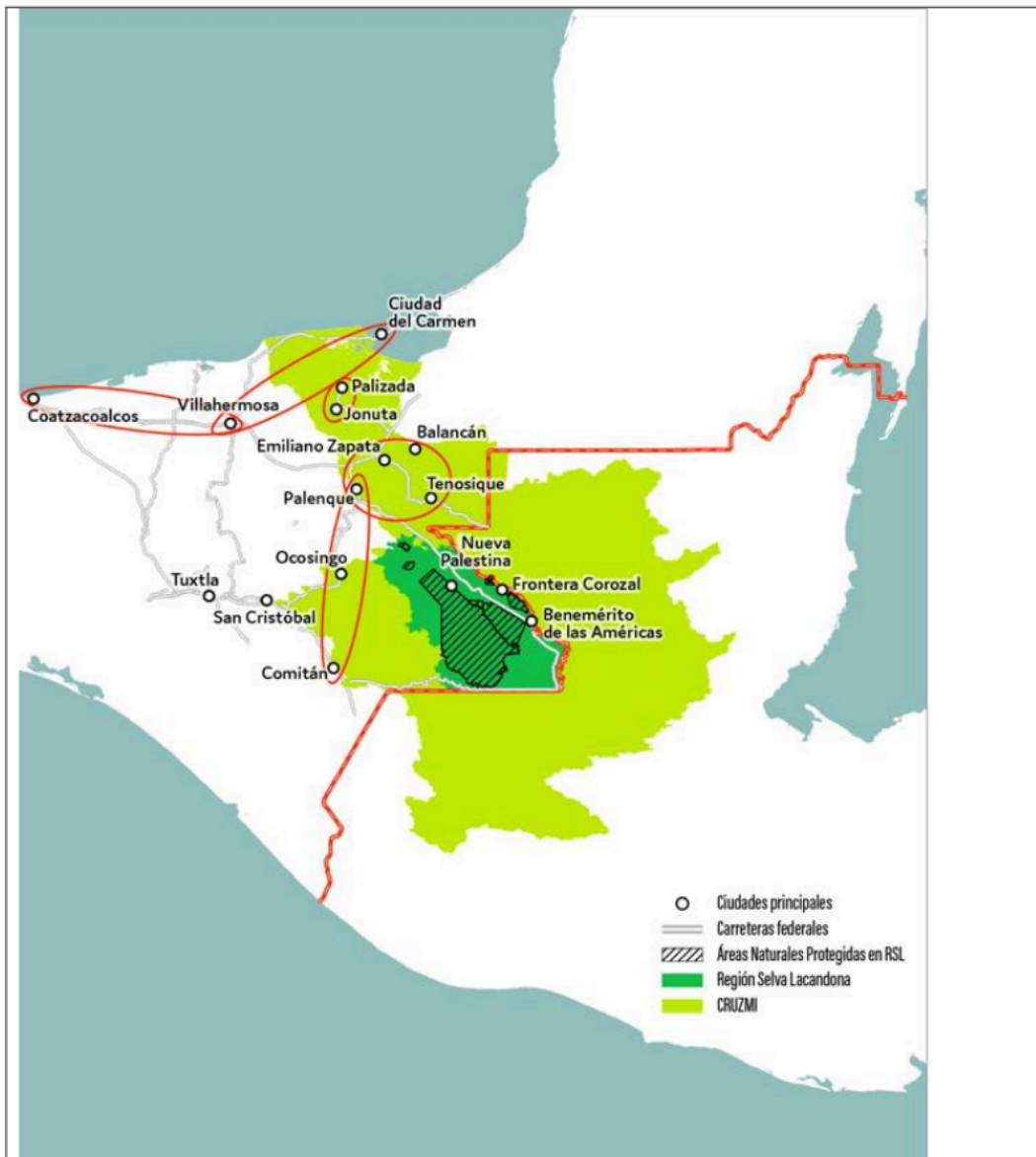


Figura 7.3. Región Selva Lacandona (RSL) que colinda con Guatemala al sur y al este.

En su conjunto, la población de la CRUZMI ha sido siempre sobre todo de carácter rural. Destaca en la porción mexicana que, en 2010, 62% de la población habitaba en localidades de menos de 2500 habitantes. Existen áreas de densidad particularmente baja la zona norte y occidente del Petén guatemalteco y la Selva Lacandona del lado mexicano. En la parte mexicana de la cuenca el ingreso promedio corriente por persona anual es muy precario (\$

28,519.00)****, muy inferior al de los estados de Chiapas, Tabasco y Campeche (\$ 42,621.00) y al nacional (\$ 55,877.00). Es muy desigual la distribución por municipio del ingreso corriente promedio trimestral. En relación con este indicador, el estado de Chiapas ocupa el último lugar entre todas las entidades federativas mexicanas. Al ingreso promedio se suman a otras carencias que dan como resultado que la mayor parte de la población de la CRUZMI esté en condiciones de pobreza. ¹⁴ De acuerdo con el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2022) en el 2010, 82% de las personas de esta región estaban en condiciones de pobreza, mientras que, en el 2020, el porcentaje bajó ligeramente (79%). Sin embargo, se incrementó la pobreza extrema pasando de 40% de la población de la región en 2010 a 46.5% en 2020.

La enorme riqueza natural de la CRUZMI no se ha podido traducir en valores económicos que permitan mitigar la pobreza y la marginación de una buena parte de la población local.

d) Factores indirectos

Son numerosos los factores que amenazan la persistencia o la integridad de los ecosistemas y sus servicios ecosistémicos, con frecuencia sacrificados en aras de obtener recursos económicos de corto plazo en beneficio de sectores sociales que no siempre son los afectados por el inducido deterioro de los servicios. Entre los principales factores que pueden ejercer una excesiva presión sobre los recursos de la CRUZMI, se pueden destacar los siguientes, enlistados en forma no jerárquica ni exhaustiva.

- Permanencia de procesos históricos de ocupación territorial dispersa, desordenada y carente de racionalidad;
- Fallas en la gobernanza participativa y organizativa local;
- Dificultades de gestión armonizada como cuenca transfronteriza;
- Ocasional conflictividad derivada de su carácter pluriétnico;
- Choques culturales y de intereses entre grupos originarios y colonizadores foráneos;
- Elevadas tasas de crecimiento de la población (33 % de aumento en los últimos 15 años), con el correspondiente aumento en la demanda de bienes y servicios;

**** Precios de 2010

- Incumplimiento de normatividad y ausencia de criterios ambientales en la explotación de recursos basados en ecosistemas;
- Invasiones e intentos de regulación ilegal de la propiedad;
- Insuficiente conocimiento técnico y científico de los elementos estructurales e interacciones funcionales que pudieran asegurar una gestión sustentable de la cuenca;
- Marginación de valiosos conocimientos autóctonos, desarrollados por las comunidades locales.

El efecto integrado y sinérgico de estos factores conduce a una progresiva degradación ambiental de la CRUZMI, sin que por ello mejore la calidad de vida de su población mayoritaria, cuya pobreza contrasta con la riqueza natural de la región.

Periodización de la ocupación de la CRUZMI

Como lo expresaba el antiguo aforismo de Lucien Goldmann (1959), “el problema de la historia es la historia del problema”. El trabajo interdisciplinario se guía desde su inicio por la formulación de problemas, no por enfoques disciplinarios. El nudo problemático de la CRUZMI se aborda mediante una periodización que representa la secuencia de etapas estructurales del sistema analítico construido para su estudio, y que se puede reflejar en la historia de la ocupación de este territorio.

Sin necesidad de remontarse a la fase inicial protagonizada por la caza- pesca- recolección por parte de poblaciones escasas y dispersas, las culturas mayas acabaron por desarrollar una civilización con ocupación intensiva de la región, mediante asentamientos urbanos articulados por el sistema fluvial. Se estima que, en el periodo clásico (años 250 – 900), las diversas poblaciones indígenas del área pudieron llegar a contar con alrededor de 150,000 habitantes (De la Maza y Carabias, 2011). El sistema socioambiental incluyó entonces patrones tecnoagrícolas avanzados, con gestión de recursos hidráulicos y fertilización natural inducida. Las construcciones, cada vez más sofisticadas, contaban con un uso intensivo de la cal.

Por razones que son todavía objeto de discusión e investigación, a partir del año 900 las culturas mayas locales sufrieron un rápido declive poblacional, organizativo y productivo,

que algunos han caracterizado como un colapso civilizatorio en las tierras bajas. Las ciudades se fueron abandonando, abriendo paso al avance de una selva que llegó casi a borrar el rastro de su infraestructura. A la llegada de los españoles solo subsistían pequeños asentamientos dispersos (De la Maza y Carabias, 2011). La transición del sistema socioambiental del periodo clásico maya al colonial no consistió en un cambio de estructura, sino en un cambio completo de sistema.

Las primeras invasiones, lideradas por Pedro de Alvarado, se dirigieron a la parte de territorio que hoy corresponde a Guatemala. A partir de 1527 los españoles fundaron los primeros asentamientos encomenderos en Chiapas. Persistieron grupos de resistencia indígena que acabaron dando origen en 1712 a la Rebelión de los Zendales (De Vos, 2011), la sublevación indígena más importante de toda la época colonial en el sur del Virreinato novohispano, en la que participaron pueblos tzeltales, tzotziles y choles. Al carecer de recursos mineros y abundante fuerza de trabajo que pudiera someterse a alguna explotación cuya escala fuera de particular interés para los colonizadores, el territorio de la Cuenca quedó casi despoblado. El asentamiento principal de la región, San Cristóbal de las Casas, se estableció como un enlace entre el Virreinato y el Reino de Guatemala.

En los procesos de independencia, Chiapas consideró las opciones de adscribirse a Guatemala, establecerse como entidad independiente o incorporarse a México. Acabó, en septiembre de 1824, por elegir esta última opción. La poderosa, aunque poblacionalmente reducida, clase dominante criolla y mestiza chiapaneca prefirió negociar con sus homólogos del centro de México, mientras mantenía en la marginalidad a los pueblos indígenas locales. Como rasgo estructural emergente desde la etapa colonial, los españoles y criollos establecieron rutas terrestres de comunicación y comercio entre el virreinato y la Capitanía General, que empezaron a desplazar la anterior exclusividad del transporte por vía fluvial. Buena parte de la CRUZMI quedó casi despoblada hacia 1700, hasta que hacia finales del siglo XIX una nueva actividad estructuró el sistema socioambiental local: la explotación de maderas finas por parte de las compañías madereras, las cuales dejaron de funcionar hacia 1929.

Mención aparte merece la región de la Selva Lacandona, cuya evolución territorial aparece descrita en De Vos (1991). La periodización que inicia con el exterminio de las poblaciones originarias durante la conquista, tanto por las epidemias inducidas por agentes patógenos

importados, como por razones bélicas, la posterior colonización de habitantes de la colindante Selva Maya, el establecimiento de monterías para la explotación de caoba desde mediados del siglo XIX hasta principios del XX, culmina con el establecimiento de la Comisión Forestal Selva Lacandona (COFOLASA) en los años setenta, que casi arrasó con la caoba remanente, con el consiguiente descreme de la selva, que mantuvo sin embargo, casi en su integridad, su biodiversidad.

La siguiente configuración sistémica socioambiental de la CRUZMI corresponde a la nueva colonización del territorio y ampliación de la frontera agropecuaria a costa de la selva, proceso que se inició en los años 50 del siglo XX. Una de las funciones principales del sistema consistió en dar salida a poblaciones de diversos sectores del estado de Chiapas e incluso de otras partes del país que habían quedado al margen de los beneficios de la Reforma Agraria posrevolucionaria. La expropiación de las antiguas monterías y su constitución como terrenos nacionales permitió alguna expansión de la dotación ejidal local de tierras. Los nuevos pobladores consistieron en campesinos minifundistas y jornaleros mestizos e indígenas de escasos recursos, en búsqueda de nuevas opciones de sobrevivencia familiar en un territorio de vocación forestal, pero con grandes limitaciones físico-ecológicas para la agricultura. Surge también un nuevo rasgo estructural con la emergente participación del sector público en la definición y ejecución de políticas y programas de regulación y orientación de la colonización.

En la primera etapa de la colonización y formación de los nuevos asentamientos, las actividades productivas de los campesinos se encaminaron hacia el autoconsumo alimentario, a partir de la apertura de diversos espacios de selva para la introducción de milpas, o el simple cultivo del maíz, mediante el método de roza tumba y quema. Progresivamente, empezó a emerger una nueva función de la zona como productora de bienes pecuarios para su exportación extrarregional. Como proveedores de servicios se consolidaron asentamientos urbanos como Comitán de Domínguez, Las Margaritas, Ocosingo y Palenque. La región Marqués de Comillas, colindante con Guatemala, fue colonizada, como otras zonas de la CRUZMI, por pobladores externos demandantes de tierra. El efecto integrado de este proceso agropecuario colonizador se expresó a nivel regional, sobre todo a partir de 1970, en la deforestación más aguda de su historia, con graves impactos sociales,

frecuentemente diferidos, hasta el agotamiento de la fertilidad de los suelos (Izquierdo-Tort *et al*, 2024).

Adentrada la década de los setenta, empezó a permear la opinión pública nacional y algunos medios oficiales la conciencia del notable deterioro ambiental que afectaba a numerosas partes del país, incluyendo el sureste. Anticipándose a hitos normativos nacionales, como la promulgación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, enero de 1988), o internacionales, como la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (“Cumbre de la Tierra”; Río de Janeiro, junio de 1992) y los instrumentos jurídicos que de ella derivaron, el gobierno nacional decretó en 1978 la Reserva de la Biosfera Montes Azules en la región de la Selva Lacandona, para preservarla, relativamente intacta, de un proceso colonizador cuyo potencial depredador era ya evidente. Esta intervención que, conjuntamente con la creación posterior de otras ANPs^{††††}, tuvo un impacto muy positivo sobre el sistema socioambiental de la CRUZMI, en un inicio, no surgió por procesos internos del sistema. El despertar de una conciencia ecológica, con actividades de movimientos ambientales conservacionistas, grupos académicos, se activó a raíz de la Cumbre de la Tierra. Sectores de la CRUZMI, bajo la denominación de “Selva Maya”, se reconocieron como “hotspots” de biodiversidad, es decir regiones de gran riqueza biológica pero amenazadas. La revalorización del medio ambiente y la necesidad de su conservación actuó como un factor emergente en las condiciones de contorno del sistema analítico. Sin embargo, siguió predominando, hasta la actualidad, la tendencia por parte de las autoridades centrales de dar desfogue territorial a poblaciones que carecían de acceso a la tierra en sus lugares de origen y que ejercían una notable presión socio-política para asegurar su asentamiento. Se fue estableciendo en la región un mosaico de modalidades de propiedad que incluía algunas comunidades, remanentes de las condiciones indígenas iniciales, ejidos cuyos mecanismos de gobernanza desplazaron en los hechos la realidad formal municipal, y propiedad privada, la cual tendió a ocupar buena parte de los terrenos fértiles adjuntos a los bordos de ríos.

^{††††} En 1992: Reserva de la Biosfera (RB) Pantanos de Centla, Tab.; RB Lacan-tún, Chis.; Monumento Natural (MN) Bonampak, Chis.; MN, Yaxchilán, Chis.; Área de Protección de Flora y Fauna (APFF), Chan-Kin, Chis. En 1994: APFF Laguna de Términos, Campeche y Tabasco. En 1998: APFFs Naha y Metzabok, en Chis. En 2008 se agregó la APFF Cañón del Usumacinta en Tab. A pesar de la debilidad de apoyos y el retraso o ausencia de programas de manejo, el conjunto de las ANPs en la CRU logró un innegable efecto de conservación de la biodiversidad.

El carácter transfronterizo de buena parte del territorio de la CRUZMI confiere a la región rasgos particulares. Si la frontera con Guatemala fuese de índole cerrada, o muy restrictiva, la influencia del país vecino en el sistema socioambiental de la parte mexicana de la cuenca podría manejarse como una condición de contorno más. Desde sus trabajos iniciales, el proyecto puso en evidencia hasta qué punto esta frontera, aunque es jurídicamente nítida, es en la práctica porosa, frecuentemente informal, con niveles de intercambio de recursos humanos, bienes y servicios que obligaron a incluir territorios guatemaltecos como parte de nuestro sistema en construcción, promoviendo la participación de algunos investigadores del país vecino.

La evolución de la situación de la frontera México- Guatemala se inserta en la periodización aludida anteriormente, aunque con algunas modalidades propias. La conformación formal de la frontera político-administrativa tuvo lugar en 1882 (Tratado México-Guatemala). El río Usumacinta se convierte en límite entre los dos países, en un tramo de 365 km. La creciente presencia de ambos Estados a partir de mediados del siglo XX se manifiesta en Guatemala en un contexto de guerra civil y un proyecto desarrollista colonizador, y en México a través de proyectos de modernización del trópico, con impactos ambientales muy negativos. El crecimiento poblacional de la región incidió en las áreas fronterizas con nuevas dinámicas de comercio y aprovechamiento de recursos. Guatemala desempeñó un papel importante como proveedor de terneros para el auge ganadero en la parte mexicana de la CRUZMI, con fines de comercialización extrarregional.

Ya en el nuevo siglo, la conservación promovida a través de las áreas naturales protegidas se refuerza en México con la introducción de nuevos instrumentos como los pagos por servicios ambientales (PSA), incentivos para la reforestación, proyectos de ecoturismo y un modesto incremento en las Áreas Voluntariamente Dedicadas a la Conservación (AVDC). En el caso de Guatemala se crearon también nuevas áreas protegidas privadas. Estas estrategias paralelas se desarrollaron sin que se establecieran mecanismos de coordinación binacionales entre las respectivas instituciones gubernamentales. Esta carencia de coordinación oficial se puso en evidencia también en la planeación de las principales vías de comunicación, la gestión del agua, las políticas de conservación y de acción climática, entre otros posibles ejes articuladores del desarrollo.

En el interior de cada país existe una contradicción entre las políticas productivas y las políticas de conservación de la biodiversidad, la gestión racional del agua y la atención al cambio climático, tema este último que fue adquiriendo creciente relevancia internacional en los últimos años. En ambos países la estrategia productivista es netamente dominante, en detrimento de la sustentabilidad del desarrollo. Por ello, a pesar de su heterogeneidad institucional, un mismo esquema analítico puede acomodar la situación de los dos países en la CRUZMI. Sin embargo, los efectos del cambio climático, cada vez más evidentes, el deterioro de la biodiversidad, la afectación a los caudales y la calidad de los recursos hídricos han mostrado la necesidad de incrementar la atención prestada a esta problemática. En el ámbito de los procesos de segundo nivel, o metaprocesos, en México, con la excepción de una franja costera en la CRUZMI, la incidencia directa del desarrollo petrolero se concentró sobre todo en la cuenca del Grijalva; en Guatemala la explotación de las limitadas reservas petroleras del Petén no alcanzó niveles que indujeran cambios estructurales en el esquema analítico utilizado.

Mayor convergencia binacional se produjo a raíz del crecimiento reciente de las plantaciones de palma africana, todavía más notable en Guatemala que en México, pero con similares efectos negativos ambientales y sociales en ambos países. Este proceso se describirá en la siguiente sección, relativa a las actividades.

e) Actividades en el territorio

El análisis de la producción que a continuación se presenta se limita a la parte mexicana. La población rural tiene como su principal actividad productiva la agropecuaria. En 4,831 localidades de los 21 municipios se producen 41 cultivos en una superficie de 375 mil hectáreas, de las cuales un tercio corresponde a predios con menos de 20 hectáreas. El valor total de la producción fue de \$3,708 millones de pesos (SAGARPA-SIAP 2017b, 2017c). Sin embargo, solo siete cultivos cubren el 80% de la superficie indicada, con tasas de crecimiento medio anual entre 2 y 14%. Algunos cultivos tienden a concentrarse en zonas específicas: tomate rojo en La Independencia (Chiapas); maíz y hule hevea en Palenque; frijol y café en Ocosingo. En algunos casos, como en el del café, la especialización se explica por condiciones ambientales. En otros la determinan situaciones económicas, sociales, decisiones personales o políticas del estado (Gallardo-Cruz *et al.*, 2017).

La cuarta parte de los cultivos de la región, incluyendo el de café cereza, presenta rendimientos superiores al promedio nacional, con las correspondientes ventajas comparativas, no siempre aprovechadas.

La producción pecuaria muestra en general un estancamiento y, en ciertos municipios, una disminución. Esta producción, con un valor total de \$6,965 millones de pesos, ocupa una superficie de 1.2 millones de hectáreas, de las cuales la casi totalidad corresponde a predios con menos de 100 hectáreas (SAGARPA-SIAP 2017a, 2017b). La ganadería es de tipo extensivo con malos pastos, requiriendo mucho terreno por cabeza, y es de baja productividad. Sus productos predominantes son el ganado en pie, la carne en canal y la venta de becerros al destete. Los potreros, en ausencia de rotación planificada, principios de ganadería holística, o de prácticas silvopastoriles, manifiestan con frecuencia síntomas de degradación. Algunas especies regionales, como el guajolote, se desaprovechan (Gallardo-Cruz *et al.*, 2017).

En el ámbito pecuario las actuales condiciones de comercialización de los productos son muy desventajosas para los productores, víctimas de un coyotaje que no logran superar las organizaciones ganaderas locales. Lo mismo pasa con el chile, palma xate, entre otros productos. En el caso de la palma de aceite los productores venden el producto a las empresas agroindustriales que les apoyaron para la plantación. En el caso de otros productos agrícolas se establece una red jerarquizada de intermediarios especializados. Los ritmos de comercialización se acompasan con la temporalidad de las cosechas.

No tienen presencia significativa en la CRUZMI ni la actividad forestal ni la pesquera, con la excepción en este último rubro de la zona costera, en donde se detecta sobreexplotación del recurso. En distintos espacios de la cuenca se han iniciado actividades turísticas y ecoturísticas, en torno a zonas arqueológicas y en áreas naturales protegidas, aunque la falta de fomento y ordenamiento de esta actividad no ha permitido el pleno aprovechamiento de su potencial regional y de sus beneficios económicos y ambientales. En la Selva Lacandona la introducción y explotación de palma de aceite, o palma africana (*Elaeis guineensis*), constituye un sistema productivo cuya implantación se inició en México a mediados del siglo 20. La expansión de estas plantaciones, acelerada a partir de los años noventa, contó con importantes estímulos gubernamentales. En el conjunto del país la superficie cultivada con palma pasó de 16,754 hectáreas en el año 2000 a 108,690 hectáreas en 2019. Hasta 2020,

operaban en México 18 plantas agroindustriales de aceite de palma, 12 de las cuales se ubicaban en Chiapas, que se convirtió en el primer estado productor (Sánchez, 2022; De la Vega-Leinert y Sandoval, 2021). En este estado los municipios con la mayor extensión sembrada y mayor producción de palma son Acapetahua y Mapastepec. En mucho menor medida, en la Selva Lacandona, el municipio con mayor producción de palma es el de Benemérito de las Américas, en donde se ha documentado la pérdida de selva alta por este motivo. La productividad por hectárea de la palma es notable: sembrada en terreno apto, con 50 cm de altura, la palma puede desarrollarse y empezar a producir fruto en apenas 3 años, con una vida productiva de no más de 20 años, cuando por la altura alcanzada por la planta se dificulta la cosecha.

México, sin exportar cantidad alguna del producto, invirtió en 2023 la cantidad de 528 millones de dólares para importar aceite de palma en bruto (Secretaría de Economía, 2024). En un mercado dominado por trasnacionales, el de palma es el aceite vegetal más consumido en todo el mundo; se utiliza con fines de alimentación, múltiples usos industriales e incluso como biocombustible (WWF, 2020). Por la imagen negativa adquirida por esta agroindustria algunos productos de consumo señalan en su etiquetado “no contiene aceite de palma”.

La sustitución de la selva original por este monocultivo, el uso depredador de los recursos hídricos y las contaminaciones provenientes de esta agroindustria, han suscitado numerosas controversias ambientales (Castellanos-Navarrete, 2018). Algunos funcionarios locales o federales, promotores de programas gubernamentales de fomento a estas plantaciones, arguyen que la palma se introduce en áreas ya deforestadas, o con cobertura de acahuales, que se habían dedicado previamente a la ganadería o agricultura campesinas. En cambio, varios analistas han documentado la tala, con frecuencia clandestina, de vegetación primaria para abrir espacios a la palmicultura, en detrimento de la biodiversidad inicial, denunciando también otros daños socioambientales (Núñez-Hernández *et al.*, 2014).

Es cierto también que muchos agricultores que se habían dedicado a cultivos de autoconsumo, salieron de una pobreza extrema al recibir ingresos aportados por los dueños de las industrias aceiteras de palma, y a su vez pagaron a los jornaleros que hubieran empleado. En la Selva Lacandona es difícil competir por ingresos con las plantaciones de palma: mientras en 2017, a través del PSA, el gobierno mexicano pagaba 1,000 pesos al año por la conservación de una hectárea de selva, la misma superficie de palma en edad

productiva podría generar una ganancia de 100 mil pesos al año (Soberanes, 2017). La dimensión del negocio disminuye mucho cuando se contabiliza económicamente el daño ambiental asociado.

f) Factores directos y sus impactos

En su conjunto, las actividades productivas desarrolladas en la región han impulsado las siguientes transformaciones ambientales en la CRUZMI:

- Deforestación y fragmentación de los ecosistemas naturales
- Sobreexplotación de especies o partes de individuos
- Contaminación de aguas de ríos o arroyos y de suelo
- Introducción de especies exóticas invasoras

Se mencionan a continuación los principales impactos de estos factores directos. Las actividades agropecuarias determinaron serios deterioros ambientales en todo el territorio de la CRUZMI, en donde la deforestación alcanzó 40 % de su superficie forestal, habiéndose iniciado con los procesos de colonización de los años sesenta (Gallardo-Cruz *et al.*, 2021).

En Guatemala la deforestación se aceleró bajo las políticas impulsadas por la Empresa Nacional de Fomento y Desarrollo Económico del Petén, órgano creado en 1959 para la colonización del territorio, y por el Instituto Nacional de Transformación Agraria (INTA) para el fomento agropecuario. A este impulso se sumaron, en los años setenta, los proyectos en la denominada Franja Transversal del Norte (FTN) para la exploración y la explotación de petróleo, con apertura de caminos que favorecieron la ampliación de la frontera agrícola en el Petén.

En México, siguiendo el ejemplo del Plan Balancán–Tenosique creado en 1972 en Tabasco, en la zona de Marqués de Comillas en la CRUZMI empezó un impulso colonizador en esa misma década, detonado por la ampliación de la red de vías de comunicación (Izquierdo-Tort *et al.*, 2024). Además de la apertura de caminos, otros factores han contribuido a la deforestación, entre los que cabe destacar los procesos de regularización de asentamientos, tanto de índole irregular en Áreas Naturales Protegidas (ANP), como de otros directamente promovidos por el Estado en la zona sur de la Reserva de la Biosfera Montes Azules, así como los subsidios agrícolas (Procampo) y ganaderos (Progan), muy superiores a cualquier apoyo a la conservación.

Además de su fracaso productivo y social, estos procesos desarrollistas mantuvieron activa la deforestación regional: entre 1993 y 2018 se perdieron en la cuenca, del lado mexicano, casi 462 mil hectáreas, que representan 24% de la cobertura forestal del inicio de este periodo (Gallardo-Cruz y Meave, 2018).

Otros procesos agropecuarios han agravado el deterioro ambiental en la región, como la contaminación del suelo y del agua en la cuenca por abuso de agroquímicos, algunos de los cuales, de índole prohibida por la normatividad, se introducen con frecuencia en México desde Guatemala. A todo ello se agregan las descargas de aguas servidas provenientes de los asentamientos. Sin embargo, por el poder de dilución por su cantidad, la calidad del agua del Usumacinta y de sus afluentes no se considera todavía como “mala” (Álvarez-Porebski *et al.*, 2015; Esqueda *et al.*, 2017).

La utilización de especies silvestres se suele realizar fuera de normatividad, sin planes de manejo, en perjuicio de la estabilidad de las poblaciones. El aprovechamiento comercial de la vegetación se concentra en las especies maderables, sobre todo pino en la cuenca alta, y algo de resina, miel y palma xate. En la explotación de aves destaca el saqueo de pichones de guacamaya roja, especie altamente emblemática, cuya viabilidad como población silvestre está en riesgo en México y Guatemala, por el tráfico ilegal. Los ecosistemas acuáticos se encuentran en riesgo por sobreexplotación de peces nativos, deforestación de riberas, e introducción de especies invasoras, como el pez diablo (*Pterygoplichthys sp.*) (Barceinas *et al.*, 2015).

g) Factores exógenos

Además de todos los problemas señalados que presionan a la CRUZMI, debe destacarse aquellos que no son generados en la misma región, sino que corresponden a dinámicas externas.

- Presiones ejercidas por un sistema de ciudades externo a la región (Tabla 7.4);
- Presencia creciente del crimen organizado en sectores de la CRUZMI, en perjuicio de la seguridad y la gobernanza democrática, y afectación por tráfico ilegal de especies;
- Descontrol de flujos migratorios que atraviesan la zona;
- Efectos incipientes, pero ya claramente detectables, del cambio climático global, entre ellos las amenazas de desastres por fenómenos hidrometeorológicos extremos,

elevación progresiva del nivel del mar; insuficientes actividades de adaptación y mitigación del cambio climático;

- Finalmente, imposición de políticas públicas ajenas a las necesidades de un desarrollo sustentable.

Tabla 7.4. Articulación de ciudades en el entorno de la CRUZMI

Gabriela Quiroz Cázares, Yosú Rodríguez Aldabe
Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo)

La mejor comprensión de la influencia externa ejercida por ciudades de mayor magnitud sobre las actividades y la ocupación de la CRUZMI exige una ampliación del recorte espacial del objeto de estudio, desbordando los límites hidrográficos para contextualizar la región en un medio geográfico mucho más amplio, que incluye los estados completos de Tabasco, Chiapas, Campeche, Península de Yucatán, además de toda Guatemala, El Salvador y Honduras, como se presenta en el mapa adjunto, que se trabajó a escala 1: 4 millones. Se incorporan así ciudades aledañas de alta influencia en la CRUZMI: Ciudad de Guatemala y Quetzaltenango en Guatemala y Tapachula en México al sur, Tegucigalpa y San Salvador al sureste, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal al oeste, Villahermosa al noroeste, Ciudad del Carmen al norte, Campeche, Mérida, Cancún, Playa del Carmen al noroeste y Chetumal al este (Figura 7.4).

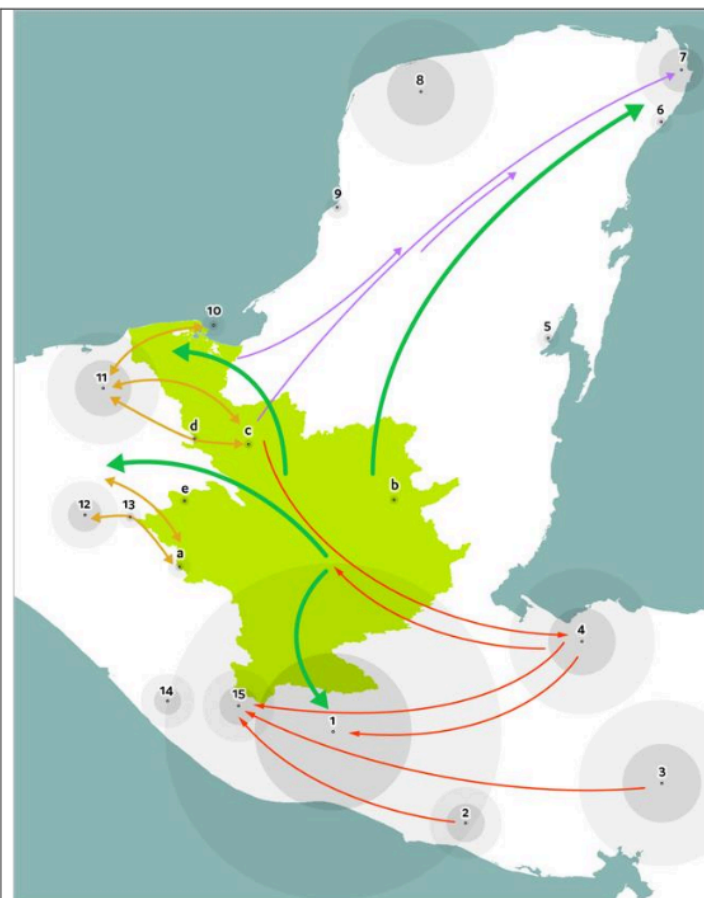


Figura 7.4. ciudades aledañas de alta influencia en la CRUZMI; 1. Ciudad de Guatemala, 2. San Salvador, 3. Tegucigalpa, 4. San Pedro Sula, 5. Chetumal, 6. Playa del Carmen, 7. Cancún, 8. Mérida, 9. Campeche, 10. Cd. Del Carmen, 11. Villahermosa, 12. Tuxtla Gutiérrez, 13. San Cristóbal de las Casas, 14. Tapachula y 15. Quetzaltenango; a. Comitán, b. San Benito, c. Tenosique, d. Palenque y e. Ocosingo. En verde se expresan los flujos de bienes y servicios que salen de la cuenca principalmente hacia: i) el desarrollo hotelero de Quintana Roo, centrado en la ciudad de Cancún, para el cual la cuenca aporta sobre todo materiales de construcción y alimentos; ii) la zona costera del Golfo y Villahermosa, por las demandas urbanas y de la industria petrolera; iii) la ciudad capital de Tuxtla Gutiérrez por su atracción urbana; y iv) la Ciudad de Guatemala por su alta concentración de población.

Por la cuenca atraviesa una parte importante del flujo migratorio proveniente de Honduras, El Salvador y Guatemala (el Triángulo del Norte) con destino a los Estados Unidos (flechas rojas). Las flechas amarillas representan la movilidad laboral circular y la movilidad por servicios, como los hospitalarios o educativos, principalmente de la parte media y baja de

la cuenca hacia Tuxtla Gutiérrez, San Cristóbal de las Casas, Villahermosa y Ciudad del Carmen.

III. Orientaciones para el cambio

Las tendencias hacia el deterioro socioambiental de la CRUZMI **no** son irreversibles. La calidad ambiental de los ecosistemas de la cuenca todavía puede considerarse **buena**. Vale mucho la pena movilizar todos los recursos institucionales disponibles para garantizar su conservación y su utilización sustentable por parte de la población. Esta movilización es muy factible, como lo demuestra el ejemplo del establecimiento de áreas naturales protegidas, el más importante instrumento de conservación de la biodiversidad, que ha logrado contener en buena medida las presiones de cambio de uso de suelo. Para mejorar la eficacia de instrumentos como el indicado y escalar numerosos ejemplos de actuaciones exitosas que logran evitar el cambio de uso del suelo, se requiere incrementar la actuación de personal especializado, capacitado, y destinar presupuesto y programas de apoyo para iniciativas sustentables.

La enorme biodiversidad de la cuenca permite cerca de un millar de especies puedan integrarse en agroecosistemas, y más de 134 especies de peces sean objeto de pesca sustentable (Gallardo-Cruz *et al.*, 2017). En varias zonas de la cuenca se han emprendido, con éxito, algunos proyectos piloto para diversificar la producción con base en la biodiversidad natural y agroforestal e introducir nuevas prácticas o tecnologías más adecuadas para las condiciones locales, con beneficios ambientales, sociales y económicos. Entre estas experiencias agroecológicas figuran cultivos bajo sombra, huertos agroforestales, plantaciones diversificadas y estratificadas, enriquecimiento de acahuals y prácticas silvopastoriles. Estos proyectos contribuyen a la protección de la vegetación primaria y de la agrobiodiversidad, el mantenimiento de la conectividad y continuidad de servicios ecosistémicos. Además de aportar ingresos, pueden también contribuir a la alimentación familiar, en mejores condiciones incluso que las milpas tradicionales.

El escalamiento de estas experiencias agroforestales para rebasar la fase piloto deberá sin embargo planearse con sumo cuidado para evitar retrocesos o efectos secundarios negativos. Entre las condiciones de éxito cabría mencionar la organización de los productores con formas participativas de gobernanza, la asistencia y el acompañamiento técnicos, la disposición de infraestructura para el acopio, manejo y comercialización del producto, fases

que suelen constituir cuellos de botella, la incorporación de subsidios en las políticas públicas, el establecimiento de cadenas productivas para la comercialización, en su caso la utilización controlada de mecanismos institucionales como las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMAs) y las manifestaciones de impacto ambiental. En algunos casos surgieron organizaciones en apoyo a las huertas agroforestales, como la Sociedad de Productores Orgánicos de la Selva Lacandona, S.S.S. (SPOSEL) y la Alianza de Cacaoteros de la Selva, S.C., que han promovido la certificación orgánica de espacios productivos, con vistas a la exportación (Carabias *et al.*, 2015; Espinosa y Velásquez, 2023). Mención aparte merece la posibilidad de expansión ordenada de actividades ecoturísticas promovidas por la población dueña de los ecosistemas naturales, para garantizar el mejoramiento equitativo de los ingresos y las condiciones de vida de las familias, siguiendo ejemplos exitosos en los que se han involucrado la etnia lacandona, las comunidades Lacanhá Chansayab, Nahá, Metzabok (Ortiz *et al.*, 2018), así como otros desarrollados en el municipio Marqués de Comillas (De la Maza *et al.*, 2015) y algunos ejidos de Maravilla Tenejapa.

Algunos cambios de política hídrica, como la aprobación del Decreto de Reserva de Agua Grijalva-Usumacinta que mantiene una disponibilidad del recurso para los ecosistemas de las subcuencas sin comprometer el derecho humano de acceso al agua, son prueba de la posibilidad de actuaciones públicas beneficiosas para la sustentabilidad de la cuenca (DOF, 2018). Esta medida excluye, además, muy peligrosas intervenciones hídricas, como la construcción de una presa en el río Usumacinta, bajo el pretexto de controlar su flujo con fines agropecuarios.

La transformación pendiente puede contar con la diversidad de zonas agroclimáticas, desde las templadas de tierras altas hasta las tropicales de las tierras bajas, que ofrece una amplia gama de productos agropecuarios, junto con una extraordinaria agrobiodiversidad que fue detectada en este estudio y que no se considera en las estadísticas oficiales. Las actividades agroforestales y silvopastoriles son alternativas sustentables, sustitutivas de los monocultivos, que disminuyen los impactos ambientales, son más resilientes y se adaptan mejor al cambio climático.

Los alcances de la transformación pendiente variarán en función de las posibilidades de incidencia en los distintos niveles del sistema analítico experimentado en este estudio. Una planeación productiva a partir de las ventajas de cada zona de la cuenca, junto con una

reorganización de la demanda, el eslabonamiento de cadenas comerciales con mercados regionales y una buena articulación con las ciudades externas, reduciría las presiones sobre la cuenca, diversificaría la producción, incrementaría los ingresos de las familias y redundaría en una mejor calidad de vida sin comprometer los ecosistemas naturales.

Excede los objetivos de este análisis la elaboración de una propuesta completa y detallada de transformación del sistema de la CRUZMI, pero el trabajo analítico realizado servirá sin duda de base para concretarla.

Para construir la sustentabilidad de la Cuenca del río Usumacinta se debe buscar la reducción de la pobreza, atenuar la desigualdad, fomentar una economía circular y una renovada funcionalidad ecológica, aumentar la resiliencia del sistema, evitar comprometer el futuro de los recursos naturales, limitar su uso para asegurar su regeneración, fortalecer las capacidades de los habitantes de la cuenca para asegurar un futuro autosustentable.

Referencias

- Álvarez-Porebski, P., Hernández, L., Gómez-Ruiz, H. y Ramírez, C. (2015). Calidad del agua en la subcuenca del río lacantún. En: Carabias, J., de la Maza, J. y Cadena, R. (coords.), 2015. *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicanos.
- Barceinas, A., León-Pérez, R., Alfonzo, J., *et al.* (2015). Actividades ilegales que amenazan a la flora y fauna silvestres: cacería, tala, pesca ilegal y tráfico de guacamaya roja. En: Carabias, J., de la Maza, J. y Cadena, R. (coords.), *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- Castellanos-Navarrete, A. (2018). Palma de aceite en tierras campesinas. La política de las transformaciones territoriales en Chiapas, México. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 13, e-357. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2018.v13.357>
- CONEVAL (2022). Medición de la Pobreza: Pobreza a nivel municipio 2010-2020. Disponible en <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx>
- De la Maza, J. y Carabias, J. (2011). Usumacinta: bases para una política de sustentabilidad ambiental. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Natura y Ecosistemas Mexicanos del Agua A.C., México.

- De la Maza, J., Mastretta, A., Ruíz, L. y Carabias, J. (2015). Ecoturismo para la conservación. En: Carabias, J., J de la Maza, R. Cadena (coords.), 2015. *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- De la Vega-Leinert, A.C. y Sandoval, D. (coords.). (2021). Cultivo de palma de aceite en México. Balance de la situación actual y análisis espacial. Univ. Greifswald; Centro de Estudios para el Cambio en el Campo Mexicano CECCAM; México via Berlín e.V.
- De Vos, J. (1991). Historia de la Selva, Crónica de una Agresión en Lacandonia: El Último Refugio. UNAM. México
- De Vos, J. (2011). La guerra de las dos vírgenes. La rebelión de los Zendales (Chiapas, 1712) documentada, recordada, recreada. Centro Peninsular en Humanidades y Ciencias Sociales. México.
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J. *et al.* (2015). The IPBES Conceptual Framework — connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- DOF (Diario Oficial de la Federación), 2018. Decreto por el que se suprimen las vedas existentes en las cuencas hidrológicas Presa La Concordia y La Concordia, de la Región Hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta y se establecen zonas de reserva de aguas nacionales superficiales para los usos doméstico, público urbano y ambiental o conservación ecológica en las cuencas hidrológicas que se señalan, las cuales forman parte de la Región Hidrológica antes referida. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5525361&fecha=06/06/2018#gsc.tab=0
- Espinosa, G. y Velásquez, C. (2023). Mujeres construyendo territorio en la frontera ser. El potencial de la política minúscula. En: Espinosa G. y Rodríguez, C. (coords.), *Conflictos y alternativas socioterritoriales en el sur-sureste de México*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco; El Colegio de San Luis, A.C.
- Esqueda, K. (coord.). (2017). Síntesis de los ecosistemas acuáticos de la CRUZMI. Objetivo 2. Diagnóstico Socioambiental. Proyecto FORDECYT 273646. *Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio*. CCGS.

- Gallardo-Cruz, J.A., Charruau, P. y Campo, J. (2017). Documento síntesis de la información disponible de los medios físico y biológico de la CRUZMI. Objetivo 2. Diagnóstico Socioambiental. Proyecto FORDECyT 273646. *Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio*. CCGS.
- Gallardo-Cruz, J.A. y Meave, J. (coord.). (2018). La vegetación de la cuenca del Usumacinta: Caracterización, composición y tendencias de cambio. Objetivo 2. Diagnóstico Socioambiental. Proyecto FORDECyT 273646. *Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio*. CCGS.
- Gallardo-Cruz, J.A., Peralta-Carreta, C., Solórzano-Vidal, J., Fernandez-Montes de Oca, A.I., Nava L.F., Kauffer, E. Y Carabias, J. (2021). Deforestation and trends of change in protected areas of the Usumacinta River basin (2000–2018), Mexico and Guatemala. *Regional Environmental Change*, 21(4), 97. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01833-8>
- Gallardo-Cruz, J.A., Morales, J.F. y Rives, R.C. (2017). Documento síntesis de la información disponible del medio económico –productivo. Objetivo 2. Diagnóstico Socioambiental. Proyecto FORDECyT 273646. *Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Bases para la adaptación al cambio climático desde la ciencia y la gestión del territorio*. CCGS.
- Gallopín, G., Funtowicz, S. y O'Connor, M. y Ravetz, J. (2001). Science for the Twenty-First Century: From Social Contract to the Scientific Core. *International Social Science Journal*, 53, 219-229. <https://doi.org/10.1111/1468-2451.00311>
- García, R. (2000). *El conocimiento en construcción. De las formulaciones de Jean Piaget a la teoría de los sistemas complejos*. Ed. Gedisa. Barcelona.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, 1(1), 66-01.
- Goldmann, L. (1952). “Introduction générale”, en VVAA, *Entretiens sur les notions de génèse et de structure*. París: Mouton & Co., 1959, pp. 7-22.

- INE (Instituto Nacional de Estadística-Guatemala). (2008). Estimaciones de la Población total por municipio. Período 2008-2020. Disponible en: [http://www.oj.gob.gt/estadistica/reportes/poblacion-total-por-municipio\(1\).pdf](http://www.oj.gob.gt/estadistica/reportes/poblacion-total-por-municipio(1).pdf)
- INEGI (2011). Resultados de Censo de Población y Vivienda 2010. Disponibles en <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI (2021). Resultados de Censo de Población y Vivienda 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#tabulados>
- Izquierdo-Tort, S., Carabias, J., López, A., Meli, P. y Corbera, E. (2024). Development and conservation in the tropical forest frontier: a 50-year analysis of policy evolution and interplay in Marqués de Comillas, Chiapas, Mexico. *Oxford Development Studies*, 52(4), 429-448. <https://doi.org/10.1080/13600818.2024.2424224>
- Jiménez-López, D., Gallardo-Cruz, J.A., Véliz, M.E., Martínez-Camilo, R., Méndez, C., Solórzano, J.V., Velázquez-Méndez, L., Carabias, J., García-Hidalgo, G., Peralta-Carreta, C., Sánchez-González, M., Castillo-Acosta, O., Luna-Kamyshev, N.M., Villaseñor, J.L. y Meave, J.A. (2023). High vascular plant species richness in the Usumacinta River Basin: a comprehensive floristic checklist for a natural region in the Mesoamerican biodiversity hotspot. *Botanical Sciences*, 101(3), 1-23. <https://doi.org/10.17129/botsci.3253>
- Meave, J.A., Gallardo-Cruz, J.A., Méndez-Hernández, C.A., Martínez-Camilo, R., Véliz-Pérez, M.E. y Carabias, J. (coords.). (2021). *Tipos de vegetación de la cuenca del río Usumacinta*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana.
- Merçon, J., (2022). Investigación transdisciplinaria e investigación-acción participativa en clave decolonial. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, 27(98), e6614174. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6614174>
- Núñez-Hernández, J.M., Carrillo-Sánchez, K.A. y Mora-Flores, S.F. (2014). *Monitoreo de Cobertura de Palma Africana en la Selva Lacandona*. Ciudad de México: Centro Geo. <http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/98>
- Ortiz, F., Ramírez, J.J., Valadez, V., de la Maza, J. y Carabias, J. (2018). Ecoturismo para la conservación: bases para el desarrollo ecoturístico en la comunidad Lacanjá Chansayab, Selva Lacandona, Chiapas. México: Natura y Ecosistemas Mexicanos, A.C.

- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.117213>
- Piaget, J. y García, R. (1982). *Psicogénesis e historia de la ciencia*. México: Siglo XXI Editores.
- Ramírez-Martínez, C., Naranjo, E., Caspeta, J.M. *et al.* (2015). Ecosistemas acuáticos. En: Carabias, J., de la Maza, J. y Cadena, R. (coords.), *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- Saavedra, A., D.M. López, L- Castellanos, 2015. Descripción del medio físico de la cuenca media del río Usumacinta. En: Carabias, J., J de la Maza, R. Cadena (coords.), *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- SAGARPA-SIAP (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información-Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017a). Normatividad para la generación de estadística básica agropecuaria y pesquera. SAGARPA. México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105402/Normatividad_Estadistica.pdf
- ¹⁶ SAGARPA-SIAP (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información-Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017b). Sistema de información Agroalimentaria de Consulta: Cierre Agrícola 2003-2016. SAGARPA. México. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- SAGARPA-SIAP (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Sistema de Información-Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2017c). Sistema de información Agroalimentaria de Consulta: Cierre Pecuário 2006-2016. SAGARPA. México. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/Siacon_datos_Abiertos_Pecuario.php
- Secretaría de Economía (2024). Archivo de datos: aceite de palma en bruto. Disponible en: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/crude-palm-oil?timeNetTradeSelector=Year.%202024>.

- Sánchez, A. (2022). Palma de aceite, las plantaciones que acorralan a selvas y manglares en el sureste de México. *Ecología Social*. Disponible en: <https://rebelion.org/palma-de-aceite-las-plantaciones-que-acorralan-a-selvas-y-manglares-en-el-sureste-de-mexico/>
- Soberanes, R. (2017). La palma africana, una de las principales amenazas para la selva Lacandona. *Animal Político*. 24 de junio, 2017. Disponible en: <https://animalpolitico.com/2017/06/palma-africana-amenazas-selva>
- WWF (World Wildlife Fund). (2020). *Palm Oil Buyers Scorecard: Measuring the Progress of Palm Oil Buyers*. 1-45.

Capítulo 8. Transformando territorios: caminos hacia el desarrollo sustentable en Marqués de Comillas, Selva Lacandona, Chiapas^{****}

Julia Carabias^{§§§§}

Elisa Castro^{*****}

1. Introducción

La evidencia científica sigue acumulándose y confirma que las tendencias crecientes de cambio climático y pérdida de biodiversidad, resultado de los modelos de desarrollo predominantes, están poniendo en riesgo el futuro de la humanidad y de la vida en el planeta tal como la conocemos (PNUMA, 2019; Rockström y Gaffney, 2021). Sin embargo, también existe un amplio cuerpo de información, tanto a nivel global (ONU, 2015) como local, que demuestra la viabilidad de diversas rutas para enfrentar y resolver estos desafíos (Ashoka; Liu *et al.*, 2005; Bawa *et al.*, 2011; Campbells *et al.*, 2010; Defries, 2022).

Varios avances conceptuales clave han permitido comprender y delinear estos múltiples caminos hacia el cambio. Entre ellos destaca el reconocimiento, cada vez más extendido, de que los seres humanos somos una parte integral de la naturaleza (Berkes y Folke, 1998) y que no podemos someterla a nuestras necesidades sin considerar las de los demás seres vivos. También se ha subrayado la importancia de entender e integrar los sistemas sociales y ecológicos que coexisten en un territorio, con el propósito de transformar los procesos que degradan el entorno natural (Newell *et al.*, 2005; Ostrom, 2009).

Asimismo, se ha identificado la insuficiencia de un enfoque disciplinario tradicional, lo que apunta a la necesidad de una aproximación multidimensional, interconectada y basada en el análisis de sistemas complejos (Liu *et al.*, 2007; García, 2011). En este contexto, resulta esencial conciliar la diversidad de intereses entre los actores involucrados en la búsqueda de

^{****} Los procesos que se narran en este capítulo son producto del trabajo de Natura y Ecosistemas Mexicanos A.C., asociación civil sin fines de lucro que ha trabajado con el municipio de Marqués de Comillas, sus ejidos y habitantes en la conservación de los ecosistemas naturales remanentes y en la implementación de proyectos productivos sustentables que diversifiquen los medios de vida de los campesinos para mejorar su bienestar. Las autoras hacemos una síntesis y reflexiones sobre los alcances de este proyecto y reconocemos a todos los colaboradores de la organización la contribución de su experiencia y capacidades para la construcción de un modelo de desarrollo sustentable en el municipio.

^{§§§§} Facultad de Ciencias, UNAM y miembro del Consejo Directivo de Natura y Ecosistemas Mexicanos A.C.

^{*****} Natura y Ecosistemas Mexicanos A.C.

soluciones. La complejidad aumenta cuando las estrategias diseñadas a nivel local deben integrarse en las políticas públicas para garantizar tanto un cambio a mayor escala como la permanencia de los resultados a largo plazo (Rai y Bawa, 2013; Morales, 2017). Este desafío exige coordinación, innovación y una visión transformadora que articule esfuerzos desde distintos niveles y sectores.

Sin embargo, la complejidad de enfrentar los desafíos para frenar el cambio global se ve obstaculizada por malas decisiones en el uso del territorio, donde predomina el interés privado e individual sobre el interés público y colectivo, junto con soluciones cortoplacistas y disciplinarias. El trópico húmedo, tanto a nivel mundial como en México, enfrenta un dilema adicional. Por un lado, los ecosistemas de estas regiones son los espacios terrestres de mayor biodiversidad (Wilson, 1992) que requieren ser preservados, y por otro, en las regiones tropicales se concentra un alto porcentaje de la población que vive en condiciones de pobreza extrema (World Bank, 2024).

En este capítulo compartimos algunos elementos de la experiencia que, durante más de 20 años, ha desarrollado Natura y Ecosistemas Mexicanos (NEM) en su esfuerzo por armonizar la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y servicios ambientales, con el desarrollo y bienestar de las comunidades del municipio de Marqués de Comillas, en la Selva Lacandona, Chiapas.

2. Transitando hacia la sustentabilidad del desarrollo

La lógica subyacente de la intervención que NEM lleva a cabo en Marqués de Comillas se basa en mantener o, cuando es necesario, recuperar los ecosistemas naturales remanentes y su funcionalidad en el territorio. Este propósito solo es viable si se acompaña de opciones de ingresos económicos para las comunidades locales dueñas de los terrenos en donde se encuentran estos ecosistemas. Por ello, a la par, se promueve la diversificación de sus medios de vida, aprovechando los beneficios que brindan los ecosistemas naturales y restaurando conectores estratégicos que, además de generar opciones productivas, fomentan la conectividad ecológica en el área.

Los procesos se han ido tejiendo con el tiempo. El inicio de cada uno no surgió de una planificación lineal y secuencial en tiempo y espacio, sino que respondió al interés de las comunidades y aprovechó las oportunidades para su implementación. Al paso del tiempo, las

piezas se fueron acomodando y entrelazando hasta contar con un modelo que consideramos viable y escalable, no solo al resto del municipio, sino, con los ajustes pertinentes, a otras regiones con características semejantes. Esta aclaración metodológica es fundamental, ya que, al trabajar directamente con comunidades rurales que poseen dinámicas propias, la planificación de un proyecto debe ajustarse a las particularidades de cada contexto.

A continuación, presentamos una narrativa concisa de las acciones y los logros alcanzados en cada uno de los componentes que conforman este modelo. La exposición no sigue un orden cronológico, sino que está organizada de acuerdo con el flujo lógico del modelo. Para facilitar su comprensión se agrupan los componentes en ejes. Asimismo, se reflexiona sobre la escalabilidad del modelo y los obstáculos que se presentan.

Eje 1. Ubicación y alianzas

- *Delimitación del territorio.*

Se definió como área de intervención el municipio Marqués de Comillas por varias razones: constituye el área de amortiguamiento del sureste de la Reserva de la Biosfera Montes Azules; es estratégico por la biodiversidad que alberga y constituye un corredor hacia las selvas tropicales de Mesoamérica; está seriamente amenazado por el cambio de uso de suelo y por el cambio climático, y su población vive en condiciones de pobreza y marginación. Además, la presencia de la Estación Chajul⁺⁺⁺⁺⁺ ofrece las condiciones de infraestructura y accesibilidad necesarias para llevar a cabo un trabajo intenso, permanente y constante por parte de un grupo consolidado de expertos.

- *Establecimiento de alianzas locales.*

Desde el inicio de la intervención, se forjaron alianzas con diversos grupos de trabajo pertenecientes a diferentes ejidos. El principal detonante fue el personal que trabaja en la Estación Chajul y sus familias, que residen en distintos ejidos del municipio. Esta puerta de entrada abrió el respaldo de las comunidades y, mediante el cumplimiento metódico de los

⁺⁺⁺⁺⁺ La estación de campo Chajul, ubicada al sur de la Reserva de la Biosfera Montes Azules, es la base operativa que permite llevar a cabo las líneas estratégicas que desempeña Natura y Ecosistemas Mexicanos en la región. Funge como un centro que alberga un importante número de técnicos, especialistas e investigadores que encabezan y dan seguimiento a los proyectos a lo largo del año. Es desde ahí donde se despliegan los esfuerzos de conservación de los ecosistemas y de desarrollo sustentable que la organización realiza.

compromisos adquiridos, se fue construyendo la confianza imprescindible para poner en marcha las acciones que dieron forma a la estrategia para el cambio.

Eje 2. Diagnóstico

- *Descripción del medio natural y social y su condición.*

El municipio Marqués de Comillas se ubica al sur y sureste de la Selva Lacandona dentro de una extensa red hidrográfica de la Cuenca del río Usumacinta formada por los ríos Lacantún y Chajul, así como por abundantes escurrimientos medianos y pequeños como los arroyos Lagarto y Manzanares. Presenta suelos aluviales previos al Pleistoceno, con colinas formadas por guijarros y arcilla producto del acarreo de los ríos. Aquí inicia la zona de terrenos planos que conforman la parte baja de la cuenca del Petén guatemalteco y la planicie costera del Golfo de México (De la Maza y Carabias, 2011).

La selva tropical húmeda e inundable, altamente diversa, aún se mantiene en la mitad de su territorio y es el hábitat de varias especies de mamíferos mayores en peligro de extinción como el jaguar (*Panthera onca*), tapir (*Tapirus bairdi*), ocelote (*Leopardus pardalis*), los monos araña (*Ateles geoffroyi*) y aullador (*Alouatta pigra*) y el pecarí de labios blancos (*Tayassu pecari*), entre muchos otros. Entre su flora emblemática arbórea se encuentra la caoba (*Swietenia macrophylla*), ceiba (*Ceiba pentandra*) y el ramón (*Brosimum alicastrum*). Además, es el hábitat de especies con distribución muy restringida como la guacamaya roja (*Ara macao*), el tlacuache cuatro ojos (*Metachirus nudicaudatus*), algunos géneros de mariposas como *Agrias* y *Bolvoneura* que no se encuentran en otras regiones (Carabias *et al.*, 2025).

La población del municipio se distribuye en 26 núcleos agrarios (casi todos ejidos) y en 2020 era de 12,892 personas (INEGI, 2021), en su mayoría en condiciones de pobreza y pobreza extrema que se dedican al cultivo de maíz y a la ganadería extensiva de baja productividad. Las condiciones de desigualdad son muy altas, con algunos pocos habitantes que han acaparado tierras y desarrollado una ganadería rentable.

La mitad del territorio del municipio ha sido deforestado mediante roza, tumba y quema, para actividades agropecuarias (Moreno, 2025). Se trata de un paisaje muy fragmentado, con algunos macizos extensos de vegetación original en buen estado de conservación, según los indicadores muestreados. Mediante un estudio de conectividad ecológica, utilizando cinco

especies focales emblemáticas: jaguar, ocelote, tapir, pecarí de labios blancos y mono araña se identificaron los corredores biológicos potenciales para fortalecer la conectividad ecológica (Torres ,2025). Se ha detectado que mamíferos indicadores del buen estado de conservación del hábitat (como tapir y jaguar) están usando estos ecosistemas naturales como corredores biológicos, lo cual demuestra que existe una conectividad entre la Reserva de la Biosfera Montes Azules y sus zonas de influencia (Arroyo y De la Torre, 2025).

- *Procesos que definieron la condición actual.*

El análisis de la información de las esferas social y la ambiental permitió comprender los procesos de cambio que han ocurrido en el municipio, los cuales han conducido al deterioro ambiental, a la amenaza de la biodiversidad remanente y a la condición de pobreza y marginación. Estos procesos pueden resumirse en la colonización tardía del territorio por campesinos provenientes de diferentes partes de Chiapas y de otros estados de la República mexicana sin conocimiento sobre los ecosistemas tropicales; el abandono gubernamental en la atención de las necesidades básicas de la población (falta de escuelas, clínicas y otros servicios básicos); la incomunicación que duró hasta el año 2000 cuando se construyó la carretera que conecta Comitán con Palenque; la implementación de políticas productivas basadas en actividades agropecuarias que implicaron el cambio de uso de suelo, y el tardío reconocimiento de la importancia ambiental de la región (Izquierdo-Tort *et al.*, 2024).

Eje 3. Definición de estrategias y acciones de intervención

- *Conservación de los remanentes de selva.*

Mediante los estudios mencionados en el Eje 2 se identificaron los principales remanentes de selva en el territorio del municipio. Uno de ellos corresponde a un macizo forestal compacto de cerca de 6,000 hectáreas, ubicado en los ejidos de Boca de Chajul, El Pirú, Flor de Marqués, Playón de la Gloria, Galacia y Adolfo López Mateos. Este espacio fue seleccionado como una microrregión para implementar acciones de conservación y manejo debido a la importancia ecológica, las alianzas establecidas y su accesibilidad desde la Estación Chajul. La primera actividad fue la promoción e implementación del programa Pago por Servicios Ambientales (PSA), un esquema de compensación económica otorgado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) a los propietarios de terrenos con ecosistemas nativos

esenciales. Este incentivo busca reconocer el valor de los servicios ecosistémicos que estos terrenos brindan y desincentivar su conversión a otros usos que pudieran resultar más rentables en ausencia del apoyo. Además de demostrar el valor de la selva en pie y reducir la deforestación (Moreno, 2025), el programa ha organizado a los ejidatarios y fomentado que más familias destinen tierras a la conservación (Vázquez *et al.*, 2025). NEM brinda asistencia técnica a los ejidos participantes. Iniciado en 2008 con apenas 3,000 hectáreas en cuatro ejidos, actualmente el programa abarca en la región 11 ejidos y protege más de 14,000 hectáreas, lo que equivale a casi la mitad de la cobertura forestal del municipio. La derrama económica generada mediante el PSA se ha convertido en una porción importante del ingreso de casi 650 familias, oscilando entre 31 y 75% del ingreso familiar, que se destina en su mayoría a gastos del hogar, salud y educación. Más aún, para las familias beneficiarias, el PSA representa una fuente de estabilidad económica, ya que sus otras fuentes de ingreso, asociadas a actividades agropecuarias, pueden variar fuertemente de acuerdo con el mercado. Es, además, una importante fuente de ingresos para las personas de edad avanzada. Dicha estabilidad económica también ha permitido la adquisición de otros bienes, como vehículos, mejoras en el hogar o equipo de trabajo (Izquierdo, 2014).

- *Fomento de actividades productivas con sustentabilidad ambiental, social y económica que no implican cambio de uso de suelo.*

Como se señaló anteriormente, el PSA es un programa eficiente para detener la deforestación y conservar macizos de selva, gracias al incentivo económico que conlleva. Sin embargo, es un programa sujeto a las prioridades gubernamentales de cada sexenio y a la disponibilidad de recursos fiscales, por lo que su permanencia en el largo plazo es incierta. Por esta razón, NEM promovió consolidar la conservación de los macizos de selva remanentes en la microrregión mediante la implementación de actividades productivas en estos espacios naturales, orientadas a generar empleos e ingresos adicionales para los propietarios de la tierra sin recurrir al cambio de uso de suelo. Estas actividades se centraron en el ecoturismo y en una Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA), que utiliza alas de mariposa para la elaboración de artesanías.

El ecoturismo es una actividad económica que, cuando se apega a los estrictos criterios de sustentabilidad ambiental y social, contribuye al desarrollo regional. Para lograr este

propósito es necesario garantizar que el ecoturismo se comprometa con la conservación de los ecosistemas de los cuales depende y que los beneficios de la actividad, el ingreso y los empleos, queden entre la población dueña de dichos ecosistemas. Para fomentar esta actividad de manera ordenada, NEM elaboró un programa de desarrollo ecoturístico para Marqués de Comillas con una visión de largo plazo (De la Maza *et al.*, 2015).

Hasta ahora, se han implementado cuatro proyectos ecoturísticos, a manera de empresas sociales, con características específicas, dos de ellos enfocados en el hospedaje. El primero, Canto de la Selva, Jungle Lodge, se encuentra en el ejido Galacia y ofrece un alojamiento exclusivo dentro de la selva. Cuenta con 14 cabañas de alto confort y una capacidad máxima de 28 personas, dirigido a un público de nivel adquisitivo medio a alto. El segundo, el Campamento Tamandúa, ubicado en el ejido Flor de Marqués, dispone de 10 plataformas diseñadas para acampar cómodamente, orientadas principalmente a grupos de jóvenes. Ambos sitios están equipados con todos los servicios necesarios y ofrecen atractivas actividades para los visitantes, como recorridos en senderos guiados por personal local capacitado para la observación de los ecosistemas, su flora y fauna (Ortíz *et al.*, 2025).

Los otros dos proyectos están diseñados para visitas diurnas. En el ejido El Pirú se desarrolló el centro de actividades Selvaje, un proyecto que incluye un emocionante descenso en kayak a lo largo de un arroyo que atraviesa un macizo de selva bien conservada. Además, cuenta con un sendero en la selva para recorridos en bicicleta, un sistema de puentes colgantes que se conectan con tirolesas y desembocan en un conjunto de nacientes y pozas de aguas termales sulfurosas. Por otro lado, en el ejido Adolfo López Mateos se encuentra Bellavista, un espacio que combina restaurante, museo y centro de capacitación, ofreciendo una experiencia que integra la gastronomía local con la educación y la cultura (Ortíz *et al.*, 2025). En el ejido Playón de la Gloria se estableció una UMA, La Casa del Morpho, cuyo propósito es la extracción de mariposas de la selva –bajo un programa de manejo autorizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – para ser exhibidas vivas en un encierro y de sus alas elaborar artesanías en un taller que se ofrece información sobre los lepidópteros y se convive con las artesanas (Ortíz *et al.*, 2025).

El conjunto de estas actividades productivas reforzó la visión de los ejidatarios de que conservar la selva ofrece nuevas opciones de ingresos que favorecen su economía familiar y son complementarias a sus actividades convencionales agropecuarias. Además, estas

actividades abrieron oportunidades de empleo a jóvenes y mujeres.

Para alcanzar los objetivos planteados, se deben cumplir ciertas condiciones clave. En primer lugar, es indispensable que los ejidatarios, de manera colectiva, asuman un compromiso firme con la conservación del ecosistema. Asimismo, los propietarios de las empresas deben ser también los dueños de los terrenos donde se encuentran los ecosistemas naturales, y deben encargarse directamente de la administración y operación de sus negocios, de manera que los beneficios generados beneficien a las mismas familias. Desde las primeras etapas, los proyectos deben generar ingresos adicionales, aunque sean modestos, para demostrar el valor económico de la selva e incentivar a los socios. Además, es fundamental contar con un flujo suficiente de turistas que permita alcanzar el punto de equilibrio económico, así como garantizar procesos continuos de capacitación, monitoreo y evaluación. Estos elementos, esenciales para el éxito de las empresas ecoturísticas, están claramente definidos en los estatutos de sus respectivas organizaciones productivas.

- *Fomento de la reconversión productiva hacia sistemas con mayor sustentabilidad ambiental, social y económica.*

Se impulsaron sistemas productivos con mayores criterios de sustentabilidad para incrementar y diversificar la producción, disminuir el uso del fuego y de agroquímicos, detener el desmonte, mejorar el suelo, incrementar la cobertura vegetal, recuperar algunos servicios ecosistémicos y mejorar la conectividad ecológica. Entre estos sistemas están los agroforestales basados en una combinación de cacao con especies nativas de sombra, algunas de ellas maderables.

- *Restauración de sitios estratégicos.*

La restauración de áreas estratégicas en Marqués de Comillas es esencial debido a su papel en mejorar la conectividad ecológica, reducir la fragmentación de los remanentes de selva y recuperar funciones y servicios ecosistémicos clave. Para priorizar los espacios a restaurar, se empleó el estudio de conectividad ecológica previamente mencionado (Torres, 2025). En colaboración con NEM y la Facultad de Ciencias de la UNAM, se desarrollaron principalmente dos modelos de restauración: uno enfocado en las riberas de los arroyos, reconocidas como corredores naturales por excelencia (Meli *et al.*, 2013), y otro diseñado

para terrenos agropecuarios ubicados dentro de los macizos forestales de selva (Aguilar, 2013).

La viabilidad de estas iniciativas se ha demostrado mediante la aplicación de técnicas adecuadas y el uso de especies nativas específicas para cada condición. Esto debe complementarse con asesoría técnica y la provisión de incentivos económicos suficientes, que consideren tanto el largo plazo como el costo de oportunidad asociado con revertir el uso de los terrenos. Para garantizar el éxito y la permanencia de estas restauraciones, resulta fundamental el involucramiento directo de los ejidatarios. Su convicción, capacitación y participación, tanto en la restauración de riberas como en la recuperación de terrenos degradados, son esenciales. Igualmente, los acuerdos comunitarios y el acceso a recursos financieros adecuados son pilares indispensables para alcanzar los objetivos planteados y asegurar la sostenibilidad a largo plazo.

Eje 4. Creación y fortalecimiento de condiciones que favorezcan un cambio hacia la sustentabilidad

- *Fortalecimiento de las capacidades locales*

La transformación necesaria para reducir las presiones que deterioran el medio ambiente y fomentar procesos que mejoren tanto la calidad de vida como el entorno ha implicado el desarrollo de nuevas capacidades y el fortalecimiento de las ya existentes. La creación de empresas sociales y actividades productivas no convencionales ha requerido un esfuerzo significativo de capacitación para adquirir habilidades diversas, como el manejo sustentable de recursos naturales, hotelería y ecoturismo, atención al cliente, nutrición, primeros auxilios, contabilidad y administración, entre muchas otras.

Este proceso ha involucrado a numerosos actores, muchos de los cuales carecían de experiencia en sus nuevas responsabilidades. Adaptarse a trabajar con horarios establecidos, estructuras jerárquicas y planes orientados al cumplimiento de metas y compromisos representó un cambio profundo en su vida cotidiana. La transición de una cultura campesina a una empresarial ha sido compleja, pero las empresas sociales y sus socios están logrando encontrar un equilibrio que resulta cómodo y compatible. El orgullo de ser propietarios de estas empresas ha sido un factor clave para motivar e impulsar este cambio.

La capacitación continua será fundamental para alcanzar altos estándares de calidad en la

atención al cliente, mantener su satisfacción y enfrentar con éxito los retos futuros. Este proceso, más que un medio, se ha convertido en un pilar estratégico para la sostenibilidad y el crecimiento de las empresas sociales.

- *Sensibilización hacia el valor de la naturaleza*

El intenso trabajo de NEM con la niñez y adolescencia del municipio ha sido fundamental para fomentar una nueva relación con el entorno natural. A través de la impartición de clases en las escuelas, actividades lúdico-educativas, visitas guiadas a la Estación Chajul y la organización de ferias ejidales de educación ambiental, NEM ha logrado sensibilizar a las generaciones más jóvenes sobre la importancia de conservar los ecosistemas. Estas iniciativas se complementan con proyecciones de cine ambiental, visitas al museo regional y talleres prácticos que conectan el conocimiento teórico con experiencias vivenciales en la naturaleza.

Estas acciones no solo han fortalecido la educación ambiental en la región, sino que también han transformado gradualmente la actitud de la población hacia el respeto y aprecio por la naturaleza, trascendiendo su valor meramente económico. La niñez y adolescencia, al comprender la importancia de los servicios ecosistémicos y la riqueza biológica de su entorno, se convierten en agentes de cambio dentro de sus comunidades, influyendo también en la percepción de los adultos.

Además, las actividades recreativas y educativas han generado un espacio para la reflexión colectiva, promoviendo una cultura de responsabilidad ambiental. Este enfoque integral busca consolidar una identidad comunitaria que valore la biodiversidad local como un patrimonio cultural y natural, esencial para el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Con este trabajo continuo, NEM no solo está sensibilizando, sino sembrando las bases para un cambio duradero en la relación entre la comunidad y su entorno (Sobrino *et al.*, 2025).

- *Fortalecimiento de la gobernanza ambiental*

La intervención de NEM en los ejidos, mediante la implementación de las empresas, el PSA, así como por la capacitación y la sensibilización, fue construyendo nuevas relaciones entre los miembros de cada grupo involucrado, además de establecer nuevas reglas para

organizarse, dar seguimiento, rendir cuentas y tomar decisiones.

La creación de empresas sociales dio lugar al establecimiento de organizaciones formales, adoptando diferentes figuras jurídicas según las necesidades de cada caso. Algunas se constituyeron como sociedades de producción rural, mientras que otras optaron por la modalidad de cooperativas, garantizando así una estructura adecuada para la gestión y operación de sus actividades. Las reglas que rigen las nuevas relaciones quedaron establecidas en los estatutos de dichas organizaciones. Incluso la necesidad de cumplir con sus obligaciones fiscales consolida estas organizaciones y les da formalidad. Algunas de estas buenas prácticas, como la rendición de cuentas que evitan la corrupción, la resolución de conflictos y el diálogo, repercute positivamente en la vida del ejido, particularmente en las asambleas generales.

El empoderamiento de las mujeres ha sido particularmente significativo, ya que su participación activa en las empresas y en los procesos de capacitación ha generado un impacto positivo tanto en su vida familiar como en la comunidad. A través de la adquisición de conocimientos en áreas como higiene, nutrición y primeros auxilios, han logrado mejorar la calidad de vida dentro de sus hogares. Además, su involucramiento ha fortalecido su rol en la vida colectiva del ejido, contribuyendo de manera más decidida a los procesos de toma de decisiones y al desarrollo de iniciativas comunitarias.

Los procesos descritos han fomentado una cultura de participación y toma de decisiones colectiva, con efectos directos que incentivan y retroalimentan el involucramiento, debilitando los cacicazgos. Estas características son esenciales para la vida democrática y para la construcción de un tejido social con reglas de entendimiento y respeto. Todos estos elementos son indispensables para una mejor gobernanza (Ostrom 2009), y, a su vez, para la sustentabilidad del desarrollo.

- *Construcción de confianza*

Los proyectos mencionados anteriormente no pueden prosperar si no se construyen a partir de una confianza entre las partes, atributo muy erosionado en una región en donde la corrupción y el engaño han sido parte de su origen y de su historia.

Los esfuerzos de NEM durante muchos años en el fomento de una cultura para la conservación entre la población local construyeron una plataforma muy arraigada de

confianza con las comunidades campesinas. La forma en que NEM actúa en la región ha ganado el respeto de los pobladores debido al puntal cumplimiento de compromisos y, en su caso, saber decir que no en los ámbitos que no compete a la organización o que, por sus características, resultan inviables para ser atendidos por la misma. Esto no significa que en todos los casos haya coincidencias en las visiones y objetivos, sino que hay una relación de respeto y confianza. Con el cumplimiento estricto de compromisos, en tiempo y forma, se fue construyendo una base de confianza y respeto.

- *Contribución al surgimiento de una nueva cultura*

Las actividades implementadas por NEM en el municipio empiezan a dar resultados positivos y denotan visos de un cambio de actitud lograda gracias a múltiples componentes como los descritos anteriormente: capacitación y sensibilización ambiental, organización y participación, transparencia y cumplimiento.

La visión de la población local directamente involucrada y la que vive en este entorno sobre la importancia de los ecosistemas naturales, tanto para la vida personal como colectiva, ha ido cambiando. Hace solo diez años, cuando se hablaba de cambio climático, pérdida de biodiversidad y de servicios ambientales, no provocaba ningún interés en las comunidades. La situación es diferente en la actualidad. La población percibe beneficios tangibles en el mejoramiento de su calidad de vida por conservar o restaurar el medio ambiente, ya sea por acceso al agua limpia, suelo fértil, o materias primas, o por nuevos ingresos y empleos provenientes de la conservación de los ecosistemas que benefician a sus dueños y familiares. Además, esta percepción se agudizó a raíz de las difíciles condiciones del tiempo meteorológico que se han enfrentado en los últimos años y que ha repercutido en sus cosechas, salud y bienestar. En muchos casos se ha comprendido el significado de los servicios ambientales, incluso de los problemas globales como el cambio climático, la importancia de la conservación de los ecosistemas naturales y su relación con el bienestar social.

En síntesis, el fortalecimiento de las capacidades locales, por medio de la atención constante a la población infantil y juvenil con acciones de educación ambiental y a los productores y sus familiares con la capacitación, así como mediante la construcción de nuevos espacios de participación, deliberación, análisis y organización ha detonado un proceso de gestación de

una nueva cultura de respeto a la naturaleza, de trabajo colectivo, de transparencia y rendición de cuentas, de derechos de género, de visión de largo plazo. Procesos todos incipientes, pero con claras manifestaciones que llegaron a plasmarse en el ordenamiento comunitario del territorio en la microrregión de Marqués de Comillas.

Eje 6. Escalabilidad

Las experiencias exitosas a escala local son, en sí mismas, muy importantes, no solo por sus impactos directos en quienes se benefician, sino también porque se convierten en sitios piloto, escuelas de aprendizaje y generadoras de conocimiento. No obstante, su ampliación a ámbitos más extensos es crucial para acelerar la transición hacia el desarrollo sustentable y enfrentar la emergencia ambiental. Del trabajo desarrollado en Marqués de Comillas, podemos compartir dos lecciones sobre este ámbito: la elaboración de instrumentos de planeación y el involucramiento de las instancias gubernamentales responsables.

- *Instrumentos de planeación*

NEM desarrolló, en distintas etapas y de acuerdo con las condiciones y necesidades, diversos instrumentos de planeación. Una vez consolidado el programa de PSA e iniciadas las primeras actividades ecoturísticas en la microrregión, se elaboraron, mediante procesos participativos, los *Ordenamientos Comunitarios del Territorio*. Estos sirvieron como guía para planificar el uso sustentable de sus recursos naturales, basándose en el consenso local. Además, permitieron identificar áreas para conservación, manejo sustentable y reconversión productiva, promoviendo decisiones informadas y criterios sobre el uso del territorio.

Se realizó también un estudio del potencial ecoturístico del municipio, que permitió diseñar las *Bases para el Desarrollo Ecoturístico en el municipio de Marqués de Comillas, Selva Lacandona, Chiapas*. Este conjunto de propuestas orienta el crecimiento ordenado de las actividades ecoturísticas en la región, planteando proyectos concretos que facilitarían su desarrollo.

Por otro lado, el estudio de conectividad ecológica para el municipio constituyó la base para la creación de un *Programa Municipal de Conectividad*, que promueve la creación de corredores biológicos mediante la restauración ecológica y productiva.

Asimismo, con las organizaciones productivas de las empresas sociales de los ejidos de la

microrregión, se desarrollaron procesos participativos para la elaboración de un *Plan de Adaptación al Cambio Climático*, con el objetivo de implementar acciones de adaptación basada en ecosistemas para enfrentar de manera efectiva los impactos del cambio climático. Todos estos instrumentos se consolidaron como la base para el *Plan Municipal de Desarrollo de Marqués de Comillas, Chiapas*, elaborado por NEM a solicitud del ayuntamiento, el cual fue presentado y aprobado por el Congreso Estatal de Chiapas para los periodos 2019-2021 y 2022-2024.

Estos instrumentos de planeación, cuando son elaborados de manera participativa, fortalecen las capacidades de gobernanza de las comunidades, sistematizan las experiencias y orientan las rutas a seguir. Sin embargo, debido a que los esfuerzos para un cambio de rumbo no pueden ser aislados y requieren el involucramiento de las instituciones estatales y federales —algo que no ocurre en esta región—, la implementación de estos instrumentos enfrenta importantes limitaciones.

Afortunadamente, varios de los lineamientos que se desprenden de estos instrumentos de planeación han sido adoptados a manera de reglas que se incorporan en los reglamentos internos de los ejidos. Los acuerdos intracomunitarios suelen ser más efectivos ante el abandono de las instancias gubernamentales.

- *Involucramiento y coordinación transversal de las instituciones gubernamentales responsables*

No obstante, la importancia de las experiencias hacia el desarrollo sustentable implementadas en Marqués de Comillas, los instrumentos de planeación adoptados por las instancias locales no han encontrado correspondencia ni reconocimiento en otros niveles de gobierno, lo cual es esencial para consolidar la gobernanza democrática. No basta con que los actores locales se organicen para construir un mejor futuro, es necesaria la corresponsabilidad de los actores gubernamentales responsables de las políticas públicas de desarrollo rural.

Sin embargo, la acción gubernamental no responde ni escucha las iniciativas locales, y cada institución opera de forma aislada, incluso con políticas contradictorias. Por ejemplo, mientras la CONAFOR invierte en la conservación de ecosistemas naturales a través del programa PSA, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural destina recursos económicos al fomento ganadero en los mismos terrenos, superando en más de cuatro veces los montos

asignados al PSA, y el programa Sembrando Vida entrega apoyos aún mayores, superiores en más de 24 veces. Este desequilibrio en los subsidios provoca que la conservación pierda relevancia frente a las acciones productivas que implican el cambio de uso de suelo.

Entre 2008 y 2018, tuvo lugar un significativo proceso de coordinación gubernamental interinstitucional. Desde la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, el programa Corredor Biológico Mesoamericano (CBM) impulsó una alianza estratégica entre instituciones gubernamentales (federales y estatales) y los ejidos y comunidades propietarias de los ecosistemas naturales. El objetivo fue coordinar y alinear acciones para promover la producción sustentable, la conservación y la conectividad biológica en Marqués de Comillas y otros municipios. De este proceso, en 2014, nació el Programa Especial Selva Lacandona (PESL) (Carabias *et al.*, 2015). En 2018 la coordinación pasó a la CONAFOR, y limitó su alcance a casi solo el PSA, perdiendo la integralidad de la propuesta original y la planeación transversal interinstitucional.

Es una tarea pendiente y urgente lograr el involucramiento de las instituciones gubernamentales responsables del desarrollo rural y la protección ambiental mediante un proceso de articulación y coordinación orgánico, con un programa de largo plazo que responda a los intereses y capacidades regionales.

3. Obstáculos para alcanzar la sustentabilidad del desarrollo

La experiencia con programas de visión integral, como lo fue el CBM, que involucró planeación intersecretarial y acciones coordinadas entre sectores de fomento productivo y ambiental, demostró tanto su potencial para diseñar e implementar políticas públicas efectivas como las dificultades de su inserción en el aparato gubernamental. Estas iniciativas evidenciaron la fragilidad de su permanencia, ya que suelen depender de voluntades de personas en turno y situaciones coyunturales, en lugar de ser el resultado de una política de Estado sostenida.

Por otro lado, en los últimos años han proliferado una serie de factores externos que amenazan la estabilidad de la región. En primer lugar, ha ocurrido un incremento acelerado del crimen organizado, vinculado principalmente al narcotráfico, y, en segundo lugar, al control de la migración. Ambos factores impactan la dinámica de la población, especialmente la de algunos jóvenes, quienes, ante la falta de oportunidades, incurren en actividades ilícitas.

Además, algunos actores externos han acaparado tierras para destinarlas a la ganadería. Esto no solo implica un cambio en el uso del suelo, sino también un trastocamiento de la vida interna de los ejidos. Asimismo, se ha acaparado la comercialización de productos mediante cadenas de coyotaje, restando ingresos a los productores. De no atenderse estos problemas por parte del gobierno federal y estatal, esta región estratégica podría convertirse en un foco rojo para el país en poco tiempo.

4. Logros

Las acciones llevadas a cabo por NEM en el municipio Marqués de Comillas en la búsqueda de soluciones a las amenazas en la naturaleza y bienestar de la población han alcanzado los siguientes logros:

- La deforestación se detuvo en todos aquellos polígonos intervenidos con las diferentes estrategias.
- El programa de PSA, además de detener la deforestación, contribuyó a mejorar la calidad de vida de los propietarios y catalizó mejores procesos de gobernanza.
- El ingreso de las familias aumentó, gracias a la diversificación productiva y a la consecuente generación de nuevos empleos, sobre todo entre jóvenes y mujeres.
- Adicional a los empleos directos, las empresas son demandantes de servicios como plomería, electricidad, albañilería, carpintería, entre otros oficios, que estimulan y diversifican el empleo local, antes inexistentes en los ejidos y derraman recursos económicos en la región.
- Las empresas han propiciado un proceso organizativo que repercute favorablemente en las estructuras de gobierno y las reglas internas de entendimiento de estas sociedades. Se han fortalecido y creado nuevas organizaciones, se han hecho más colectivas y transparentes las decisiones y se ha adoptado una visión de mediano y largo plazo en las empresas.
- La capacitación de los socios y empleados en el ecoturismo garantiza calidad en el servicio y, además, es útil en sus vidas cotidianas como es el caso de la preparación de alimentos, primeros auxilios y resolución de conflictos.
- Las tendencias de cacería y tala ilegal están cambiando debido a las reglas internas adoptadas en los ejidos.

- La restauración ecológica en las riberas de arroyos y ríos ha promovido el desarrollo de comunidades vegetales más estructuradas y diversas, atrayendo fauna silvestre y fortaleciendo la calidad y funcionalidad de los ecosistemas acuáticos. Además, con ello, se fortalece la conectividad entre hábitats fragmentados.
- La continuidad de la educación ambiental ha producido un cambio de actitud favorable en la niñez y juventud hacia el ecosistema en los que viven.

La perseverancia de estos programas en el largo plazo es clave para lograr cambios locales y aportar las experiencias de su escalabilidad.

5. Conclusiones

La experiencia en Marqués de Comillas demuestra que la conservación, el manejo y la restauración de los socio-ecosistemas pueden ser pilares para el desarrollo sustentable cuando se fundamentan en procesos participativos y la integración de diversas estrategias innovadoras. Desde la implementación de ordenamientos comunitarios del territorio hasta la creación de empresas sociales y proyectos ecoturísticos, estos esfuerzos han generado un impacto significativo en la protección de los recursos naturales, el fortalecimiento comunitario y la mejora de la calidad de vida de los habitantes. Estos avances han sido posibles gracias a la confianza construida con las comunidades, así como a la capacidad de las personas para adaptarse y encontrar un equilibrio entre sus actividades tradicionales y las necesidades del desarrollo sustentable.

Sin embargo, la clave para consolidar y amplificar estos logros radica en la perseverancia de estos programas a largo plazo. Mantener su continuidad permitirá no solo fortalecer los cambios locales ya alcanzados, sino también generar aprendizajes valiosos que puedan escalarse y replicarse en otras regiones con características similares. Para ello, resulta imprescindible la articulación efectiva entre actores gubernamentales, sociales y privados, mediante planes integrales que respondan a las capacidades e intereses de las comunidades. Solo a través de este compromiso sostenido será posible garantizar un modelo que armonice la conservación de los ecosistemas con el bienestar social, sirviendo como ejemplo de desarrollo sustentable para otras regiones del país y del mundo.

Referencias

- Aguilar-Fernández, R. (2013). Análisis de los componentes socioambientales para la restauración de claros antropogénicos en la selva tropical húmeda, Marqués de Comillas, Chiapas. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arroyo, P. y de la Torre, A. (2025). Monitoreo de mamíferos terrestres. En: Carabias J., *et al.* (coords.). *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Ashoka (2025). Ashoka Trust for Research in Ecology and the Environment. Disponible en: <https://www.atree.org/>
- Bawa, K.S., Rai, N.D. y Sodhi, N.S. (2011). Rights, governance, and conservation of biological diversity. *Conservation Biology*, 25(3), 639–641. <https://doi.org/10.1111/J.1523-1739.2010.01640.X>
- Berkes, F. y Folke, C. (1998). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. In: Berkes, F., Folke, C., y Colding, J. (eds.), *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. New York: Cambridge University Press, pp. 27.
- Campbell, B.M., Sayer, J.A. y Walker, B. (2010). Navigating trade-offs: working for conservation and development outcomes. *Ecology and Society*, 15(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03380-150216>
- Carabias, J., de la Maza, J. y Cadena, R. (coords.). (2015). *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- Carabias, J., de la Maza, J., Obregón, O. y Ramírez, X. (2015). Hacia la gestión integrada: limitantes y avances. En: Carabias, J., de la Maza, J. y Cadena, R. (coords.), *Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano.
- DeFries, R., Agerwala, M., Baquie, S., Choksi, P., Khanwilkar, S., Mondal, P., Nagendra, H. y Uperlainen, J. (2022). Improved household living standards can restore dry tropical forest. *Biotropica*, 54(6), 1480-1490. <https://doi.org/10.1111/btp.12978>
- De la Maza, J., Carabias, J., Ruiz, L., *et al.* 2015. *Ecoturismo para la conservación. Bases para el Desarrollo Ecoturístico en el municipio de Marqués de Comillas, Selva Lacandona, Chiapas*. Natura y Ecosistemas Mexicanos.
- De la Maza, J. y Carabias, J. (2011). Usumacinta: bases para una política de sustentabilidad

- ambiental. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Natura y Ecosistemas Mexicanos del Agua A.C.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, 1(1), 66-01.
- INEGI (2021). Resultados de Censo de Población y Vivienda 2020. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#tabulados>
- Izquierdo-Tort, S. (2014). *Payments for environmental services in Marqués de Comillas, Lacandona Rainforest: Impact and implications on human well-being and the environment*. Doctoral dissertation, MPhil Thesis. International Development, Oxford, UK: University of Oxford.
- Izquierdo-Tort, S., Carabias, J., López, A., Meli, P. y Corbera, E. (2024). Development and conservation in the tropical forest frontier: a 50-year analysis of policy evolution and interplay in Marqués de Comillas, Chiapas, Mexico. *Oxford Development Studies*, 52(4), 429-448. <https://doi.org/10.1080/13600818.2024.2424224>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Taylor, W.W., Alberti, M., Deadman, P., Redman, C., Pell, A., Folke, C., Ouyang, Z. y Lubchenco, J. (2007). Coupled human and natural systems: the evolution and applications of an integrated framework. *Ambio*, 50, 1778-1783. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01488-5>
- Meli, P., Rey-Benayas, J.M., Martínez-Ramos, M. y Carabias, J. (2015). Effects of grass clearing and soil tilling on establishment of planted tree seedlings in tropical riparian pastures. *New Forests*, 46(4), 507-525. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9479-3>
- Morales, F. (2017). El territorio, sus escalas y niveles. *Encuentros 2050*, 9, 30–32.
- Moreno, A. (2025). Cambios en la cobertura forestal en el municipio Marqués de Comillas. En: Carabias J., et al. *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Newell, B., Crumley, C.L., Hassan, N., Lambin, E.F., Pahl-Wostl, C., Underdal, A., Wasson, R. (2005). A conceptual template for integrative human-environment research. *Global Environmental Change*, 15(4), 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.06.003>
- ONU. (2015). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. ONU. Disponible em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

- Ortiz, R., Valadez, V. y Ortiz, F. (2015). El Ecoturismo como estrategia de conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona. En: Carabias, J., *et al.* (coords.). 2025. *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological. *Science*, 325(5939), 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- PNUMA (2021). Hacer las paces con la naturaleza: plan científico para hacer frente a la emergencia del clima, la biodiversidad y la contaminación. Nairobi. PNUMA. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>
- Rai, N.D. y Bawa, K.S. (2013). Inserting politics and history in conservation. *Conservation biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 27(2), 425-428. <https://doi.org/10.1111/cobi.12026>
- Rockström, J. y Gaffney, O. (2021). *Breaking Boundaries. The Science for Our Planet*. London: DK.
- Sobrino, J., Rodríguez, S., Rodríguez, L. y Campos, A. (2025). Educar para conservar; conservar para un futuro sustentable. En: Carabias J., *et al.* (coords.). 2025. *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Torres, N. 2025. Conectividad ecológica en Marqués de Comillas. En: Carabias J., *et al.* (coords.). 2025. *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Vázquez, P., Izquierdo-Tort, S. y Carabias, J. (2025). El pago por servicios ambientales como un instrumento de conservación en Marqués de Comillas: logros y oportunidades tras 15 años de implementación. En: Carabias J., *et al.* (coords.), *Tejiendo un futuro sustentable: conservación y bienestar en la Selva Lacandona*. Natura y Ecosistemas Mexicano (en edición).
- Wilson, E. (1992). *The Diversity of Life*. Belknap Press
- World Bank (2024). Our World in Data. Disponible en: <https://ourworldindata.org/grapher/total-population-living-in-extreme-poverty-by-world-region>. Actualizado en octubre 2024.

Capítulo 9. Sustentabilidad alimentaria rural frente al cambio climático: estrategias agroecológicas para el manejo del maíz

Manuel Jesús Cach Pérez^{*****}

María Guadalupe Carrillo Galván^{**}

Resumen

El cambio climático global representa una seria amenaza para la sustentabilidad alimentaria, particularmente en el ámbito rural, donde los productores carecen de medios económicos para generar alternativas que ayuden a reducir sus efectos negativos sobre los cultivos. El manejo del microclima a través de prácticas agrícolas podría ser una alternativa en el cultivo del maíz, por ejemplo, ya que no requiere de inversión adicional a lo que los productores han realizado por miles de años (como la milpa) pero que en años recientes han reducido su uso, o de alternativas cuyas ventajas no han tenido mucha difusión, como el cultivo de maíz en sistemas agroforestales. En el presente trabajo se compara la variación microclimática y desempeño fisiológico de maíz nativo en cuatro sitios edáfica y climáticamente contrastantes del sur-sureste de México bajo sistemas de monocultivo, milpa y sistemas agroforestales con aplicación de cobertura al suelo. La milpa demostró una amplia ventaja en la retención de agua en suelo y reducción de temperatura del mismo en comparación con el monocultivo, lo mismo que la aplicación de cobertura en los sistemas agroforestales. Lo anterior se reflejó en un mejor desempeño fisiológico del maíz, lo que podría traducirse en una mayor productividad. Se realza la importancia del uso de maíces nativos, así como la práctica de la milpa como herramientas que contribuyen a la conservación de recursos como el agua y tienen un aporte significativo a la dieta de los productores.

Palabras clave: *milpa, maíz nativo, sistema agroforestal, microclima.*

^{*****} Doctor en Ciencias Biológicas. El Colegio de la Frontera Sur unidad Villahermosa, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4972-0458>

^{**} Doctora en Ciencias. Centro de Estudios e Investigación en Biocultura, Agroecología, Ambiente y Salud – CIAD – CONAHCYT.

Agricultura y domesticación de plantas

Mesoamérica, junto con el Cercano Oriente y Norte de China, es uno de los centros más antiguos de origen de la agricultura y domesticación de plantas (Harlan, 1971). Como región geográfica abarca la mitad meridional de México, Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua y la porción noroccidental de Costa Rica, sin embargo, Matos-Moctezuma (1994) menciona que ha sido una región dinámica en el tiempo por lo que sus fronteras variaron a lo largo de la historia. Es una de las regiones con alta diversidad biocultural, cuyo rasgo distintivo es el agroecosistema llamado “milpa” y un complejo sistema alimentario basado en él. En esta región aún se investiga dónde se originó la agricultura y la domesticación de los elementos principales que conforman la milpa: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita argyrosperma* K. Koch).

La domesticación de plantas se define como un proceso evolutivo en el que la fuerza evolutiva más importante es la selección humana, acorde a su uso y manejo, que como resultado genera la fijación de un grupo de alelos (en las poblaciones involucradas) que les confieren fenotipos favorables tanto al consumo humano como al cultivo (Gepts, 2004). En este sentido, los elementos fundamentales del agroecosistema milpa tienen un alto grado de domesticación, es decir que su fenotipo es totalmente diferente al de sus respectivas poblaciones silvestres. Al conjunto de diferencias morfológicas, fisiológicas y genéticas entre las poblaciones silvestres y domesticadas se le conoce como síndrome de domesticación (Hammer, 1984; Gepts, 2004; Zizumbo y Colunga, 2008).

Aunque algunas plantas estén completamente domesticadas, es decir, que cuenten con una menor adecuación y nula dispersión en condiciones naturales y, por lo tanto, su persistencia dependa del manejo y la selección humana (como es el caso del maíz, entre otras plantas), el proceso evolutivo bajo domesticación aún continúa, ya que su diversificación depende de las preferencias culturales en cada región geográfica, las cuales son distintas y dinámicas en el tiempo (Harlan, 1975; Colunga-GarcíaMarín y Zizumbo-Villarreal, 1993; Zohary y Hopf, 1993; Da Fonseca *et al.*, 2015;).

El proceso de domesticación, el ejemplo del maíz en México

El maíz se originó a través del manejo y selección del Teocintle; si bien existen teorías sobre una domesticación estratificada del maíz, Mesoamérica y, en particular México, es considerado como su centro de origen (Kato *et al.*, 2009; Kistler *et al.*, 2018, 2020; Costa *et al.*, 2024). A lo que comúnmente se le llama Teocintle, es un conjunto variable de pastos pertenecientes al menos a ocho especies diferentes dentro del género *Zea*, cuya distribución va desde Chihuahua, en México, hasta Costa Rica, aunque la mayor diversidad se encuentra en México, donde la mayor distribución se encuentra en el centro y occidente del país, así como algunas regiones del sur del país (Sánchez y Ruiz, 1996; Wilkes, 2004; CONABIO, 2011; Rivera-Rodríguez *et al.*, 2019).

A través de su domesticación, cuyo inicio fue por lo menos hace 9,000 años, hoy en día en México se encuentran 64 razas de maíz, de las cuales 59 son consideradas como nativas (CONABIO, 2020; Rosado & Serrano, 2021), que se distribuyen y utilizan a lo largo del país, desde los cero hasta los 3,400 metros sobre el nivel del mar, y por tanto, bajo un gran contraste de condiciones socio-culturales y ambientales (altitud, temperatura, precipitación, humedad), edáficas (profundidad del suelo, presencia de pedregosidad, inclinación, etc.; CONABIO, 2015, 2020; Figura 9.1).

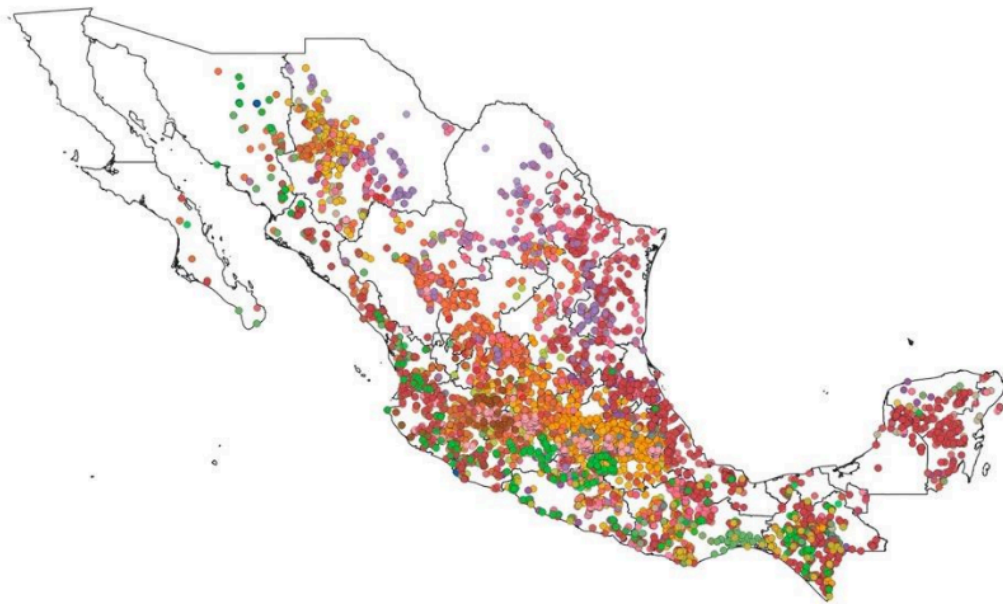


Figura 9.1. Distribución puntual de las 64 razas de maíces en México. Elaborado a partir de datos obtenidos del Proyecto Global de Maíces Nativos (CONABIO, 2015).

En este sentido, es importante señalar que cada raza y variedad de maíz se encuentra adaptada a las condiciones locales en las que se cultiva, por lo que pueden presentar una alta resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a la sequía, al frío o al calor a suelos pobres en nutrientes, y pueden presentar un mejor sabor y bajo condiciones de almacenamiento suelen durar más tiempo que las variedades mejoradas (Brush, 1991). Por ejemplo, los maíces que se cultivan en el estado de Yucatán están adaptados, en su mayoría, a una precipitación relativamente baja y suelos poco profundos con presencia de alta pedregosidad, mientras que los de Tabasco pueden estar adaptados a suelos más profundos y ser tolerantes a inundaciones, u otros como olotón que están adaptados a crecer en el bosque mesófilo de montaña (Mares-Guerrero *et al.*, 2024; Mera y Mapes, 2009; Peraza-Villarreal *et al.*, 2019; Pérez-Hernández *et al.*, 2021). Sin embargo, dado su alta importancia sociocultural en México, el manejo humano actual promueve una gran movilidad del maíz de una región geográfica a otra, lo que puede promover el proceso de diversificación que favorece la variación genética, y que viene ocurriendo desde el inicio de su manejo y domesticación (Kato *et al.*, 2009).

El cultivo del maíz en México y Mesoamérica: La milpa

Actualmente el maíz representa la base de la alimentación mexicana; anualmente el consumo per cápita es de 196.4 kilogramos al año (tan sólo de maíz blanco), principalmente en forma de tortillas, pero también a través de diversos platillos que se guisan en todo el país (SAGARPA, 2017). Acorde a lo anterior, el maíz blanco es el cultivo anual que tiene la mayor producción a cielo abierto en México (21.992 millones de ton en 6.07 millones de ha sembradas) cuyo destino es la alimentación humana, mientras que el maíz amarillo (utilizado para la alimentación animal) ocupa el tercer puesto con 3.47 millones de ton en 710,273 ha (INEGI, 2022).

El maíz en México es cultivado bajo una gran diversidad de sistemas de manejo que varían ampliamente de una región a otra, influenciados principalmente por las características climáticas, topográficas y bioculturales de una región geográfica en particular (Aguilar *et al.*,

2003; Mariaca, 2011; González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014; Mateos-Maces *et al.*, 2016). Sin embargo, la agricultura tradicional empleada por los grupos étnicos es uno de los mecanismos más utilizados en el cultivo del maíz, lo que contribuye a resguardar la riqueza del germoplasma presente en el país (Mera y Mapes, 2009).

La agricultura tradicional se refiere a las diversas actividades y procesos que se han practicado, mejorado y adaptado durante generaciones en las comunidades, y que han desembocado en los actuales sistemas de producción en ellas (Tuxill y Nabhan, 2001). Este tipo de prácticas productivas depende de la lluvia como fuente de agua para los cultivos (Kato *et al.*, 2009). En este sentido, una de las prácticas más empleadas por los pequeños productores de maíz en México es el sistema milpa (Aguilar *et al.*, 2003).

La milpa es un agroecosistema mesoamericano cuya práctica inicio muy probablemente 5,000 años atrás. Es un sistema cultural y tecnológico altamente dinámico que se basa en un policultivo donde se establece el maíz en conjunto con otras especies, generalmente frijol (hasta cinco especies diferentes) y calabaza (hasta cuatro especies diferentes), aunque dependiendo de la región geográfica, se pueden encontrar distintas leguminosas, tubérculos, flores y otras especies vegetales, cuyos principales usos son como alimenticias y medicinales (Aguilar *et al.*, 2003; CIMMYT, 2020).

La milpa pudo haberse originado en el occidente de México donde los parientes silvestres del maíz, frijol y calabaza están en contacto de manera natural, y donde los humanos pudieron haber empezado a manejarlos (Zizumbo-Villarreal *et al.*, 2012), extendiendo esta práctica al resto de Mesoamérica. Este sistema de manejo es de gran relevancia histórico-cultural en el desarrollo de los pueblos mesoamericanos ya que fue motor de la dieta de los habitantes de esta región; Zizumbo-Villarreal *et al.* (2016) mencionan que el sistema alimentario precolombino pudo estar conformada alrededor de 100 platillos elaborados a partir de 75 especies de plantas silvestres, 19 domesticadas o cultivadas nativas, 12 domesticadas que pudieron haber sido introducidas de otras regiones y seis hongos, además 19 especies de animales silvestres y cuatro domesticados, a lo cual denominaron la dieta mesoamericana y siguen estando presentes como principal alimento de campesinos rurales (Zizumbo-Villarreal *et al.*, 2012).

Dada la composición de la milpa (principalmente compuesta por maíz, frijol y calabaza), se propicia un adecuado uso de recursos como el agua, luz solar y nutrientes debido a la

estructura de estratos múltiples que se conforman. En un primer estrato se encuentra la planta de maíz que funge como sostén para el frijol; en el estrato medio, el frijol produce más nódulos de raíces por planta en comparación a un cultivo en solitario, lo que podría incrementar la fijación de nitrógeno que, a su vez, puede ser aprovechado por el maíz y la calabaza. Finalmente, en un tercer estrato se encuentra la calabaza cuyas hojas anchas y gruesas, aunado a su crecimiento horizontal, forman una capa que cubre el suelo, lo que puede reducir el establecimiento de malezas e incrementar la retención de agua en el suelo (Gliessman, 1983; Altieri, 2018; Pérez-Hernández *et al.*, 2021; Mares-Guerrero *et al.*, 2024). Si bien existe una gran diversidad de formas de integrar la milpa, en la mayoría de los casos se utilizan maíces nativos, en donde en más del 70% de los casos se usan semillas del mismo agricultor (Mera y Mapes, 2009), algo similar a lo que ocurre con el frijol y la calabaza. Es justo este manejo el que resguarda, promueve y enriquece la gran agrobiodiversidad asociada a la milpa (Mariaca, 2011).

Si bien la milpa es una estrategia milenaria para el cultivo del maíz y otros productos alimenticios (principalmente nativos) con alto valor biocultural y, que además puede ofrecer grandes ventajas socio-ambientales, su práctica se ha visto amenazada debido a diversos factores como un decremento en su rendimiento (que conlleva pérdida de semillas nativas), la dependencia de maíz externo a este sistema de cultivo, el incremento en los costos de producción, la variabilidad climática, falta de incentivos económicos para incrementar la producción y cadenas de comercialización, la carencia de organización, infraestructura, el bajo precio de los maíces nativos, y la cada vez menor mano de obra necesaria para el trabajo, entre otros (López-Torres *et al.*, 2016; INEGI, 2022). Lo anterior podrían derivar en un riesgo para cubrir las necesidades alimentarias de quienes la practican y, por tanto, en la sustentabilidad alimentaria en un amplio sector de la población, particularmente en el ámbito rural.

Efecto del cambio climático sobre plantas cultivadas y sus amenazas a la sustentabilidad alimentaria

Se proyecta que el cambio climático afecte negativamente la seguridad alimentaria al impactar de manera negativa sus cuatro pilares (disponibilidad, acceso, utilización y

estabilidad), lo anterior derivado del incremento de la temperatura a nivel global, cambios en los patrones de precipitación y un incremento en la frecuencia de eventos extremos como sequías y huracanes, por mencionar algunos ejemplos (Mbow *et al.*, 2019). En este contexto, los productores y consumidores de menores ingresos serán los más afectados por carecer de los recursos para invertir en estrategias de adaptación y diversificación (Bailey *et al.*, 2015; FAO, 2018; Mbow *et al.*, 2019).

El calentamiento global observado entre 1900 y 2015 (hasta 1.68 °C) ha provocado mayor frecuencia, intensidad y duración de diversos fenómenos como olas de calor, sequías en algunas regiones de mundo, mientras en otras ha incrementado las precipitaciones fuertes. Aunado al incremento de la temperatura, la variabilidad que genera en los patrones de precipitación ha provocado una reducción en el rendimiento de cultivos como maíz y trigo en latitudes bajas del planeta (Mall *et al.*, 2017; Siebert *et al.*, 2017; Masson-Delmotte *et al.*, 2022).

En México, por ejemplo, durante el año 2023 la mayor parte del territorio nacional registró condiciones de sequía que fueron de moderada a excepcional (Figura 9.2), derivado de una fuerte anomalía en la precipitación, es decir, se registraron variaciones en el inicio y duración de la temporada de lluvias, lo que derivó en que en la mayor parte del país se registrara menos precipitación acumulada, respecto a los registros de los últimos 30 años (Figura 9.2; Servicio Meteorológico Nacional, 2024). Estas anomalías climáticas conllevan una fuerte alteración en la producción de alimentos: tan solo en el año 2022, 1,821,456 ha no pudieron ser sembradas, entre otras cosas, por un clima adverso para la agricultura (INEGI, 2022).

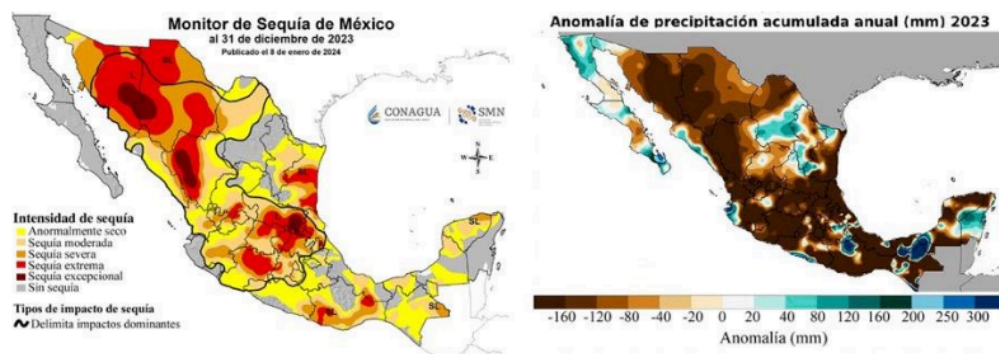


Figura 9.2. Monitor de sequía en al 31 de diciembre de 2023 y Anomalía de precipitación acumulada anual (mm) para el año 2023 en México. Modificado de Servicio Meteorológico Nacional (2024).

Si se considera que el 35% de los alimentos a nivel global y hasta el 70% en países de ingreso medio y bajo provienen de pequeños productores carentes de recursos técnicos y económicos para hacer frentes a estas variaciones, se podrá dimensionar la amenaza a la seguridad alimentaria global. En el caso de México, el 54% de la producción de alimentos depende de los pequeños productores y, para el 2022, el 74% de superficie agrícola del país era de temporal (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020; IFAD, 2021; INEGI, 2022), lo que representa un alto riesgo para la producción de alimentos derivado de la alta variabilidad climática registrada los últimos años.

Como cualquier otro grupo de plantas, las especies cultivadas establecen interacciones bióticas y abióticas dentro del área de cultivo, cuyo resultado son diversas respuestas a nivel fisiológico, morfológico, bioquímico e incluso molecular. Por tanto, cualquier variación en alguno de los elementos bióticos o abióticos que rodean a las plantas, provocará en ellas diversas respuestas como una forma de aclimatarse a las nuevas condiciones, siempre dentro del umbral de tolerancia de dichas plantas (Qaderi y Reid, 2009; Cach-Pérez *et al.*, 2021). Por lo tanto, cambios continuos en las condiciones bióticas y abióticas dentro de las áreas de cultivo son de esperarse, ya que ellas dependerán no sólo de las condiciones ambientales y su variabilidad, sino también del tipo de cultivo y de las estrategias de manejo utilizadas por los productores, lo que en conjunto determina la dinámica ecológica que se establece dentro de dichas áreas (Hoy, 2015).

De manera general, la reducción en el rendimiento de los cultivos a consecuencia de fenómenos derivados de la variación climática (patrones de precipitación, incremento de temperatura, sequía, inundaciones, entre otros) e incremento en la concentración de CO₂ es consecuencia del estrés fisiológico que las plantas presentan ante estos fenómenos (Singh, 2009; Jarma-Orozco *et al.*, 2012; Mall *et al.*, 2017).

Si bien la respuesta de las plantas depende del tipo de cultivo y región geográfica (IPCC, 2007), en general se ha observado que la temperatura influye sobre la germinación de semillas, crecimiento vegetativo, floración y fructificación. Temperaturas elevadas reducen

la fotosíntesis, incrementan la transpiración y respiración de las plantas, desestabilizan la regulación hormonal y los metabolitos secundarios, favorecen las quemaduras solares en distintas estructuras de las plantas, provoca senescencia prematura de las hojas y reduce el crecimiento de brotes y raíces (Almeida y Valle, 2007; Sage y Kubien, 2007; Ledesma *et al.*, 2008; Restrepo-Díaz *et al.*, 2010; Jarma-Orozco *et al.*, 2012). Cada cultivo tiene una temperatura óptima para su desempeño, en el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) por ejemplo, esta temperatura es alrededor de 30°C, una temperatura encima de los 34°C provoca una reducción en la formación de flores y, por tanto, de frutos, además de que temperaturas altas también afectan la germinación del polen, viabilidad de los óvulos, así como la posición de estigma y del estilo floral (Foolad, 2005; Wahid *et al.*, 2007; Restrepo-Díaz *et al.*, 2010). En otras plantas como el apio, lechuga y espinacas puede haber una reducción en la germinación de semillas si la temperatura sobrepasa los 35°C (Nascimento *et al.*, 2000; Restrepo-Díaz *et al.*, 2010).

El agua es fundamental para cualquier organismo vivo, en el caso de las plantas el estrés hídrico se produce cuando no hay agua suficiente en el suelo para sostener el crecimiento vegetal o para reponer el agua utilizada por las plantas en diferentes procesos (Larcher, 2003). El estrés hídrico puede provocar un descenso en el contenido relativo de agua en las hojas, lo que conlleva un cierre de los estomas a fin de evitar la pérdida de agua por transpiración pero, a la vez, reduce la cantidad de CO₂ que se asimila a través de la fotosíntesis reduciendo la cantidad de azúcares que se forman y, por tanto, la productividad de los cultivos (Marsal y Girona, 1997; Lombardini, 2006). Un efecto combinado de estrés hídrico y altas temperaturas puede producir un incremento en el déficit de presión de vapor de agua atmosférico (incrementando la demanda evaporativa), así como una reducción en la disponibilidad de agua en el suelo, lo que puede producir daños en el aparato fotosintético de las plantas y reducir su tasa fotosintética (Oliver *et al.*, 2010; Sunkar, 2010).

En este sentido, el Maíz es una planta con una ruta fotosintética C₄, por lo que es muy demandante de agua, y cuyas necesidades de disponibilidad de este recurso varían a lo largo de su desarrollo: el periodo de floración puede considerarse el más importante porque de la disponibilidad de agua en este periodo depende el desarrollo, la polinización y el llenado de los granos y por ende, la productividad del cultivo (Reyes, 1990). A pesar de lo anterior, las plantas C₄ tienen una mayor eficiencia fotosintética que las plantas C₃, por lo que crecen más

rápido y funcionan eficazmente a intensidades lumínicas más altas; además son entre 50% y 300% más eficientes en el uso del agua y poseen mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, lo que les permite una buena adaptación a zonas tropicales en donde la evapotranspiración y temperatura pueden ser altas (Brown, 1978; Sage y Percy, 1987; Sage y Stata, 2015; Wasilewska-Dębowska *et al.*, 2022).

Alternativas de frente al cambio climático en el ambiente rural

Una alternativa que puede contribuir a reducir los posibles efectos del cambio climático en la agricultura rural es el manejo del microclima (Cach-Pérez *et al.*, 2021). El microclima puede ser definido como las condiciones climáticas particulares medidas alrededor de un organismo e incluye factores como la temperatura y humedad del aire, luz, formación de rocío, precipitación temperatura y disponibilidad de agua en el suelo (M. Jones, 1985; Mislan y Helmuth, 2008). En el caso de las plantas, el microclima se refiere al espacio ubicado a centímetros o metros alrededor de ella, y que juega un papel fundamental en su crecimiento, reproducción, productividad, e incluso en su mortalidad (Naiman *et al.*, 2005).

El manejo agrícola puede determinar las condiciones microclimáticas en el que las plantas cultivadas se establecen; por ejemplo, un sistema agroforestal de cacao con un dosel muy denso puede incrementar la humedad relativa del aire, reducir la temperatura del mismo, así como la velocidad del viento en comparación con un dosel más abierto, o el caso específico del maíz, un monocultivo puede generar un microclima con temperaturas del aire y del suelo más altas y menor contenido de agua en suelo que una milpa (Jiménez-Pérez *et al.*, 2019; Cach-Pérez *et al.*, 2021; Pérez-Hernández *et al.*, 2021; Mares-Guerrero *et al.*, 2024).

Como se ha comentado anteriormente, si bien la milpa es una práctica milenaria en Mesoamérica, diversas presiones han originado que su práctica se reduzca, aun cuando puede ser una excelente alternativa para economizar recursos como el agua, particularmente en regiones tropicales en donde el cambio climático provocará alta variabilidad en la disponibilidad de este recurso a través de la lluvia, lo que puede ser de gran relevancia en la agricultura rural.

En este sentido, el uso de sistemas agroforestales para el cultivo de maíz ha sido poco explorado, particularmente porque la mayoría de razas de maíz requieren de grandes

cantidades de luz solar para su crecimiento (establecimiento totalmente expuestas a la luz solar), por lo que en muchas ocasiones se ha considerado que el establecimiento de árboles dentro de la zona de cultivo puede competir por este recurso, e impedir el correcto desarrollo del maíz. Sin embargo, la elección de especies arbóreas adecuadas, así como un correcto manejo del dosel puede ser de amplio beneficio para los productores rurales.

Por ejemplo, Xiu-Canché *et al.* (2023) establecieron dos especies arbóreas de la familia de las leguminosas (*Guazuma ulmifolia* Lam. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) en un sistema agroforestal para el cultivo del maíz. Estas especies fueron elegidas porque pueden contribuir a la fijación de nitrógenos al suelo, su follaje puede ser utilizado como alimento para ganado menor, y también tiene una rápida descomposición en el suelo, por lo que puede ser una fuente importante de nutrientes para el mismo. Los autores demostraron que manteniendo la altura de los árboles controlada mediante podas (no más de 1.5 m), no había competencia por luz entre estos y el maíz, además de que la aplicación del follaje como cobertura, contribuía al control de malezas.

Por tanto, es fundamental generar información que permita la revalorización de estas prácticas de manejo para el cultivo del maíz en función del rol que pueden jugar como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en el ambiente rural, donde también pueden contribuir a la generación de una dieta balanceada, tanto de los productos obtenidos de la milpa, como de la cría de animales de traspatio que pueden ser alimentados parcialmente con especies arbóreas establecidas en sistemas agroforestales para el cultivo del maíz.

Revalorización de prácticas tradicionales: la milpa y sistemas agroforestales de maíz.

Cómo una forma de revalorizar la práctica de la milpa, fomentar el uso de sistemas agroforestales para el cultivo del maíz y aportar al conocimiento sobre las ventajas que ambos sistemas pueden ofrecer para reducir los posibles impactos del cambio climático en la agricultura rural y sustentabilidad alimentaria en los pequeños productores, se analizan tres trabajos que, entre otras cosas, comparan el funcionamiento fisiológico y productivo del maíz bajo condiciones climáticas y edáficas contrastantes en cuatro sitios del sur-sureste de

México (Figura 9.3) como consecuencia de la variación microclimáticas producto del sistema de manejo utilizado para su cultivo. Estos trabajos son:

- 1) el primer caso se desarrolló en Tucta, Nacajuca, Tabasco: sitio que cuenta con 1,730 mm de precipitación total anual (PTA), 0% de pedregosidad y una profundidad del suelo de más de 45 cm (Pérez-Hernández *et al.*, 2021).
- 2) El segundo caso se desarrolló en Mama, Yucatán que presenta 1,100 mm de PTA, 5% de pedregosidad y 37.5 cm de profundidad en el sitio de estudio; y Peto, Yucatán con 1,230 mm de PTA, 60% de pedregosidad y profundidad de 16.6 cm en el sitio de trabajo (Mares-Guerrero *et al.*, 2024),
- 3) El tercer trabajo se desarrolló en Xmatkuil, Mérida, Yucatán, que cuenta con 900 mm de PTA, 45% de pedregosidad y 15 cm de profundidad (Xiu-Canché *et al.*, 2023).

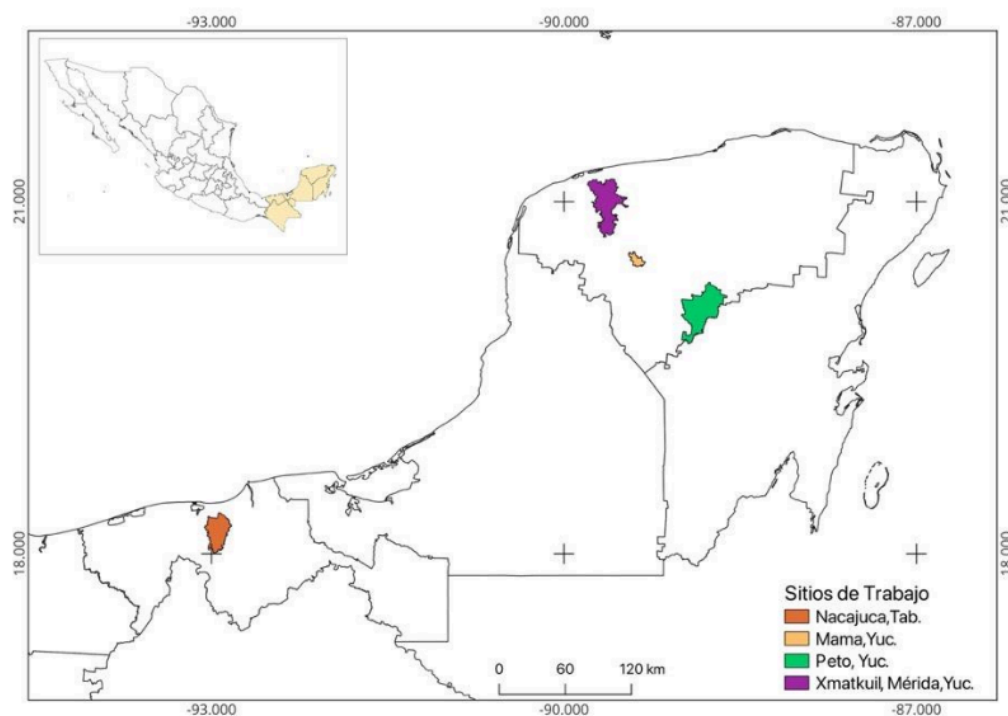


Figura 9.3. Sitios del sur-sureste de México en los que se desarrollaron trabajos que comparan la modificación microclimática en el sitio de cultivo y desempeño fisiológico del maíz bajo un sistema en monocultivo vs milpa (Nacajuca, Mama y Peto) y en un sistema agroforestal (Xmatkuil). El caso de Xmatkuil, se señala el municipio de Mérida, al que

pertenece la localidad. Para más detalles consultar (Pérez-Hernández *et al.*, 2021; Xiu-Canché *et al.*, 2023; Mares-Guerrero *et al.*, 2024).

En todos los casos se utilizaron maíces nativos (Tuxpeño en el caso de Nacajuca, Tabasco, y Nal Xoy blanco para los tres sitios de Yucatán) a una densidad de 45,000 plantas por ha. En los dos primeros trabajos (Tabasco, Peto y Mama) se establecieron cuadrantes de 10 x 10 m², en los que se sembró maíz en monocultivo y maíz en combinación con frijol y calabaza (variedades utilizadas por los productores locales en todos los casos), por triplicado para cada tratamiento y sitio experimental. El cultivo fue de temporal, sin aplicación de agroquímicos, y con control manual de arvenses en lo que la calabaza se desarrolló; el manejo fue acorde a las prácticas tradicionales locales y se tuvo apoyo de los productores.

El trabajo en Xmatkuil se desarrolló en un sistema agroforestal en callejón compuesto por individuos adultos de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit y *Guazuma ulmifolia* Lam, especies cuya biomasa foliar es aprovechada para la alimentación de ganado menor, y que se ha demostrado que puede descomponerse rápidamente en el suelo, aportando nutrientes al mismo (Petit-Aldana *et al.*, 2012). Estos árboles se mantuvieron a una altura no mayor a 1.5 metros desde su establecimiento, a través de podas regulares. Entre filas de árboles se establecieron plantas de maíz en monocultivo correspondiente a la misma variedad que en Peto y Mama, y a la misma densidad que en los trabajos anteriores. La materia orgánica obtenida de las podas de las especies arbóreas se aplicó al suelo como cobertura, a fin de controlar el establecimiento de malezas, contribuir a la retención de agua y aportar nutrientes al suelo; se estableció un control sin aplicación de dicha cobertura (Xiu-Canché *et al.*, 2023). En todos los casos se midió el microclima (temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y contenido volumétrico de agua en suelo, formación de rocío, así como el déficit de presión de vapor de agua atmosférico), y parámetros fisiológicos (Tabla 9.1) que se relacionan con la productividad del maíz. Para efectos de este trabajo, se presentan los resultados obtenidos cuando las plantas de frijol y calabaza se encontraban bien desarrollados, y el maíz empezaba la formación de mazorcas (día 99 y día 75 contados a partir de la siembra del maíz para Nacajuca, Tabasco y todos los sitios de Yucatán, respectivamente. Para más detalles del diseño experimental consultar (Pérez-Hernández *et al.*, 2021; Xiu-Canché *et al.*, 2023; Mares-Guerrero *et al.*, 2024).

Tabla 9.1. Parámetros fisiológicos que fueron incluidos en el capítulo, así como sus siglas, definición y uso.

Parámetro	Siglas	Definición y uso
Asimilación de CO ₂	A	Indica la cantidad de CO ₂ que la hoja asimila al abrir los estomas durante el proceso de fotosíntesis. A mayor asimilación, se asumirá que habrá mayor cantidad de azúcares producto de la fotosíntesis, y por tanto mayor producción (en este trabajo).
Transpiración	E	Indica la cantidad de agua que pierde la hoja en forma de vapor al abrir los estomas durante el proceso de fotosíntesis. Este parámetro se relaciona con la cantidad de agua en suelo (a mayor disponibilidad, se esperaría mayor transpiración) y con el DPV (a mayor DPV, mayor transpiración).
Eficiencia en el uso del agua	EUA	Indica la cantidad de moléculas de agua que se pierden por cada molécula de CO ₂ absorbida durante el intercambio de gases en la hoja. A menor pérdida de agua por ganancia de CO ₂ , mayor será la eficiencia.
Concentración de clorofila foliar	CC	Indica la concentración de clorofila en la hoja. A mayor concentración, mayor capacidad fotosintética.
Contenido relativo de agua foliar	CRA	Es el porcentaje de agua que se puede encontrar en una hoja, respecto al total que podría llegar a tener. Es un indicativo del estado hídrico de las plantas.
Potencial hídrico foliar	ψ	Es una medida del potencial energético del agua respecto al agua pura. Es la cantidad de agua que podría ser usada en procesos metabólicos. Se mide en números negativos, mientras más cercano a cero, mayor disponibilidad de agua.

Como se puede observar en la figura 9.4, no se encontraron diferencias en la temperatura del aire entre el monocultivo y la milpa, salvo en Nacajuca, Tabasco, donde el monocultivo presentó una temperatura del aire más elevada que la milpa. La temperatura del suelo fue mayor en el monocultivo, respecto a la milpa en todos los casos; las diferencias fueron de

hasta 5 °C en Peto, Yucatán (el sitio más pedregoso), 2.5 °C en Mama, Yucatán y 2 °C en Nacajuca, Tabasco (el sitio más húmedo), mientras que la aplicación de cobertura al suelo en el sistema agroforestal de maíz (Xmatkuil), redujo su temperatura hasta en 2.2 °C. Este mismo patrón se observó en el contenido volumétrico de agua en el suelo (CVA) en donde la milpa retuvo hasta 45% mayor cantidad de agua en la milpa con un suelo cercano a la saturación en Nacajuca, y hasta 22% en el caso del sitio más pedregoso (Peto), mientras que en Xmatkuil, 35.3% mayor en suelo con cobertura respecto al que no lo tiene. Además, en la mayoría de los casos, esta alta disponibilidad de agua en el suelo fue constante a lo largo de todo el día. Finalmente, el déficit de presión de vapor de agua (DPV) fue similar entre manejos a excepción de Nacajuca donde se registró una mayor demanda evaporativa en el monocultivo.

En general, se pudo observar que el manejo bajo el sistema milpa, así como la aplicación de cobertura en el sistema agroforestal, ofrecen mejores condiciones microclimáticas (menor temperatura del suelo, mayor disponibilidad de agua) respecto al monocultivo, y la carencia de cobertura en suelo, respectivamente.

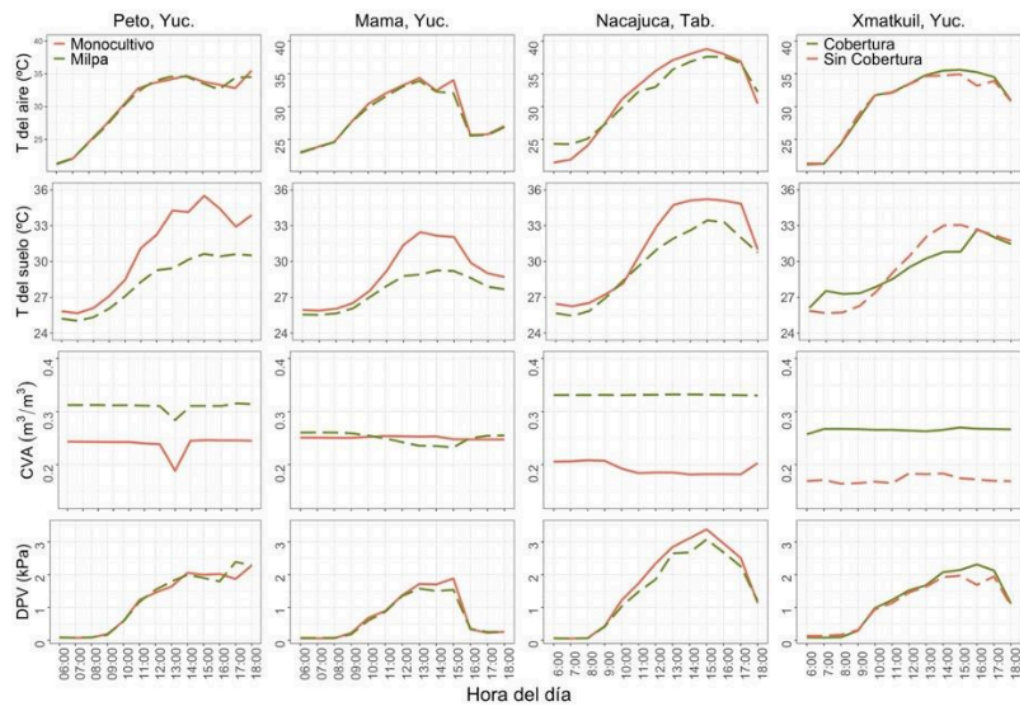


Figura 9.4. Microclima registrado entre las 6:00 y 18:00 h en tres sistemas de cultivo de maíz nativo: monocultivo, milpa (Peto, Mama y Nacajuca) y sistema agroforestal (Xmatkuil) en cuatro sitios de trabajo del sureste de México. T del aire: temperatura del aire; T del suelo: temperatura del suelo; CVA: contenido volumétrico de agua en suelo; DPV: déficit de presión de vapor de agua calculado según (H. Jones, 2014).

Sin duda, la cobertura del suelo provista por las hojas de calabaza en el sistema milpa, así como la aplicación de cobertura al suelo en el sistema agroforestal, contribuyeron a reducir la cantidad de suelo desnudo y, por tanto, reducir la cantidad de luz solar incidente, lo que provocó una menor temperatura y mayor disponibilidad de agua para las plantas, aún en suelos con alta pedregosidad.

Si bien, de manera general, las plantas podrían desempeñar un rol importante en la pérdida de agua de suelo a través del proceso de transpiración (pérdida de agua en forma de vapor a través de las hojas), en el caso de Nacajuca en Tabasco, así como en Peto y Mama en Yucatán, se pudo observar que las hojas de las plantas jugaron un rol importante en la incorporación de agua al suelo. Lo anterior se debió a que la alta humedad presente en aire (Figura 9.5a), combinado con una temperatura de las hojas menor que la del aire, provocó que esa humedad se condensara sobre las hojas, formando gotas de agua (Figura 9.5b, d). Estas gotas escurrieron hacia el suelo (Figura 9.5c), lo que contribuyó a incrementar la humedad en el mismo (Figura 9.5e, f). Particularmente el tamaño de las hojas de maíz proporciona una gran superficie captadora de agua por el mecanismo antes mencionado, mientras que en el caso de la calabaza la forma de las hojas y estructura de los tallos pueden formar un embudo que también contribuye de manera significativa a la captación de agua del rocío. Por tanto, bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura del aire, las plantas de la milpa podrían funcionar como antenas captadoras de agua y, al mismo tiempo, contribuir de manera significativa a mantener disponible ese recurso por más tiempo, en comparación con el monocultivo.

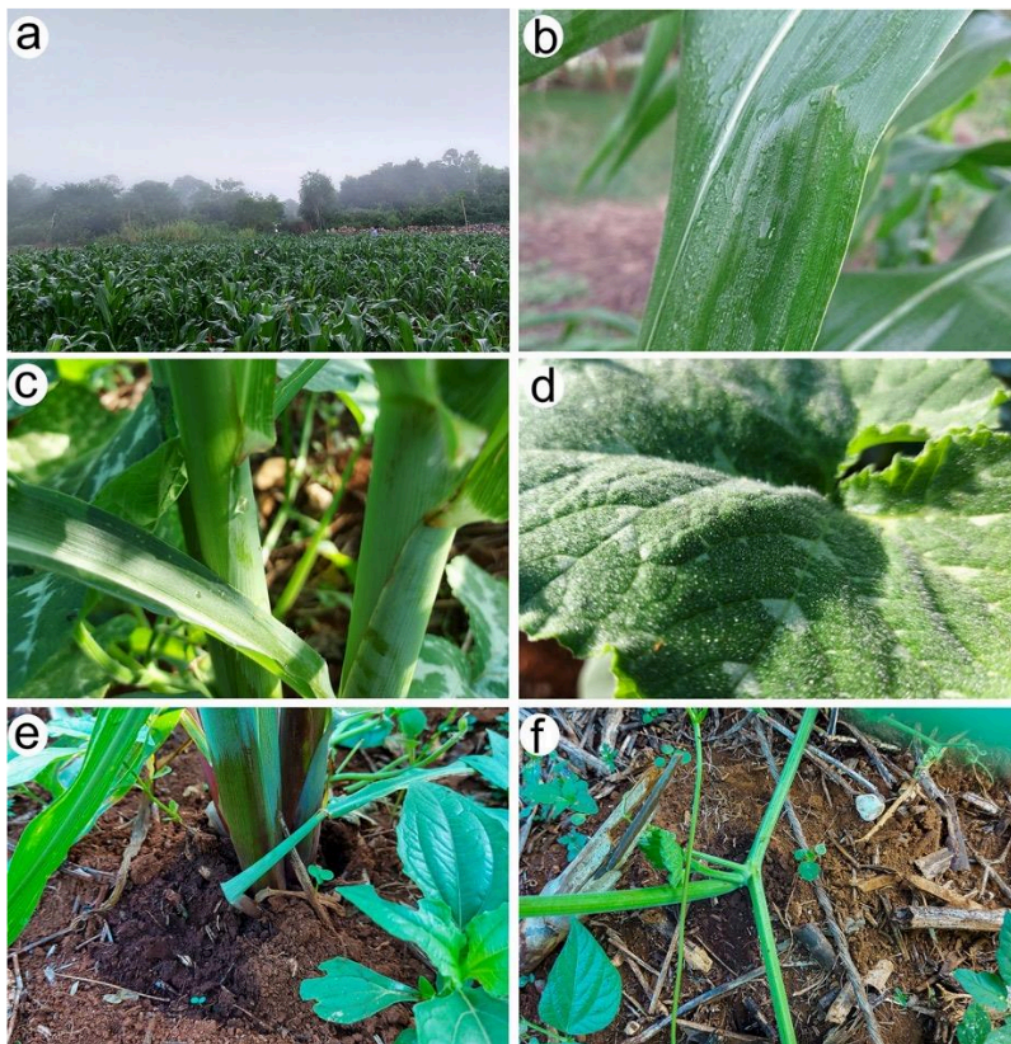


Figura 9.5. a) Imagen que ilustra la formación de neblina a las 6:00 am sobre el sitio experimental de Mama, Yucatán; b) Ilustración de la condensación y formación de gotas de agua sobre las hojas de maíz; c) gota de agua formada a partir de la condensación de rocío sobre las hojas escurriendo hacia el suelo a través del tallo del maíz; d) pequeñas gotas de agua sobre las hojas de calabaza; e) suelo alrededor de la base del tallo de maíz que se humedeció a partir del agua que escurrió a través del tallo; f) suelo que se humedeció alrededor del tallo de calabaza a partir del agua que escurrió sobre él.

Lo anterior cobra relevancia si se considera que en los sitios de trabajo se registró formación de rocío durante toda la noche, e incluso un poco más de tiempo: en Peto se registraron entre 9.3 y 9.7 horas, en Mama entre 9.6 y 11.5 horas, mientras que en el caso de Nacajuca se registraron entre 11 y 13 horas (Figura 9.6), lo que brinda una idea clara del periodo de tiempo en el que el agua puede ingresar al sistema de cultivo por la vía antes descrita.

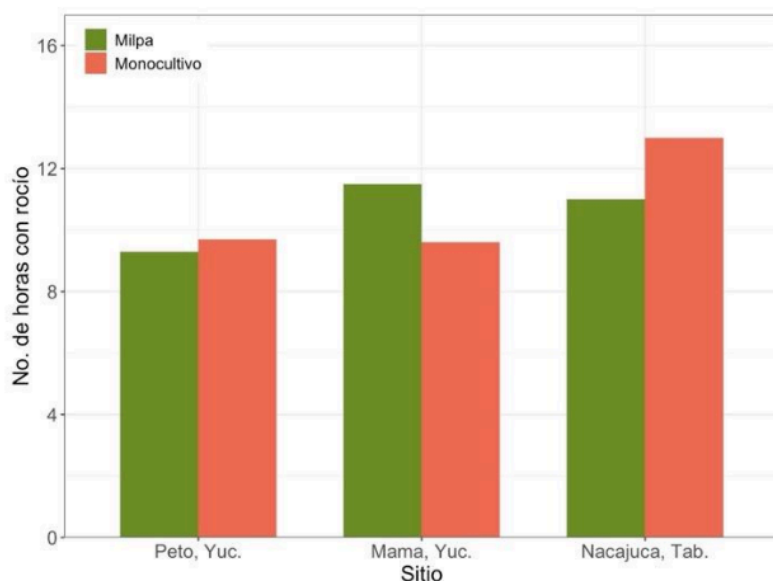


Figura 9.6. Número de horas con condensación de agua sobre hojas de maíz bajo dos tratamientos (monocultivo y milpa) en tres sitios experimentales del sur – sureste de México.

Las condiciones microclimáticas descritas anteriormente tuvieron un efecto significativo sobre el desempeño fisiológico de las plantas de maíz. Como se observa en la figura 9.7, los maíces bajo monocultivo en Nacajuca tuvieron mayor tasa fotosintética la mayor parte del día, mientras que en Mama se observó lo contrario; en el caso de Peto no se encontraron diferencias entre plantas de ambos tratamientos. Este mismo patrón se observó en la cantidad de agua perdida por transpiración, donde las plantas bajo el sistema milpa presentaron una mayor transpiración en relación con las del monocultivo en Peto y Nacajuca, mientras en Mama se observó lo contrario.

A pesar de lo anterior, al observar la eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas de maíz, no se encontraron diferencias la mayor parte del día entre tratamientos (monocultivo

vs milpa) sin embargo, la plantas que presentaron la mayor EUA fueron las de Peto, sitio que presentó los suelos con mayor pedregosidad y menor profundidad respecto al resto. Si bien las plantas de maíz bajo monocultivo presentaron la mayor EUA en sitios como Peto, se debe recordar que esto implica una menor captación de CO_2 y por tanto menor producción de azúcares, lo que se podría reflejar en una menor productividad respecto a las plantas de la milpa, quienes tienen agua suficiente en el suelo para compensar la pérdida por transpiración lo que les permite incrementar la asimilación de CO_2 .

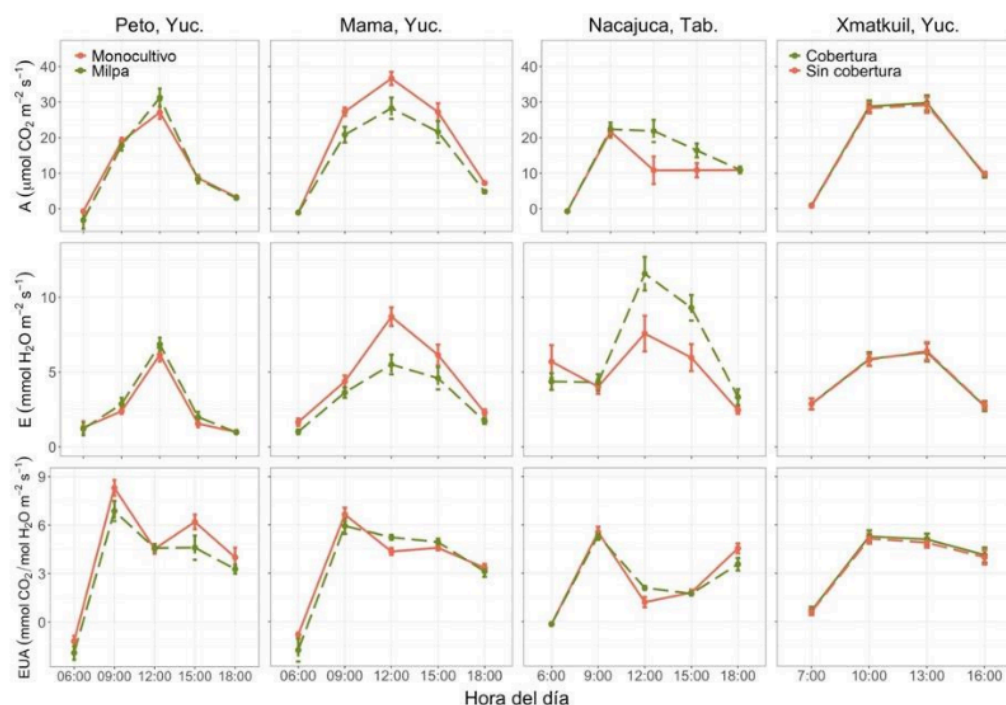


Figura 9.7. Asimilación de CO_2 (A), transpiración (E) y eficiencia en el uso del agua (EUA) registrados cuatro sitios experimentales del sur-sureste de México en plantas de maíz bajo distintos tratamientos de cultivo (milpa y monocultivo para Peto, Mama y Nacajuca; aplicación o no de cobertura con biomasa foliar de dos especies arbóreas para Xmatkuil. Los datos son promedio $\pm$ EE.

La clorofila es el pigmento responsable de la captación de luz y su transformación a energía en el proceso fotosintético y, por tanto, fundamental en la producción de azúcares en las

plantas (Manrique, 2003; Jones, 2014). La concentración de clorofila (CC) en las hojas de las plantas de maíz fue mayor en las que se encontraron en las milpas de Yucatán (Peto y Mama), mientras que en Nacajuca no se registraron diferencias entre manejos; en el sistema agroforestal de Xmatkuil la mayor CC se registró en plantas donde se aplicó cobertura (Tabla 9.2). La concentración de clorofila se relaciona con la disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Evans, 1989; Jones, 2014; Wang *et al.*, 2021); el frijol, en asociación con bacterias del género *Rhizobium*, tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que puede incrementar su disponibilidad de este elemento para las plantas de maíz y calabaza, lo que se refleja en mayor concentración de clorofila en plantas de la milpa. Lo anterior puede ser de gran relevancia en sitios con suelos poco profundos y con alta pedregosidad como los de la Península de Yucatán; en el caso de Nacajuca, el sitio experimental fue previamente utilizado para el pastoreo de ganado bovino, lo que pudo contribuir a la concentración de clorofila encontrada por el contenido de nitrógeno que pudo haber en el suelo.

De igual forma, el contenido relativo de agua (CRA; Tabla 9.2) fue mayor en plantas de la milpa en Peto y Mama, mientras que en Nacajuca y en el sistema agroforestal no se registraron diferencias. En este sentido, el potencial hídrico foliar fue mayor en plantas de maíz bajo el sistema milpa en Peto y en el sistema agroforestal con aplicación de cobertura (Ψ ; Tabla 9.2). Lo anterior refleja que la alta disponibilidad de agua en suelo es aprovechada por las plantas de maíz para realizar sus procesos metabólicos, desde la fotosíntesis hasta la regulación de temperatura a través de la transpiración.

Tabla 9.2. Concentración de clorofila (CC), contenido relativo de agua (CRA) y potencial hídrico foliar (Ψ) en plantas de maíz bajo distintos manejos en cuatro sitios experimentales del sur-sureste de México. Los datos son promedio $\pm$ EE. Letras diferentes denotan diferencias significativas entre tiramientos para un mismo sitio experimental (ANOVA simple con $\alpha=0.05$).

Sitio	Maíz	Manejo	CC	CRA	Ψ (MPa)
Peto, Yucatán	Nal Xoy	Milpa	347.8 $\pm$ 23.47 ^a	90.86 $\pm$ 1.3 ^a	-1.39 $\pm$ 0.08 ^a
		Monocultivo	250.5 $\pm$ 7.31 ^b	71.71 $\pm$ 3.7 ^b	-1.60 $\pm$ 0.10 ^b
	Nal Xoy	Milpa	449.8 $\pm$ 15.9 ^a	82.19 $\pm$ 1.9 ^a	-1.23 $\pm$ 0.03 ^a

Mama, Yucatán		Monocultivo	418.5 ± 23.02 ^a	73.12 ± 2.6 ^b	-1.26 ± 0.10 ^a
Xmatkuil, Yucatán	Nal Xoy	Cobertura	400.8 ± 31.9 ^a	79.85 ± 4.7 ^a	-0.75 ± 0.43 ^a
		Sin cobertura	314.9 ± 23.2 ^b	87.52 ± 3.5 ^a	-1.28 ± 0.09 ^a
Nacajuca, Tabasco	Tuxpeño	Milpa	326.3 ± 20.2 ^a	92.84 ± 1.5 ^a	-0.99 ± 0.13 ^a
		Monocultivo	438.8 ± 32.7 ^a	94.39 ± 0.9 ^a	-1.72 ± 0.14 ^b

Un análisis no métrico de escala multidimensional (NMDS por sus siglas en inglés) permitió observar las estrategias fisiológicas que siguieron las plantas de maíz por sitio y tipo de manejo. En este sentido, Mares-Guerrero *et al.* (2024) reportaron un comportamiento distinto de las plantas según el tipo de manejo y sitio de trabajo, particularmente en el sitio más pedregoso donde las plantas bajo el sistema milpa presentaron una mayor homogeneidad en su comportamiento, respecto al monocultivo. Algo similar reportaron Pérez-Hernández *et al.* (2021) para Nacajuca, mientras que para el sistema agroforestal de Xmatkuil se encontró que el comportamiento de las plantas fue más homogéneo cuando se aplicó cobertura (datos no mostrados).

De manera general, las plantas de maíz en Nacajuca se comportaron fisiológicamente de manera muy distinta a las plantas establecidas en Yucatán (Figura 9.8), lo cual cobra sentido si se considera que son razas de maíz y condiciones ambientales distintas. Sin embargo, algo similar se encontró en las plantas establecidas en Peto (el sitio con el suelo más pedregoso y menos profundo) que se comportaron distinto a las plantas establecidas en Mama; estas últimas plantas tuvieron un comportamiento muy similar a lo registrado en el sistema agroforestal.

Los resultados anteriores muestran que el manejo agroforestal con aplicación de cobertura con biomasa de especies leguminosas puede proveer condiciones microclimáticas similares a las que se encuentran en el sistema milpa establecida en suelos de profundidad media en una región relativamente seca como la Península de Yucatán, aun cuando se establezcan en suelos con menos profundos y con cierto grado de pedregosidad. De igual forma, permite apreciar la plasticidad y adaptación de las variedades locales de maíz a condiciones heterogéneas dentro de la región en la que se establecieron.

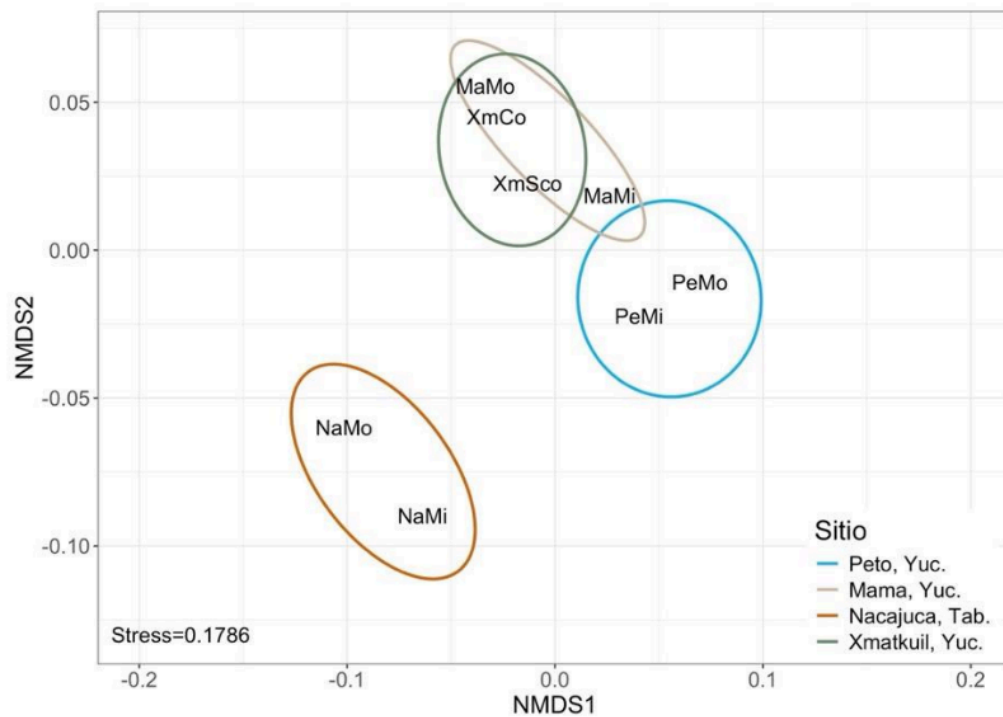


Figura 9.8. Análisis no métrico de escala multidimensional (NMDS por sus siglas en inglés) construido a partir de datos de totales diarios de asimilación de CO₂ y transpiración, eficiencia en el uso del agua y registros de potencial hídrico, contenido relativo de agua y potencial hídrico foliar en plantas de Maíz bajo distintos manejos en cuatro sitios del sureste de México. PeMo: monocultivo en Peto, Yucatán; PeMi: milpa en Peto; Mamo: monocultivo en Mama, Yucatán; MaMi: Milpa Mama; NamO: monocultivo en Nacajuca, Tabasco; Nami: milpa en Nacajuca; XmCo: monocultivo en sistema agroforestal con aplicación de cobertura en Xmatkuil, Yucatán; XmsCo: monocultivo en sistema agroforestal sin aplicación de cobertura en Xmatkuil, Yucatán. Las elipses representan el grado de dispersión de los datos para cada sitio de trabajo, contruidos a partir de una matriz de covarianza de la salida de datos del NMDS.

Consideraciones finales

El cambio climático global pone en riesgo el suministro de alimentos a nivel mundial derivado de una disminución en el rendimiento de los cultivos tropicales, lo que pone en

riesgo los sistemas alimentarios, medios de subsistencia y salud humana (Masson-Delmotte *et al.*, 2022). En este contexto, la población rural es altamente vulnerable por carecer de los medios para hacer frente a dicha variación climática.

Los trabajos antes señalados demuestran la importancia del manejo del microclima como potencial promotor de condiciones favorables para el cultivo de alimentos como el maíz. La milpa demostró modificar de manera significativa el microclima, particularmente en lo relativo a la disponibilidad de agua en suelo, lo que puede favorecer el desempeño fisiológico y productivo del maíz y plantas asociadas, particularmente en suelos pedregosos y poco profundos donde el cultivo se realiza bajo condiciones ambientales adversas para las plantas. Además, la diversidad de alimentos obtenidos de la milpa favorece la integración de una dieta balanceada para los pequeños productores.

También se realza la importancia de los maíces nativos como motor de la sustentabilidad alimentaria en el contexto rural. Más allá de las estadísticas oficiales sobre el cultivo de al menos tres tipos de maíz (blanco, amarillo y palomero) como su rendimiento, superficie sembrada y producción total, existe muy poca información sobre los maíces nativos en este sentido, demostrando poco interés y/o complejidad para recabar información en este sentido, a pesar de que se estima que el 65% de la superficie sembrada de maíz en México corresponde a maíces nativos cuyo principal destino es el autoconsumo y el abastecimiento de mercados locales (Guadarrama *et al.*, 2014; López-Torres *et al.*, 2016).

Es de fundamental importancia el rescate, revalorización y consumo de especies nativas locales por varios motivos: 1) aporte de las plantas nativas a la tolerancia al cambio climático, 2) conservación de la agrobiodiversidad silvestre y cultivada, 3) la adaptación que los humanos tenemos a los alimentos nativos que históricamente fueron domesticados en la región geográfica en la que nacimos, y por tanto los aportes nutrimentales obtenidos a partir de la dieta.

Un adecuado manejo de los sistemas agroforestales como la poda y aplicación de cobertura al suelo demostró tener una influencia favorable en la retención de agua, incorporación de nutrientes al suelo y control de malezas, por lo que puede ser una excelente alternativa cuando los productores se interesan en la cría de animales como complemento al cultivo de maíz. Finalmente, se debe recordar que los sistemas de agricultura tradicional son fundamentales como sustento de los medios de vida, particularmente en la agricultura rural, al conservar el

conocimiento, proteger paisajes ya de por sí frágiles por diversas actividades humanas, así como el rol que pueden jugar en la conservación de la agrobiodiversidad (FAO, 2018).

Agradecimientos

A los Sres. David Kumul, Francisco Teh y German Pérez por las facilidades brindadas para el desarrollo de los diversos experimentos en sus parcelas. A Robert Us, Denisse Morales, Celene Espadas, Alfredo Jiménez por su apoyo en laboratorio y campo, así como a Casandra Reyes, Jorge Mendoza, David Álvarez, Hans van der Wal, Juan Manuel Pat, Ulises Rodríguez y Rosaura Aparicio por sus aportes a diversas secciones de los trabajos analizados. A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Centro de Investigación Científica de Yucatán, Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad (LANIES) y al Laboratorio de Ecofisiología Vegetal y Sistemas Agroforestales (LEVSA) de ECOSUR por todas las facilidades brindadas para el desarrollo de estos trabajos.

Referencias

- Aguilar, J., Illsley, C., y Marielle, C. (2003). Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. In Galicia, G., Esteva, G. y Marielle, C. (eds.), *Sin maíz no hay país* (pp. 83-122.). Consejo Nacional para la Cultura y las Artes : Dirección General de Culturas Populares e Indígenas: Museo Nacional de Culturas Populares.
- Almeida, A.-A., y Valle, R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425–448. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011>
- Altieri, M. (2018). *Agroecology. The Science Of Sustainable Agriculture* (Second edition). CRC Press Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9780429495465>
- Bailey, R., Benton, T., Challinor, A., Elliott, J., Gustafson, D., Hiller, B., Jones, A., Jahn, M., Kent, C., Lewis, C., Meacham, T., Rivington, M., Robson, D., Tiffin, R., y Wuebbles, D. (2015). *Extreme weather and resilience of the global food system. Final Project Report from the UK-US Taskforce on Extreme Weather and Global Food System Resilience, The Global Food Security programme, UK.*

www.foodsecurity.ac.uk/assets/pdfs/extreme-weather-resilience-of-global-food-system.pdf

- Brown, R.H. (1978). A Difference in N Use Efficiency in C₃ and C₄ Plants and its Implications in Adaptation and Evolution. *Crop Science*, 18, 93–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci1978.0011183X001800010025x>
- Brush, S. (1991). A Farmer-Based Approach to Conserving Crop Germplasm. *Economic Botany*, 45(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02862044>
- Cach-Pérez, M.J., Villanueva, G., Alayón, J.A., Nahed, J., y Casanova-Lugo, F. (2021). Microclimate Management: From Traditional Agriculture to Livestock Systems in Tropical Environments. In Galanakis, C.M. (ed.), *Environment and Climate-smart Food Production* (pp. 1–29). Springer Nature. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-71571-7_1
- CIMMYT. (2020). *La milpa, tradición que impulsa el futuro*. Disponible en: <https://idp.cimmyt.org/la-milpa-tradicion-que-impulsa-el-futuro/>
- Colunga-García Marín, P., y Zizumbo-Villarreal, D. (1993). La evolución de las plantas bajo selección artificial y manejo agrícola. In E. Leff y Carabias, J. (eds.), *Cultura y Manejo Sustentable de los Recursos Naturales: Vol. I* (pp. 123–163). Miguel Ángel Porrúa.
- CONABIO. (2011). *Distribución de teocintle en México. Mapa realizado con información del Proyecto Global de Maíces Nativos*.
- CONABIO. (2015). *Datos obtenidos del Proyecto Global de Maíces Nativos*. Distribución de La Raza de Maíz. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2020). *Razas de maíz de México*. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>
- Costa, F., Vidal, R., De Almeida, N., Veasey, E.A., De Oliveira, F., y Zucchi, M.I. (2024). Archaeological findings show the extent of primitive characteristics of maize in South America. *Science Advances*, 10, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1126/sciadv.adn1466>
- Da Fonseca, R. R., Smith, B.D., Wales, N., Cappellini, E., Skoglund, P., Fumagalli, M., Samaniego, J.A., Carøe, C., Ávila-Arcos, M.C., Hufnagel, D.E., Korneliussen, T.S., Vieira, F.G., Jakobsson, M., Arriaza, B., Willerslev, E., Nielsen, R., Hufford, M.B., Albrechtsen, A., Ross-Ibarra, J., y Gilbert, M.T.P. (2015). The origin and evolution of

- maize in the Southwestern United States. *Nature Plants*, 1. <https://doi.org/10.1038/nplants.2014.3>
- Evans, J.R. (1989). Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C₃ plants. *Oecologia*, 78, 9–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00377192>
- FAO. (2018). *Globally important agriculture heritage systems. Combining agricultural biodiversity, resilient ecosystems, traditional farming practices and cultural identity*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0ef0c947-d959-4be0-9a4a-1c2633262b2e/content>
- Foolad, M.R. (2005). Breeding for abiotic stress tolerances in tomato. In Ashraf, M. y Harris, P.J. (Eds.), *Abiotic stresses: plant resistance through breeding and molecular approaches* (pp. 613–684). The Haworth Press Inc.
- Gepts, P. (2004). Crop Domestication as a Long-term Selection Experiment. *Plant Breeding*, 24, 1–44.
- Gliessman, S.R. (1983). Allelopathic interactions in crop-weed mixtures. *Journal of Chemical Ecology*, 9, 991–999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00982206>
- González-Merino, A., y Ávila-Castañeda, J.F. (2014). El maíz en Estados Unidos y en México. Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos*, 27(75), 215–237.
- Guadarrama, A., Aragón, F., y Willcox, M. (2014). Mejoramiento de maíces nativos. *Enlace*, 22, 11–15.
- Hammer, K. (1984). Das domestikationssyndrom. *Die Kulturpflanze*, 32, 11–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02098682>
- Harlan, J.R. (1971). Agricultural Origins: Centers and Noncenters. *Science*, 14, 468–474. <https://doi.org/10.1126/science.174.4008.468>
- Harlan, J. (1975). *Crops and man*. Foundation for modern crop science series. American Society of Agronomy.
- Hoy, C.W. (2015). Agroecosystem health, agroecosystem resilience, and food security. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(4), 623–635. <https://doi.org/10.1007/s13412-015-0322-0>
- IFAD. (2021). *Transforming food systems for rural prosperity: Rural development report 2021*. <https://www.ifad.org/documents/38714170/43704363/rdr2021.pdf/>

- INEGI. (2022). *Censo agropecuario 2022. Resultados definitivos*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., y Miller, H.L, eds.). Cambridge University Press.
- Jarma-Orozco, A., Cardona, C., y Araméndiz, H. (2012). Effect of climate change on the physiology of crop plants: a review. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación*, 15(1), 63–76.
- Jiménez-Pérez, A., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., & de la Rosa-Manzano, E. (2019). Effect of canopy management in the water status of cacao (*Theobroma cacao*) and the microclimate within the crop area. *Botanical Sciences*, 97(4), 701–710.
<https://doi.org/10.17129/botsci.2256>
- Jones, H. (2014). *Plant and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Jones, M. (1985). Plant microclimate. In Coombs, J., Hall, D.O., Long, S.P., y Scurlock, J.M.O. (eds.), *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis* (pp. 26–40). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-08-031999-5.50013-3>
- Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J., y Bye, R. (2009). *Origen y diversificación del Maíz: una revisión analítica* (Primera edición). Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Kistler, L., Maezumi, S.Y., Gregorio De Souza, J., Przelomska, N.A.S., Malaquias Costa, F., Smith, O., Loiselle, H., Ramos-Madrigal, J., Wales, N., Ribeiro, E.R., Morrison, R.R., Grimaldo, C., Prous, A.P., Arriaza, B., Thomas, M., Gilbert, P., De Oliveira Freitas, F., y Allaby, R.G. (2018). Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. *Science*, 362, 1309–1313.
<https://doi.org/10.1126/science.aav0207>
- Kistler, L., Thakar, H., Vanderwarker, A., Domic, A., Bergström, A., George, R., Harper, T., Allaby, R., Hirth, K., y Kennett, D. (2020). Archaeological Central American maize genomes suggest ancient gene flow from South America. *PNAS*, 117(52), 33124–33129.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.201556011>

- Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups* (4th ed.). Springer.
- Ledesma, N.A., Nakata, M., y Sugiyama, N. (2008). Effect of high temperature stress on the reproductive growth of strawberry cvs. “Nyoho” and “Toyonoka.” *Scientia Horticulturae*, 116(2), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.12.010>
- Lombardini, L. (2006). Ecophysiology of plants in dry environments. In D’odirico, P. y Porporato, A. (eds.), *Dryland Ecohydrology* (pp. 47–66). Springer.
- López-Torres, J., Rendón-Medel, R., y Camacho, T. (2016). The marketing of specialty corns in Mexico: current conditions and prospects. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15, 3075–3088. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.427>
- Manrique, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, XII(1), 1–11. <https://www.aect.org/ecosistemas/031/informe4.htm>
- Mall, R. K., Gupta, A., y Sonkar, G. (2017). Effect of climate change on agricultural crops. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Crop Modification, Nutrition, and Food Production* (pp. 23–46). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63661-4.00002-5>
- Matos-Moctezuma, E. (1994). Mesoamérica. In Manzanilla, L. y López-Luján, L. (eds.), *Historia Antigua de México: El México antiguo, sus áreas culturales, los orígenes y el horizonte preclásico: Vol. I* (pp. 49–74). Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Mares-Guerrero, A.A., Cach-Pérez, M.J., Reyes-García, C., y Van der Wal, H. (2024). Respuesta fisiológica del maíz en monocultivo y milpa en suelos superficiales y profundos de Yucatán, México. *Botanical Sciences*, 102(1), 144–161. <https://doi.org/10.17129/botsoci.3365>
- Mariaca, R. (2011). La milpa en el sur de México. *Ecofronteras*, 43, 22–26. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/732>
- Marsal, J., y Girona, J. (1997). Effects of water stress cycles on turgor maintenance processes in pear leaves (*Pyrus communis*). *Tree Physiology*, 17, 327–333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/treephys/17.5.327>

- Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.O., Skea, J., Slade, R., Ferrat, M., Neogi, S., Portugal, J., Kissick, K., Calvo, E., Connors, S., Haughey, E., Pathak, M., Vyas, P., Belkacemi, M., Zhai, P., Roberts, D., Shukla, P.R., van Diemen, R., Luz, S., ... Malley, J. (2022). Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988>
- Mateos-Maces, L., Castillo-González, F., Chaves, J.L., Estrada-Gómez, J.A., y Livera-Muñoz, M. (2016). Manejo y aprovechamiento de la agrobiodiversidad en el sistema milpa del sureste de México. *Acta Agronomica*, 65(4), 413–421. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n4.50984>
- Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.G., Sapkota, T., Tubiello, F.N., y Xu, Y. (2019). Food security. In Shukla, P.R., Skea, J., Calvo-Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal, J., Vyas, P., Huntley, E., ... Malley, J. (eds.), *Climate Change and Land: an-IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 437–550). IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Mera, L., y Mapes, C. (2009). El Maíz. Aspectos biológicos. In Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J., y Bye, R. (eds.), *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica* (Primera edición, pp. 19–31). Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Mislan, K.A.S., y Helmuth, B. (2008). Microclimate. In Jørgensen, S.E. y Fath, B.D. (eds.), *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 2389–2393). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00520-6>

- Naiman, R.J., Décamps, H., McClain, M.E., y Likens, G.E. (2005). Biotic functions of Riparia. In Naiman, R.J., Décamps, H., McClain, M.E., y Likens, G.E. (Eds.), *Riparia* (pp. 125–158). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-012663315-3/50006-x>
- Nascimento, W.M., Cantliffe, D.J., y Huber, D.J. (2000). Thermotolerance in lettuce seeds: Association with ethylene and endo- β -mannanase. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(4), 518–524. <https://doi.org/10.21273/jashs.125.4.518>
- Oliver, M.J., Cushman, J.C., y Koster, K.L. (2010). Dehydration tolerance in plants. In Sunkar, R. (ed.), *Plant Stress Tolerance* (Vol. 639, pp. 3–24). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_1
- Peraza-Villarreal, H., Casas, A., Lindig-Cisneros, R., y Orozco-Segovia, A. (2019). The marceño agroecosystem: Traditional maize production and wetland management in Tabasco, Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071978>
- Pérez-Hernández, R., Cach-Pérez, M.J., Aparicio-Fabre, R., van der Wal, H., y Rodríguez-Robles, U. (2021). Physiological and microclimatic effects of different agricultural management practices with maize. *Botanical Sciences*, 99(1), 132–148. <https://doi.org/10.17129/botsci.2640>
- Petit-Aldana, J., Uribe-Valle, G., Casanova-Lugo, F., Solorio-Sánchez, J., y Ramírez-Avilés, L. (2012). Descomposición y liberación de Nitrógeno y materia orgánica en hojas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Guazuma ulmifolia* Lam. y *Moringa oleifera* Lam. en un banco mixto de forraje. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVIII(1), 5–25. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.03.025>
- Qaderi, M.M., y Reid, M. (2009). Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide and Temperature. In Singh, S.N. (e d.), *Climate change and crops* (pp. 1–18). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6>
- Restrepo-Díaz, H., Melgar, J.C., y Lombardini, L. (2010). Ecophysiology of horticultural crops: an overview. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 71–79.
- Reyes, P. (1990). *El maíz y su cultivo* (1a.). AGT EDITOR.
- Rivera-Rodríguez, D.M., González, J.D.J., De la Cruz, L., Santacruz-Ruvalcaba, F., y Ruiz, J.A. (2019). Morphological and Climatic Variability of Teosinte (*Zea* spp.) and

- Relationships among Taxa. *Systematic Botany*, 44(1), 41–51.
<https://doi.org/10.1600/036364419X697886>
- Rosado, A., y Serrano, B. (2021). *Los herederos del maíz*. Gobierno de México, Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas.
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional. Maíz grano blanco y amarillo Mexicano*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256429/B_sico-Ma_z_Grano_Blanco_y_Amarillo.pdf
- Sage, R.F., y Kubien, D.S. (2007). The temperature response of C3 and C4 photosynthesis. *Plant, Cell and Environment*, 30(9), 1086–1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01682.x>
- Sage, R.F., y Pearcy, R.W. (1987). The Nitrogen Use Efficiency of C₃ and C₄ Plants I. Leaf nitrogen, growth and biomass partitioning in *Chenopodium album* (L.) and *Amaranthus retroflexus* (L.). *Plant Physiology*, 84, 954–958.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1104%2Fpp.84.3.954>
- Sage, R.F., y Stata, M. (2015). Photosynthetic diversity meets biodiversity: The C₄ plant example. *Journal of Plant Physiology*, 172, 104–119.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.07.024>
- Sánchez, J.J., y Ruiz, J.A. (1996). Distribución del teocintle en México. In Serratos, J.A., Willcox, M.C., y Castillo, F. (eds.), *Flujo Genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: Implicaciones para el maíz transgénico*. CIMMYT.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Productores de pequeña escala son los que nos dan de comer*. Disponible en:
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/productores-de-pequena-escala-son-los-que-nos-dan-de-comer/>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2024). *Reporte anual del clima en México 2023*.
www.conagua.gob.mx
- Siebert, S., Webber, H., y Rezaei, E. (2017). Weather impacts on crop yields - searching for simple answers to a complex problem. *Environmental Research Letters*, 12, 1–3.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7f15>
- Singh, S.N. (2009). *Climate change and crops*. Springer-Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6>

- Sunkar, R. (2010). Plant Stress Tolerance. In *Methods in molecular biology* (Vol. 639). Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0>
- Tuxill, J., y Nabhan, G. (2001). *Plantas, comunidades y áreas protegidas. Una guía para el manejo in situ*. Nordan.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., y Foolad, M.R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. In *Environmental and Experimental Botany* (Vol. 61, Issue 3, pp. 199–223). <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wang, N., Fu, F., Wang, H., Wang, P., He, S., Shao, H., Ni, Z., y Zhang, X. (2021). Effects of irrigation and nitrogen on chlorophyll content, dry matter and nitrogen accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95792-z>
- Wasilewska-Dębowska, W., Zienkiewicz, M., y Drozak, A. (2022). How Light Reactions of Photosynthesis in C₄ Plants Are Optimized and Protected under High Light Conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7). <https://doi.org/10.3390/ijms23073626>
- Wilkes, H.G. (2004). Corn, strange and marvelous: But is a definitive origin known? In Smith, C.W., Betran, J., y Reinge, E.C.A. (eds.), *Corn: Origin, History, Technology, and Production* (pp. 3–63). John Wiley & Sons, Inc.
- Xiu-Canché, P.A., Cach-Pérez, M.J., Álvarez-Solís, J.D., Mendoza-Vega, J., y Pat-Fernández, J.M. (2023). Maize weed control in tropical alley-cropping systems using foliage of different tree species as soil cover. *Agroforestry Systems*, 97(8), 1587–1599. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00880-w>
- Zizumbo, D., y Colunga, P. (2008). El origen de la agricultura, la domesticación de plantas y el establecimiento de corredores biológico-culturales en Mesoamérica. *Revista de Geografía Agrícola*, 41, 85–113. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75711472007>
- Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-García Marín, P., y Flores-Silva, A. (2016). Pre-Columbian Food System in West Mesoamerica. In Lira, R., Casas, A, y Blancas, J. (eds.), *Ethnobotany of Mexico. Interactions of People and Plants in Mesoamerica* (pp. 67–82). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_4

- Zizumbo-Villarreal, D., Flores-Silva, A., y Colunga-García Marín, P. (2012). The Archaic Diet in Mesoamerica: Incentive for Milpa Development and Species Domestication. *Economic Botany*, 66(4), 328–343. <https://doi.org/10.1007/s12231-012-9212-5>
- Zizumbo-Villarreal, D., Flores-Silva, A., y Colunga-García, P. (2012). The Archaic Diet in Mesoamerica : Incentive for Milpa Development and Species Domestication. *Economic Botany*, 66, 328–343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12231-012-9212-5>
- Zohary, D., y Hopf, M. (1993). *Domestication of Plants in the Old World* (2nd ed.). Oxford University Press.

Capítulo 10. Soluciones basadas en la naturaleza en los humedales de los Pantanos de Centla ante el cambio climático

Leonardo Noriel López Jiménez*

Adriana Rodríguez Jiménez**

Resumen

Las Soluciones basadas en la Naturaleza son acciones que protegen, restauran y manejan sosteniblemente los ecosistemas, y al mismo tiempo brindan beneficios al bienestar humano, al conservar la biodiversidad y ofrecer soluciones contra el cambio climático. Por eso se exploran los esfuerzos y resultados implementados en comunidades rurales ubicadas en los manglares dentro de los Pantanos de Centla, en Tabasco. Se muestran sus contribuciones al desarrollo regional sustentable, el estado de los esfuerzos y resultados como revisión de los proyectos, y una reflexión sobre su acercamiento con los principios básicos que las rigen. En conjunto las Soluciones basadas en la Naturaleza consideraron los intereses y necesidades de las comunidades e incorporaron los contextos ambientales y sociales del territorio. Gracias a estos proyectos se espera que se atiendan los grandes como el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, desde un contexto local y con la participación de las comunidades.

Palabras clave: *conservación, manglares, pesca, agua.*

Seres humanos y naturaleza

Los seres humanos estamos intrínsecamente relacionados con los ecosistemas, hemos vivido en armonía con la naturaleza y nuestras actividades y supervivencia dependen del mundo natural (Roxburgh, 2018), de tal modo que los ecosistemas proveen de prosperidad a la sociedad brindando bienes materiales, salud y seguridad (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En los últimos siglos, la urbanización y las formas de consumo han deteriorado este vínculo con la naturaleza, de tal forma que los límites planetarios que mantienen las condiciones ambientales actuales y la estabilidad planetaria están siendo

cruzados, lo que implica que la forma de vida actual se encuentra en riesgo (Richardson *et al.*, 2023).

La degradación de los ecosistemas se debe a los cambios de uso de suelo, la sobreexplotación de los recursos naturales, la contaminación, la introducción de especies exóticas y el cambio climático. Estos factores son generados a su vez por el aumento en el uso de los recursos naturales para producir energía y alimentos, entre otros materiales (Watson, 2022), por el aumento de la población, el crecimiento de la economía y las decisiones políticas (Díaz *et al.*, 2019). El bienestar humano depende de los sistemas naturales, pero el modelo actual de desarrollo ha degradado la capacidad del planeta para brindarlos (Barra *et al.*, 2021).

Debido a esta situación, surge la necesidad de realizar acciones que apoyen a los ecosistemas a continuar brindando servicios a la sociedad, a la par de conservar la biodiversidad, para alcanzar el desarrollo sustentable. Si bien existen diferentes enfoques de abordaje, existen soluciones inspiradas y respaldadas por la naturaleza, que adoptan las normas o imitan los principios naturales.

Soluciones basadas en la naturaleza

Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) son un conjunto de acciones que protegen, manejan sustentablemente y restauran los ecosistemas naturales o modificados para enfrentar los retos y desafíos de manera efectiva y adaptada, al mismo tiempo que se obtienen beneficios para la biodiversidad y al bienestar humano (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Estas soluciones están inspiradas, apoyadas y utilizan la naturaleza para proponer soluciones a los problemas sociales, económicos y ambientales (Commision, 2015).

A su vez, las SbN son una opción de mitigación para el cambio climático pues permiten la captura y almacenaje de carbono de una manera rentable y eficiente a través del manejo de los bosques, humedales y de tierras agrícolas (Griscom *et al.*, 2017). Las SbN ofrecen soluciones contra el cambio climático, pero también atienden los problemas de la pérdida de biodiversidad, seguridad alimentaria e hídrica y el riesgo de desastres (Marquet *et al.*, 2021). La preocupación mundial sobre el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad es real y son los principales retos que vencer de acuerdo con la población (UNESCO, 2021). Dependiendo de cómo se manejen los ecosistemas, pueden contribuir a solucionar este

problema mediante la adaptación y la mitigación. Por estas razones, es vital la implementación de proyectos que incluyan a las SbN como estrategia para abordar el cambio climático y que contribuyan con los esfuerzos de desarrollo regional sustentable. De esta manera, se exploran los esfuerzos y resultados de las SbN implementadas en comunidades rurales de los Pantanos de Centla y ofrecer una revisión de la implementación de los proyectos, así como reflexionar sobre su acercamiento a los principios básicos que las sustentan (Cohen-Shacham *et al.*, 2016) y al desarrollo regional sustentable.

Humedales de los Pantanos de Centla

Los Pantanos de Centla se ubican en la parte baja de la Cuenca del Río Usumacinta, en el Estado de Tabasco y son gestionados como área natural protegida a través de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC). Los Pantanos de Centla están conformados por un sistema hídrico complejo de ríos y lagunas permanentes y temporales (INE, 2000) que se ubican en una planicie palustre y costera de baja altitud (INE, 2000; Medrano-Pérez *et al.*, 2021). Los humedales son el tipo de vegetación principal y están representados por comunidades acuáticas como manglares (Figura 10.1), popales y tulares (Novelo-Retana, 2006; López-Jiménez *et al.*, 2020).



Figura 10.1. Humedales ubicados dentro de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

Debido a estas características territoriales, la pesca es la actividad productiva y medio de vida más importante de los Pantanos de Centla por los ingresos que genera y el arraigo cultural. La pesca es sencilla, con escasa dependencia tecnológica y multi-específica, y se realiza a través de cooperativas pesqueras (Mendoza-Carranza, 2008; Mendoza-Carranza *et al.*, 2013; López-Jiménez y Fernández-Montes de Oca, 2021). Adicionalmente a la pesca, también se realiza ganadería a pequeña escala y agricultura en pequeñas parcelas y huertos (CONANP & PNUD, 2019). De este modo, la población de los Pantanos de Centla basa su economía en la extracción de los recursos naturales (Barba Macías *et al.*, 2014).

La RBPC es vulnerable al cambio climático. Considerando los posibles escenarios climáticos, se estima una disminución en la precipitación y se prevén aumentos de la temperatura (Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2021). Debido a que es una planicie, el incremento de nivel del mar provocará inundaciones (Ramos-reyes *et al.*, 2016), lo que provocaría que las comunidades vegetales acuáticas cambien su distribución (Mata-Zayas *et al.*, 2017), los suelos se salinicen y se presenten desplazamientos de los asentamientos humanos cercanos a la costa, hacia zonas más elevadas (Carbajal Domínguez, 2011). Si bien existen estos riesgos

por la alta exposición de la RBPC a los efectos del cambio climático, se espera que las afectaciones sean moderadas en la mayor parte del polígono (Manzanilla-Quñones *et al.*, 2021).

Los Pantanos de Centla presentan menos áreas deforestadas y pérdida de cobertura vegetal dentro de la Cuenca del Usumacinta, donde la RBPC juega un papel importante para la conservación de los ecosistemas (Gallardo-Cruz *et al.*, 2019; Peralta-Carreta *et al.*, 2019). A nivel local, existen variaciones de cambio por pérdida de la vegetación y cambios en el uso de suelo (Guerra-Martínez y Ochoa-Gaona, 2006), en parte debido a que gran parte de la población se asienta al lado de ríos, canales y carreteras (INE, 2000), donde se dan las mayores transformaciones de la vegetación (Ochoa-Gaona *et al.*, 2018). Los cambios y la pérdida de la vegetación son provocados por la deforestación por infraestructura de comunicación como carreteras, caminos y canales, el desarrollo urbano y los incendios forestales (Guerra-Martínez y Ochoa-Gaona, 2006). Los incendios tienen origen antropogénico por la captura de tortugas y para ampliar la frontera agropecuaria, para preparar terrenos para cultivos agrícolas o renovación de los pastos para la ganadería (Zenteno-Ruiz *et al.*, 2004; IPCET, 2017), principalmente cerca de los caminos, localidades y a las orillas de los ríos (De la Rosa-Velázquez *et al.*, 2017).

Los recursos pesqueros presentan una reducción significativa, de acuerdo con la percepción de los grupos de pesca (Mendoza-Carranza *et al.*, 2008, 2013; López-Jiménez y Fernández-Montes de Oca, 2021). Las malas prácticas pesqueras y el incremento de pescadores generan una disminución de la pesca en las costas de Tabasco (Espinoza-Tenorio y Mendoza-Carranza, 2015), sumado a que la sobrepesca se relaciona con la deficiente organización por parte de las cooperativas pesqueras que no permite una eficiente regulación en el uso de los recursos pesqueros (Mendoza-Carranza *et al.*, 2013).

Comunidades aliadas

Desde el 2019, Foro para el Desarrollo Sustentable, A.C. (FORO) ha desarrollado e implementado proyectos de conservación desde un enfoque territorial usando SbN en un contexto de cambio climático, en los Pantanos de Centla. Para ello, ha sumado como aliados en la implementación de SbN. a las comunidades y ejidos de El Palmar, Luis Echeverría

Álvarez y Tembladeras, ubicadas al norte de la RBPC y dentro del Municipio de Centla, Tabasco (Figura 10.2). En conjunto, los ejidos tienen una superficie de 7,500 ha (RAN, 2024) y presentan una cobertura de vegetación conservada pues resguardan tulares, manglares y popales en toda su superficie (Tabla 10.1), aunque Tembladeras además presenta vegetación secundaria arbustiva de manglar (INEGI, 2021).

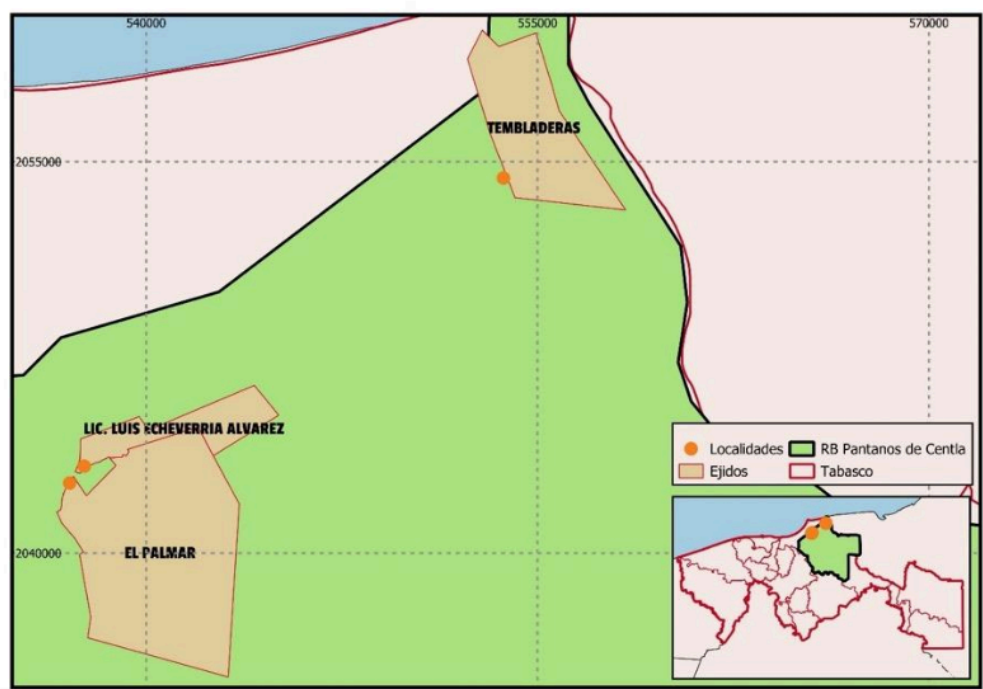


Figura 10.2. Ubicación de las comunidades y ejidos aliados dentro de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

Tabla 10.1. Porcentaje de la superficie cubierta por vegetación en los ejidos que integran el PLMT en los Pantanos de Centla.

Ejido		Manglar	Tular	Popal	Vegetación secundaria	Superficie (ha)
El Palmar		12	76	12	0	4,627.81
Luis	Echeverría	40	60	0	0	865.62
Álvarez						

Tembladeras	60	32	0	5	2,020.47
-------------	----	----	---	---	----------

La mayor parte de la superficie de los ejidos se encuentra dentro de la zona núcleo de la RBPC, y una menor proporción en el área de uso restringido como parte de la zona de amortiguamiento (Tabla 10.2). Esta característica de gestión territorial y ambiental del territorio limita las posibilidades de desarrollar actividades, no obstante actualmente existe actividad pesquera y agropecuaria, y asentamientos humanos dentro de la zona núcleo, lo que genera controversia, conflictos por el uso del territorio (ParksWathc, 2003) y la necesidad de actualizar los polígonos.

Tabla 10.2. Porcentaje de la superficie ocupada por los ejidos dentro de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

Ejido	Zona de Amortiguamiento (%)	Zona Núcleo (%)
El Palmar	39	61
Luis Echeverría Álvarez	5	95
Tembladeras	53	47

Dentro de sus límites ejidales se ubican las tres localidades homónimas, que cuentan con un total de casi 300 habitantes que viven en 86 viviendas (Tabla 10.3) (INEGI, 2020). La pesca en los manglares de las comunidades es poco tecnificada, las artes de pesca son sencillas y multi-específicas, es decir, se captura una gran variedad de especies, sobre todo de peces, aunque destacan de manera especial los crustáceos como el camarón de río (*Macrobrachium acanthurus*) y la jaiba azul (*Callinectes similes*) (Figura 10.3). Las comunidades son rurales, ubicadas en una transición que permite que convivan costumbres arcaicas, como la forma de hablar y vestir, con medios de comunicación modernos, como embarcaciones con hélices y motores, televisiones y computadoras (Sánchez-Cruz, 2019).

Tabla 10.3. Población de las localidades de los ejidos aliados.

Ejido	Número de personas	Número de mujeres	Número de hombres	Número de viviendas
-------	--------------------	-------------------	-------------------	---------------------

El Palmar		110	54	56	29
Luis	Echeverría	77	29	48	24
Álvarez					
Tembladeras		104	52	52	33



Figura 10.3. La jaiba azul (*Callinectes similis*) es uno de los principales recursos pesqueros en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

SBN en los Pantanos de Centla

En el 2019 comenzó un proceso de restauración ecológica de manglar en los Ejidos El Palmar y Tembladeras, donde se realizó una reforestación con propágulos de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y una rehabilitación hidrológica. Ambas acciones de restauración ecológica fueron bien recibidas y respaldadas por ambas comunidades, ya que las personas participaron de manera activa durante las diferentes fases del proceso, promoviendo así un proceso de restauración integral y sostenible (Gómez-Ruiz *et al.*, 2022).

El Ejido El Palmar cuenta con una red de canales que son usados para la pesca y que cubren una superficie aproximada de 250 ha de sibales (*Cladium jamaicense*) y tulares (*Typha latifolia*), pero anteriormente estuvo ocupada por manglares y pucteales (*Terminalia buceras*), los cuales se perdieron por un incendio algunas décadas hacia atrás. Si bien existe la presencia de algunos árboles de mangle en esta zona, no se puede determinar una recuperación más amplia de la cobertura de manglar. Por su parte, durante el 2006-2017, el Ejido Tembladeras destinó una zona para reforestación con mangle rojo logrando un establecimiento exitoso, pero generando problemas en los flujos hidrológicos naturales. El diseño consideró una alta densidad de siembra provocando una acreción del suelo y mayor retención de materia orgánica y las filas de siembra fueron distribuidas perpendiculares a los flujos hidrológicos, formando diques naturales para las corrientes. De este modo, los manglares reforestados obstruyeron los flujos hidrológicos naturales afectando las poblaciones de especies de interés económico como peces y crustáceos. Las acciones de reforestación previas brindaron buenos resultados en el crecimiento y supervivencia de los manglares, pero generaron impactos negativos en los medios de vida de las personas.

De manera consensuada con los Ejidos El Palmar y Tembladeras y a partir de un diagnóstico ambiental, social y cartográfico, se decidió que las acciones de restauración necesarias debían enfocarse en la reforestación con mangle rojo y en una rehabilitación hidrológica para recuperar la productividad pesquera en las zonas reforestadas (Gómez-Ruiz *et al.*, 2022).

Las acciones de rehabilitación ecológica del manglar en el ejido Tembladeras consistieron en la limpieza de 11 canales que sumaron una longitud de 5 km. El área que ocupan estos canales es de 35 ha, aunque los efectos positivos del restablecimiento de la conectividad probablemente abarquen una zona mayor. Esta rehabilitación aumenta la conectividad hidrológica de la zona de reforestación, recuperándola como corredor hidrológico para la dispersión de propágulos y permite aumentar la presencia de organismos acuáticos de interés pesquero para la comunidad de Tembladeras. El desarrollo del manglar en El Palmar permitirá que las condiciones ecológicas aumenten el establecimiento natural de otras especies de plantas, que se creen hábitats para el refugio, alimentación y crecimiento de especies de distintos grupos de fauna, aumentando su diversidad y abundancia, que se conecte parches de vegetación dispersos en el paisaje y se mejore el microclima al proporcionar sombra para su actividad de pesca.

Captación de agua de lluvia

La disponibilidad de agua en la RBPC es relativamente alta debido a la complejidad hidrológica, pero el agua potable no está disponible para el consumo de las personas que viven ahí. En las comunidades de El Palmar, Luis Echeverría Álvarez y Tembladeras no existen servicios de agua potable y saneamiento, y las fuentes de agua son prácticamente escasas. Debido a esta situación, las personas no cuentan con acceso a agua de calidad suficiente lo que hace que presenten una alta vulnerabilidad hídrica, y dependan casi exclusivamente de la captación de agua de lluvia. Esta situación se torna más complicada debido a los efectos y riesgos del cambio climático en la RBPC; por un lado, el incremento de los niveles del mar y la consecuente intrusión salina y salinización de los cuerpos de agua dulce, y por el otro, el incremento de la temperatura y de los periodos de sequía (Manzanilla-Quñones *et al.*, 2021). Ambas situaciones generan una baja disponibilidad de agua para consumo humano, reduciéndose aún más durante los periodos de seca. Al mismo tiempo, se prevé un incremento de fenómenos hidrometeorológicos y una alta probabilidad de inundación, lo que también reduce la posibilidad de acceder a agua de calidad.

Las SbN contribuyen a la gestión del agua (WWAP, 2018), así que para reducir esta vulnerabilidad, en el 2021 se entregaron sistemas de captación de agua lluvia en las comunidades de El Palmar, Luis Echeverría Álvarez y Tembladeras de Centla con el fin de fortalecer la seguridad hídrica y reducir la vulnerabilidad de las familias (Figura 10.4). De este modo, como solución a la falta de disponibilidad de agua en las comunidades de la RBPC, se propuso la instalación de tecnología a nivel vivienda rural para la captación y almacenamiento de agua. Actualmente las tres comunidades cuentan con 30 sistemas de captación de agua de lluvia que significa un volumen de capacitación de 300,000 litros para 90 familias. Los sistemas de captación permiten captar agua de lluvia para consumo humano y para un uso doméstico por medio de canaletas y tubos que llevan el agua a una cisterna (Rivero-Bustos y Córdova-Rodríguez, 2008). Estos sistemas no requieren de energía para su operación, el mantenimiento es relativamente sencillo y de bajo costo y, sobre todo, permite el abastecimiento de agua donde hay escasez o poca disponibilidad de agua potable. Además, con tratamientos adecuados, el agua captada puede ser consumida directamente y en la preparación de alimentos.



Figura 10.4. Sistema de captación de agua de lluvia en las comunidades de Tembladeras (arriba) y El Palmar (abajo) en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

Las comunidades se comprometieron en dar un buen uso, mantenimiento y cuidado a los sistemas de captación y se firmaron acuerdos para realizar un aprovechamiento colectivo de las cisternas entre los grupos de personas que previamente fueron seleccionados mediante reuniones comunitarias. Del mismo modo, se conformaron comités comunitarios que brindan

apoyo para el seguimiento de los monitoreos de la calidad del agua, y se capacitó a las personas sobre cómo realizar la colecta y análisis de parámetros relacionados con la calidad del agua. Sobre esta capacitación, se revisó como es el proceso de colecta de las muestras de agua, se explicó la importancia de realizar este tipo de análisis, y se realizaron los análisis de los parámetros indicando el procedimiento y la interpretación de cada uno. Con el fin de realizar los análisis fisicoquímicos de la calidad del agua, además de las capacitaciones, se brindaron “kits” para medir parámetros físicos, químicos y biológicos, como el pH, nitratos, fosfatos y oxígeno disuelto, así como la presencia de coliformes totales *Escherichia coli* o macroinvertebrados.

Estos sistemas de captación de agua pluvial son las fuentes de consumo de las personas, sobre todo, en la época seca. Son un ejemplo de SbN para la gestión integral de los recursos hídricos.

Buenas prácticas pesqueras

Las buenas prácticas son un conjunto de métodos y criterios para lograr el aprovechamiento sustentable de los recursos pesqueros con un menor impacto ambiental e incentivando la conservación de la biodiversidad acuática (Gómez *et al.*, 2015). FORO fomenta estas prácticas dentro de la comunidad pesquera en las comunidades de Tembladeras y El Palmar, buscando brindar un soporte técnico a la comunidad pesquera local sobre técnicas sustentables para la pesca procurando un manejo sustentable de los manglares.

Como la pesca es de baja escala y a un nivel familiar, el impacto ambiental sobre los manglares es reducido, sin embargo, con las buenas prácticas pesqueras se busca incluir criterios de sustentabilidad y conservación biológica, así como mejorar la productividad a través de la mejora de la calidad y la higiene de los productos pesqueros. La aplicación de buenas prácticas genera beneficios, ya que permiten la conservación de los manglares y sus especies, y los medios de vida locales, mientras que también brindan seguridad alimentaria y, de manera general, contribuyen con el bienestar de las personas. De este modo, las comunidades El Palmar y Tembladeras identificaron las buenas prácticas de pesca que se pueden implementar en sus territorios.

Participación social y educación ambiental

La gestión del territorio tiene que incluir en todo momento a la población para que las acciones reflejen sus intereses colectivos (García-Contreras y González-Ceballos, 2015). A la par, si las necesidades de las personas son tomadas en cuenta para el diseño y ejecución de proyectos de conservación, su participación es más activa y se observan resultados más exitosos en la RBPC (López-Jiménez *et al.*, 2020; Gómez-Ruiz *et al.*, 2022). También la actitud positiva hacia la conservación se genera en parte, gracias a las actividades de educación ambiental hacia la población infantil y adulta (López-Jiménez y Fernández-Montes de Oca, 2020; Ocampo-González *et al.*, 2021). Por eso, FORO implementa técnicas que permiten la inclusión de las personas de las comunidades para que puedan expresar de la mejor manera sus ideas, emociones, conocimientos y visiones durante la ejecución de los proyectos y la implementación de las SbN.

Antes que nada, FORO busca generar espacios de libertad y de confianza usando técnicas de presentación divertidas y atractivas. Las técnicas grupales consideran la oralidad como mecanismos para transmitir e intercambiar ideas, aunque también se incluyen técnicas que implican la lecto-escritura. Durante las sesiones y reuniones de trabajo, se usan diferentes materiales y recursos educativos, empleando mapas comunitarios, tarjetas de colores, murales colectivos, juegos grupales, fotografías, asignación de puntuaciones, entre otros. A la vez, FORO desarrolla técnicas grupales como lluvias de ideas, mapeos participativos, cambios de roles y momentos para una reflexión colectiva y grupal.

De esta manera, se busca generar una participación social durante la implementación de las SbN usando diferentes técnicas dentro de la educación ambiental. Considerando que los grupos de pesca son actores esenciales dentro de la RBPC y que también es necesaria la implementación de educación ambiental en la población adulta (López-Jiménez y Fernández-Montes de Oca, 2020).

Desarrollo regional sustentable

Si bien existe la manera para evaluar si las soluciones en los Pantanos de Centla cuentan con los requisitos necesarios para convertirse efectivamente en una SbN mediante el uso de

criterios e indicadores (UICN, 2020), por el momento se puede realizar una reflexión a manera de acercamiento a los principios básicos. El diseño eficaz de las SbN debe de contar con hallazgos que sean sólidos y significativos (Ozment *et al.*, 2021), así que de este modo, se puede explorar el estado de los esfuerzos y resultados de las SbN implementadas en las comunidades y ofrecer una revisión de los proyectos.

Para que una acción sea considerada una SbN, es necesario considerar los principios que las rigen y que permiten elaborar criterios de aplicación para guiar su implementación (Lázaro Marín y Antonio, 2021). Los ocho principios permiten dar sustento teórico y práctico a las SbN y relacionan a los ecosistemas con los desafíos sociales a través de soluciones activas (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Para contribuir con la reflexión de los proyectos implementados en los Pantanos de Centla, a continuación, se relacionan dichos principios con las SbN realizadas por FORO en conjunto con las comunidades.

Las SbN adoptan las normas y principios de la conservación de la naturaleza (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Las SbN implementadas en los Pantanos de Centla buscan la conservación del manglar a través de la recuperación de la cobertura de manglar mediante la siembra y la rehabilitación hidrológica, lo que repercute en la conservación de este ecosistema y sus especies asociadas. Las prácticas pesqueras permiten hacer eficiente el uso de los recursos pesqueros, lo que implica la conservación de los ecosistemas. Por otra parte, es necesario considerar que las comunidades y ejidos se ubican dentro de un área natural protegida, por lo que las acciones que se emprenden se apegan a la conservación de la naturaleza a través de las estrategias de gestión que se llegan a desarrollar en la RBPC.

Las SbN en los Pantanos de Centla comenzaron como estrategias puntuales a determinadas circunstancias, pero en la medida que avancen y las comunidades y ejidos comiencen a autogestionarse, podrán integrarse otras soluciones con otros enfoques. Se espera que las SbN se implementen de forma autónoma o integrada con otras soluciones (Cohen-Shacham *et al.*, 2016), si bien por lo pronto comenzaron aisladas, existen estrategias por parte de las comunidades y de la RBPC donde las SbN podrán integrarse más adelante.

Las acciones en los Pantanos de Centla, de manera especial la restauración ecológica (Gómez-Ruiz *et al.*, 2022), partieron de diagnósticos que permitieron tener una visión social y ambiental del territorio donde se llevarían a cabo. Por su parte, los sistemas de capacitación de agua de lluvia partieron de un desafío social externado por las propias comunidades, a

razón de que el agua es una necesidad básica que no está plenamente garantizada. Finalmente, las prácticas pesqueras surgieron del interés en continuar mejorando la pesca, pues es la base económica. Así estas SBN se insertan dentro del contexto social de los ejidos y permiten identificar los beneficios obtenidos desde la visión de las comunidades

En general, las SbN buscan aportar beneficios sociales y ambientales (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Por una parte, las estrategias de restauración ecológica impactan directamente en la conservación de los manglares, su biodiversidad y sus servicios ambientales, y las prácticas pesqueras abonan en la conservación de los organismos acuáticos que son usados dentro de la pesca. En conjunto las SbN en los Pantanos de Centla se pudieron implementar gracias a la organización social que los ejidos han construido, pero también la implementación reforzó el tejido social y se aportó para que la gobernanza comunitaria fuera más sólida mediante una mayor coordinación entre las personas, la cooperación y el compromiso con su comunidad. Las comunidades se encuentran dentro de la RBPC, por lo que las SbN en todo momento se ajustaron a las líneas de trabajo incluidas en el programa de manejo. Si bien en su momento no se contó con una visión territorial y de paisaje, sin embargo, actualmente se trabaja con estas comunidades y ejidos en la elaboración de estrategias de gestión territorial. Las SbN están incluidas dentro de estas estrategias, dado que ya han sido implementadas y a que responden de buena manera a las características socioambientales.

Las SbN atienden y se relacionan con los desafíos globales actuales de la sociedad, como lo es el cambio climático, el riesgo de desastres, el desarrollo económico y social, la salud humana, la seguridad alimentaria y del agua (Cohen-Shacham *et al.*, 2016), y la degradación ambiental y pérdida de la biodiversidad (Díaz *et al.*, 2019). Las SbN implementadas en los Pantanos de Centla representan un comienzo para abordar los desafíos actuales a los que se enfrentan las comunidades aliadas desde una visión territorial local.

Los sistemas de captación de agua de lluvia brindan en época de sequía agua de buena calidad que permite a las personas no depender del exterior de las comunidades. Esta SbN proporciona seguridad hídrica y también apoya en brindar seguridad alimentaria, dado que pueden usarla en la preparación de alimentos. A su vez, se tienen impactos positivos en la salud de las personas, pues en su alimentación se usa agua de buena calidad. Considerando las alteraciones en los patrones de lluvias y sequías, se podría garantizar agua en los momentos más críticos cuando escasee o el agua sea salada. Lo que habría que agregar en

determinado momento es apegarse al ciclo hidrológico y buscar alternativas que permitan tratar el agua residual generada para reducir la contaminación hacia los cuerpos de agua.

Las buenas prácticas pesqueras apoyan en asegurar que la producción pesquera aumente sin comprometer la conservación de los recursos pesqueros. En determinado momento estas prácticas pesqueras deben apuntar hacia una transición comercial y empresarial para ser exitosas (Castañeda-Lomas *et al.*, 2012). Por ello se debería de buscar comercialización de manera directa de su producción, explorar la posibilidad de considerar productos pesqueros distintos al camarón y a la jaiba, consolidar su nivel de desarrollo empresarial y buscar alianzas estratégicas para ampliar su distribución. A su vez, los grupos de pesca deben ser protagonistas de su reorganización y decidir qué quieren cambiar y hacia dónde quieren ir (Castañeda-Lomas *et al.*, 2012). De seguir promoviendo las prácticas pesqueras en los Pantanos de Centla, se espera contar con cooperativas exitosas y con modelos empresariales que les permitan obtener ganancias sociales y económicas, y contar con técnicas y equipos que garanticen la conservación de los recursos pesqueros.

Las SbN contribuyen a mitigar los efectos del cambio climático mediante la prevención de la pérdida de los ecosistemas (Cohen-Shacham *et al.*, 2016). Las estrategias de restauración ecológica en los Pantanos de Centla contribuyen a enfrentar el cambio climático. Los manglares de la RBPC presentan rangos de captura de carbono elevados a nivel global (Kauffman *et al.*, 2016), así que mantener y conservar estos ecosistemas brinda la oportunidad de seguir capturando en una escala local y global.

Los proyectos en los que se implementan SbN que suelen destacar tienen la característica que le dan importancia a la participación de las comunidades en la planificación y en la implementación (Ozment *et al.*, 2021). La distribución de los captadores de agua de lluvia y la selección de las personas beneficiarias se obtuvo a partir de los intereses sociales de las comunidades, sumado a cuestiones técnicas como la disponibilidad de espacio y el tipo de techos en las casas. Durante la restauración ecológica, El Palmar y Tembladeras formaron parte de la gestión territorial, pues aportaron su conocimiento, experiencias y habilidades alrededor de las acciones realizadas en los manglares y destacaron los beneficios (PNUD México, 2022). Las buenas prácticas pesqueras fueron identificadas y propuestas por los mismos grupos de pesca como primer acercamiento para su posterior implementación (López-Jiménez, 2024).

De este modo, se puede ver que las SbN buscan potenciar los beneficios de la naturaleza a la vez que se conserva la biodiversidad y los recursos naturales, apuntando en todo momento a un desarrollo regional sustentable en los Pantanos de Centla. Para seguir obteniendo estos beneficios, es preciso mencionar que las SbN requieren de inversiones necesarias (Ozment *et al.*, 2021), por lo que es necesario explorar nuevas asociaciones con organizaciones y los gobiernos para que puedan ayudar generar este tipo de proyectos.

Conclusiones

En conjunto las SbN en los Pantanos de Centla consideraron en la medida de lo posible los intereses y necesidades de las tres comunidades, y partieron de diagnósticos territoriales, lo que permitió considerar e incorporar los contextos ambientales y sociales en las que están insertas. Se espera que las SbN enfrenten y atiendan los grandes retos mundiales, como son el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, desde un contexto local y con la inclusión y participación de las comunidades. Así, se puede observar como el esfuerzo en su implementación apunta hacia el desarrollo regional sustentable, generando beneficios en las comunidades.

Agradecimientos

Se agradece a las comunidades y ejidos El Palmar, Luis Echeverría Álvarez y Tembladeras de Centla, Tabasco, por su compromiso y entusiasmo en la implementación de las SbN en sus territorios. Se agrade a Foro para el Desarrollo Sustentable por las facilidades para el desarrollo de los proyectos y estrategias. A las diferentes fuentes de financiamiento que permitieron realizar dichas acciones. Al equipo implementador: Erika Cecilia Noguera Carrasco, Raúl Alejandro Betancourth Buitrago, Mariana Arteaga Cote, Juan Paulo Carvajal Borges, Pilar Angélica Gómez Ruiz y Sonia Laura Hernández León. A la dirección de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla.

Referencias

- Barba-Macías, E., Valadez-Cruz, F., Pinkus-Rendón, M.A., y Pinkus-Rendón, M.J. (2014). Revisión de la problemática socioambiental de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 60, 50–57.
- Barra, R., Brondizio, E.S., Dhakal, S., Garland, R.M., Mulugetta, Y., Newman, P.A., Reyers, B., Samper, C., Seneviratne, S.I., van Vuuren, D., Walzer, C., Warren, R., Wernecke, B., y Wright, C.Y. (2021). Making Peace with Nature. A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. In *Making Peace with Nature*. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.18356/9789280738377>
- Carbajal-Domínguez, J.A. (2011). *Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar*. En Botello, E.A., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J.L. (eds.); Segunda, pp. 371–392). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma de Campeche.
- Castañeda-Lomas, N., Guido-Sánchez, S., y Medina-Colin, F. (2012). *Cooperativas pesqueras exitosas en Sinaloa: lecciones para aprender y compartir*. The Walton Family Foundation, Conselva, Costas y Comunidades, A. C., Universidad Autónoma de Sinaloa y Comisión Nacional de Pesca y Acuicultura.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., y Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges. In *Nature-based solutions to address global societal challenges*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2016.13.en>
- Commision, E. (2015). *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities. Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on “Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities” (full version)*. European Commission.
- CONANP, y PNUD. (2019). *Resumen Ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático del Complejo Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla - Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos*.
- De la Rosa-Velázquez, M.I., Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M.Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R., y Espejel, I. (2017). Development stressors are stronger than protected

- area management: A case of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Mexico. *Land Use Policy*, 67, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.009>
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K.A., Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Lucas, A.G., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley, G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., ... Zayas, C.N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471). <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Espinoza-Tenorio, A., y Mendoza-Carranza, M. (2015). Pesquerías costeras de Tabasco: problemáticas actuales y escenarios futuros ante el cambio climático. En *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015*. (p. 678). Programa Mexicano del Carbo, Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C. y Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Gallardo-Cruz, J. A., Fernández-Montes De Oca, A., y Rives, C. (2019). Detección de amenazas y oportunidades para la conservación en la cuenca baja del Usumacinta a partir de técnicas de percepción remota. *Ecosistemas*, 28(2), 82–99. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1611>
- García-Contreras, G., y González-Ceballos, J. (2015). *Protocolo para la elaboración de un Plan de Gestión Territorial en México*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Pronatura Península de Yucatán.
- Gómez-Ruiz, P.A., Betancourth-Buitrago, R.A., Arteaga-Cote, M., Carbajal-Borges, J.P., Teutli-Hernández, C., y Laffon-Leal, S. (2022). Fostering a participatory process for ecological restoration of mangroves in Pantanos de Centla Biosphere Reserve (Tabasco, Mexico). *Ecosystems and People*, 18(1), 112–118. <https://doi.org/10.1080/26395916.2022.2032358>
- Gómez, S., Zapata, L.A., Medina, D.P., González, S.M., Caicedo, J.A., y Baos, R.A. (2015). *Guía de buenas prácticas pesqueras. Una herramienta para la ordenación pesquera en el Pacífico Colombiano* (Issue V). WWF - Colombia.
- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J.V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R.T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T.,

- Hamsik, M.R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Guerra-Martínez, V., y Ochoa-Gaona, S. (2006). Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geograficas*, 59, 7–25. <https://doi.org/10.1177/1049731510395609>
- INE. (2000). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. Instituto Nacional de Ecología.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- INEGI. (2021). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional)*.
- IPCET. (2017). Plan de contingencia para la temporada de incendios forestales 2017. In *Gobierno del Estado de Tabasco*. [http://proteccioncivil.tabasco.gob.mx/sites/all/files/sites/pcivil.tabasco.gob.mx/fi/Plan de Contingencias para la Temporada de Incendios Forestales 2017.pdf](http://proteccioncivil.tabasco.gob.mx/sites/all/files/sites/pcivil.tabasco.gob.mx/fi/Plan%20de%20Contingencias%20para%20la%20Temporada%20de%20Incendios%20Forestales%202017.pdf)
- Kauffman, J.B., Hernandez Trejo, H., del Carmen Jesus Garcia, M., Heider, C., y Contreras, W.M. (2016). Carbon stocks of mangroves and losses arising from their conversion to cattle pastures in the Pantanos de Centla, Mexico. *Wetlands Ecology and Management*, 24(2), 203–216. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9453-z>
- Lázaro-Marín, L., y Antonio, T.P. (2021). Las soluciones basadas en la naturaleza: una fórmula ganadora para la sostenibilidad del planeta. *Ambienta*, 127(3), 10–23.
- López-Jiménez, L.N. (2024). *Buenas prácticas pesqueras en humedales de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. International Climate Initiative. <https://iki-alliance.mx/buenas-practicas-pesqueras-en-humedales-de-la-reserva-de-la-biosfera-pantanos-de-centla/>
- López-Jiménez, L.N., y Fernández-Montes de Oca, A. (2020). Pesca para todos: educación ambiental para pescadores. *Ecopedagógica*, 2(4), 26–34.
- López-Jiménez, L.N., y Fernández-Montes de Oca, A. (2021). Bases para un ordenamiento pesquero en un humedal del sureste de México. *Ciencia y Mar*, 25(74), 3–24.
- López-Jiménez, L.N., Jiménez-López, D.A., Castillo-Acosta, O., Gallardo-Cruz, J.A., y de Oca, A.I.F.M. (2020). Plantas vasculares de la Reserva de la Biosfera Pantanos de

- Centla, México. *Botanical Sciences*, 98(1), 159–204. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2279>
- López-Jiménez, L.N., Maldonado-Romo, A., Álvarez-González, C.A., Peña-Marín, E.S., y Fernández-Montes de Oca, A. (2020). Participación comunitaria en la transferencia tecnológica de un sistema acuícola de peces nativos. *JAINA Costas y Mares Ante El Cambio Climático*, 2(1), 31–46. <https://doi.org/10.26359/52462.0320>
- Manzanilla-Quiñones, U., Pozo-Montuy, G., Delgado-Valerio, P., Martínez-Sifuentes, A. R., y Aguirre-Calderón, O. A. (2021). Escenarios climáticos (CMIP-5 para la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, Esp. I*, 1–16. <https://doi.org/10.19136/era.a8nI.2588>
- Marquet, P.A., Maisa Rojas, A.S., Fariás, L., González, H., Muñoz, J.C., Wegemann, E., Rojas, C., Rodríguez, I., y Hoyos, J. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5736938>
- Mata-Zayas, E.E., Gama, L., Vazquez-Navarrete, C., Diaz Lopez, H., Figueroa Maheng, J. M., y Ricnón Ramirez, J. (2017). Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos en la zona de influencia costera de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, ante la elevación del nivel medio del mar asociada al cambio climático. In A. V. Botello, S. Villanueva, J. Gutiérrez, y J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras de latinoamérica al cambio climático* (pp. 173–203). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Campeche. <https://www.redicomar.com/wp-content/uploads/2018/10/Vulnerabilidad-de-las-Zonas-Costeras-de-Latinoamérica-al-Cambio-Climático.pdf>
- Medrano-Pérez, O.R., Payano-Almánzar, R., y López-Jiménez, L.N. (2021). Caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, México. *Acta Universitaria*, 31, 1–24. <https://doi.org/http://doi.org/10.15174.au.2021.2846>
- Mendoza-Carranza, M. (2008). El manejo de productos pesqueros en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco. In *Manejo, procesamiento primario y transformación de los productos pesqueros con énfasis en los recursos de la Reserva de*

- la Biosfera Pantanos de Centla* (pp. 13–25). El Colegio de la Frontera Sur.
- Mendoza-Carranza, M., Arévalo-Frías, W., e Inda-Díaz, E. (2013). Common pool resources dilemmas in tropical inland small-scale fisheries. *Ocean and Coastal Management*, 82, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.06.004>
- Mendoza-Carranza, M., Martínez-Gutiérrez, M.L., Segura-Berttolini, E., Romero-Rodríguez, Á., y Hernández-López, A. (2008). *Memorias del taller diagnóstico de la pesca en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. La perspectiva social de la pesca en los Pantanos de Centla*. El Colegio de la Frontera Sur.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being*. Island Press.
- Novelo-Retana, A. (2006). *Plantas acuáticas de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Espacios Naturales y Desarrollo Sustentable.
- Ocampo-González, P., Rodas-Trejo, J., y González-Ramón, M. del C. (2021). Conocimiento, percepciones y usos del *Crocodylus moreletti* en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(I), 1–13. <https://doi.org/10.19136/era.a8ni.2664>
- Ochoa-Gaona, S., Ramos-Ventura, L.J., Moreno-Sandoval, F., Jiménez-Pérez, N. del C., Haas-Ek, M.A., y Muñoz-Delgado, L.E. (2018). Diversidad de la flora acuática y ribereña en la cuenca del río Usumacinta, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(Suplem.), S3–S44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2015.04.009>
- Ozment, S., González, M., Schumacher, A., Oliver, E., Morales, A. G., Gartner, T., Silva, M., Grünwaldt, A., y Watson, G. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza en América Latina y el Caribe: situación regional y prioridades para el crecimiento*. Banco Interamericano de Desarrollo e Instituto de Recursos Mundiales. <http://dx.doi.org/10.18235/0003687>
- ParksWathc. (2003). *Perfil de Parque - México Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla*.
- Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J.V., y Hernández-Gómez, M. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000–2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, 25(3), 1–19. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531779>

- PNUD México. (2022). *Manglares: restauración social y ecológica para enfrentar el cambio climático*. manglares: restauración social y ecológica para enfrentar el cambio climático%0A
- Ramos-reyes, R., Zavala-cruz, J., Gama-campillo, L.M., Pech-pool, D., Ortiz-pérez, M.A., Zavala-cruz, J., y Ortiz-pérez, M.A. (2016). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581–598.
- RAN. (2024). *Archivo SHAPE que identifica los polígonos ejidales o comunales certificados por entidad federativa*.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J.F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rivero-Bustos, M. E., & Córdova-Rodríguez, M. Á. (2008). *Sistema de captación y conducción de agua de lluvia. Manual de instalación*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Roxburgh, T. (2018). The importance of nature to the world's economies. In *Living Planet Report 2018: Aiming higher* (pp. 17–19). WWF.
- Sánchez Cruz, E. (2019). *Los pantanos de Centla. Esperanza y desarrollo. Un acercamiento sociológico a la cultura del agua*. Inspira Profundo.
- UICN. (2020). *Orientación para usar el Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales Citación:
- UNESCO. (2021). *The World in 2030. Public Survey Report*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Watson, R. (2022). The climate and biodiversity crises - two sides of the same coin. In *Living Planet Report 2022 - Building a nature-positive society* (pp. 16–17). WWF.
- WWAP. (2018). The United Nations World Water Development Report 2018. Nature-Based Solutions for Water. In *UN Water Report*. United Nations Educational, Scientific and

Cultural Organization.

Zenteno-Ruiz, C.E., Zamora-Cornelio, L.F., Cabrera-Pérez, S., y Carrillo-Torres, D.M. (2004). Captura y uso del fuego en el aprovechamiento de las tortugas dulceacuícolas en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla. In L. Gama, S. Ochoa-Gaona, y C. Chiappy (Eds.), *Etnopaisaje, trabajo comunitario y manejo y conservación de recursos naturales* (pp. 106–116). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, El Colegio de la Frontera Sur y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Capítulo 11. Servicios ambientales de las especies arbóreas de Paseo Tabasco y el Parque la Pólvara, en la ciudad de Villahermosa, Tabasco

Lucía Sanaphre-Villanueva²⁴

Candelario Peralta Carreta²⁵;

Ofelia Castillo Acosta²⁶

Francisco Javier Álvarez Sánchez²⁷

Resumen

En la ciudad de Villahermosa, Tabasco, se evaluaron los servicios ecosistémicos del arbolado en el Parque La Pólvara y la Avenida Paseo Tabasco, con el objetivo de generar información para su protección, cuidado y para la toma de decisiones de una manera informada. Para ello, se utilizó el programa i-Tree Eco, desarrollado por el Servicio Forestal de EUA. Se registraron 1559 árboles de 55 especies, con una cobertura promedio del 63%. El 62% de los árboles se ubicaron en el Parque la Pólvara, y 38% en Paseo Tabasco. Las especies más abundantes fueron el macuilis (*Tabebuia rosea*) con 42.61% de los individuos, y la palma real (*Roystonea regia*) con el 11.57%. Del total de especies registradas, 32 tienen potencial de aprovechamiento, principalmente de frutos, hojas, semillas y flores. Los árboles del Parque la Pólvara almacenan aproximadamente 374.25 t de carbono en sus tejidos leñosos (con un valor de \$1,380,108.98 pesos), y secuestran cada año con su crecimiento 25.52 t (\$94,116.75); producen además 68.1 t/año de O₂ y evitan el escurrimiento de 941.43 m³ de agua de lluvia al año (que evita gastos por \$42,278.89). Los árboles de Paseo Tabasco almacenan 225.54 t de carbono (\$831,703.25), secuestran 15.99 t de carbono/año

²⁴ Investigadora por México CONAHCYT adscrita al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C.; Doctora en Ciencias por el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Maestra en Gestión Integrada de Cuencas por la Universidad Autónoma de Querétaro. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5566-7230>

²⁵ Maestro en Ciencias Ambientales, Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-9791>

²⁶ Profesora Investigadora de tiempo completo en la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Doctora en Ciencias (Botánica) por el Colegio de Postgraduados; Maestra en Ciencias por la Facultad de Ciencias de la UNAM. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8005-728X>

²⁷ Doctor en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Director General del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0115-9841>

(\$58,982.56); producen 42.7 t/año de O₂ y evitan el escurrimiento de 470.01 m³ de agua/año (\$21,107.85). Considerando la importancia del arbolado urbano por los múltiples beneficios que ofrecen a la población, es necesaria la concientización de los tomadores de decisiones y de los pobladores en general, para su conservación y mantenimiento dentro del área urbana y fuera de ella.

Palabras clave: *almacenamiento de carbono, oxígeno, área foliar, provisión, regulación, soporte, cultura, usos.*

Introducción

La degradación de la naturaleza avanza a un ritmo alarmante, amenazando la biodiversidad y los ecosistemas esenciales para la vida en la Tierra. Tanto la creciente pérdida de la biodiversidad (Butchart *et al.*, 2010; Reddy *et al.*, 2016; Maxwell *et al.*, 2016; Brashares y Gaynor, 2017; Pacheco *et al.*, 2021), como el drástico incremento del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera a partir de la era industrial (Core Writing Team IPCC *et al.*, 2014) han superado límites planetarios (Clavel *et al.*, 2011; Cardinae *et al.*, 2012; Bowler, 2021). Esto implica una incertidumbre respecto a las consecuencias a mediano y largo plazo de estos cambios inducidos por el hombre, poniendo en riesgo la estabilidad y resiliencia social y ecológica (Rockström *et al.*, 2009).

Esta situación exige la toma de acciones no solo en ambientes naturales, sino también en los ambientes urbanos, en los que para el año 2018 vivía el 55% de la población mundial (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019). Aunque las áreas urbanas representan una pequeña porción de la superficie terrestre, concentran altas densidades poblacionales, con la consecuente producción de desechos, contaminantes de aire, agua y suelo, y las más altas emisiones de carbono. Debido a que todo esto tiene consecuencias negativas para su población, los ecosistemas asociados cobran una especial importancia para armonizar las relaciones humanas con la naturaleza (Luederitz *et al.*, 2015). Una adecuada planeación urbana requiere que tanto los tomadores de decisiones, como la población en general, conozcan el valor del arbolado y ecosistemas urbanos y periurbanos, y de los efectos directos e indirectos que tienen en su bienestar. Una herramienta valiosa para

este fin es cuantificar los servicios ecosistémicos que proveen. Éstos se definen como los beneficios que obtenemos de manera directa o indirecta de la naturaleza, y que se clasifican en cuatro tipos: culturales, de regulación, de aprovisionamiento y de sostenimiento (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

A. Servicios culturales

Estos son los servicios intangibles, es decir, beneficios reales pero no físicos de los ecosistemas (Balvanera *et al.*, 2017). Los parques y el arbolado urbano proveen una gran diversidad de este tipo de servicios, que pueden clasificarse en tres tipos: 1) beneficios físicos, como el acondicionamiento derivado del ejercicio, lo que genera mayor energía; la estimulación de la mente y los sentidos, y mejorar el desempeño cognitivo; 2) beneficios psicológicos, pues la naturaleza tiene efectos antidepresivos y recreativos; favorece la relajación, el bienestar y la liberación del estrés, y 3) beneficios sociales, pues estimulan la convivencia entre personas, incrementan el sentimiento de pertenencia e identidad social, reducen el aislamiento social, e incrementan el sentido de responsabilidad debido a los lazos que se establecen con la naturaleza (Roloff, 2015).

B. Servicios de regulación

Son los beneficios que se derivan de los procesos ecosistémicos, y que modulan condiciones que experimentamos, como el clima, la fertilidad del suelo o las inundaciones (Balvanera *et al.*, 2017). Los servicios de regulación urbano se relacionan de forma principal con el aire, el agua y el suelo.

Por lo que respecta al aire, el arbolado urbano es clave pues en su follaje se depositan contaminantes emitidos tanto por los vehículos como por fuentes fijas asociadas a la generación de productos y servicios. También atrapan partículas suspendidas, en especial las micropartículas (por ejemplo, PM₁₀) que tienen profundos efectos negativos en la salud. De esta forma, contribuyen de manera directa a mejorar la calidad del aire (Nowak, 1994).

Por lo que respecta al agua, la vegetación atrapa sedimentos y absorbe nutrientes disueltos que provienen de fuentes contaminantes, como fertilizantes agrícolas, mejorando su calidad (Singh *et al.*, 2023). Además, al oponer resistencia al movimiento del agua y del viento, minimizan los daños a la infraestructura causados por inundaciones (Berland *et al.*, 2017). En cuanto al suelo, el sistema radicular y la producción de materia orgánica de la vegetación lo enriquece, le da textura, incrementa su capacidad de retención e infiltración del agua, y disminuye su susceptibilidad a erosionarse (Hao *et al.*, 2021).

Otro servicio del arbolado urbano de gran importancia es la regulación de la temperatura. Las superficies urbanas suelen ser de ladrillo, láminas, asfalto, cemento o concreto, materiales que tienen gran capacidad de almacenar e irradiar calor. Dentro de las ciudades, en las áreas donde este tipo de materiales predomina, la temperatura puede incrementarse en varios grados, generando islas de calor que incrementan el malestar o incomodidad, y que pueden tener efectos adversos en la salud (Sun *et al.*, 2024). Los árboles minimizan estos efectos al transformar la energía radiante del sol en energía química, removiendo así parte de la energía solar que de otra forma se convertiría en calor (Cherif *et al.*, 2024).

C. Servicios de aprovisionamiento

Éstos se refieren a los bienes de los ecosistemas que pueden ser extraídos y consumidos (Balvanera *et al.*, 2017), como alimentos, materias primas para la construcción, materiales para juguetes y herramientas, medicinas y forraje.

D. Servicios de sostenimiento

Son los procesos fundamentales, a través de los cuales se producen el resto de los servicios (Balvanera *et al.*, 2017). La fotosíntesis es uno de los servicios más importantes porque influye en los flujos de energía en el planeta. En este proceso, las plantas usan la energía del sol para transformar el agua y el CO₂ del aire en carbohidratos y todas las moléculas necesarias para construir sus tejidos; finalmente se genera oxígeno. Esto es importante porque el CO₂ es una molécula con alta capacidad de almacenamiento de calor, que contribuye al efecto invernadero. Los árboles almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa, removiéndolo de la atmósfera, y contribuyen a su almacenamiento en el suelo (Livesley *et*

al., 2016). Cuando los árboles son eliminados o mueren naturalmente, la biomasa se degrada, transformando la materia orgánica y liberando nuevamente el carbono como CO₂.

Los árboles participan también en el ciclaje de nutrientes como el nitrógeno, fósforo, carbono etc., porque remueven estos nutrientes del suelo para sus procesos metabólicos, y se reincorporan nuevamente al suelo cuando los tejidos muertos se descomponen (madera, raíces, hojarasca) (Livesley *et al.*, 2016). Adicionalmente, numerosas especies de árboles de la familia de las leguminosas forman en sus raíces nódulos con bacterias, que permiten transformar el nitrógeno disuelto en el aire en una forma de nitrógeno disponible para las plantas en el suelo, incrementando así su fertilidad (Adams *et al.*, 2016).

Dada la amplia gama de beneficios que provee el arbolado y los ecosistemas urbanos y periurbanos, el objetivo de este trabajo fue cuantificar los servicios que brinda el arbolado urbano a la población de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Para ello, se elaboró un censo de los individuos en la avenida Paseo Tabasco y en el Parque la Pólvora, para determinar su composición y estructura, e identificar algunos de sus servicios ambientales, generando así información para su protección y cuidado, y para la toma de decisiones.

Métodos

Se realizaron inventarios de los árboles y palmeras del Parque La Pólvora y a lo largo de la Avenida Paseo Tabasco, en Villahermosa, Tabasco, durante los meses de mayo a octubre de 2023. Se midieron todos los individuos con un diámetro a la altura del pecho (1.3 m desde el suelo) ≥ 10 cm. Para cada uno, se registró el sitio, las coordenadas, la especie y las siguientes variables: altura total y altura de la parte viva del árbol, altura del tronco hasta el inicio de la copa, ancho y alto de la copa, diámetro a la altura del pecho, porcentaje muerto de la copa y exposición solar de la copa. Para ello, se utilizaron una cinta diamétrica y un telémetro láser TruPulse Laser Rangefinder 360R. Los datos se analizaron en el programa i-Tree Eco v. 6.1.51. La descripción metodológica de las mediciones en campo, de los análisis estructurales, y de la obtención de los servicios ambientales, pueden encontrarse en Nowak (2021). Debido a que algunas determinaciones se hacen por hectárea, se definió para el Parque la Pólvora una superficie de 12.4 hectáreas, y para la avenida Paseo Tabasco una superficie de 7.2 hectáreas (que se obtuvo multiplicando una longitud aproximada de 4.5 km

por 16 metros de ancho en promedio). A partir de estos análisis, se obtuvieron las siguientes estimaciones: Área foliar, biomasa foliar, Valor de Importancia Relativo (VIR, que calcula como la suma del porcentaje de la población y porcentaje del área foliar); fijación y secuestro de carbono, agua de lluvia interceptada, escurrimiento evitado, producción de oxígeno, y materias primas que pueden derivarse de los árboles. También se obtuvieron los beneficios económicos del secuestro de carbono y escurrimiento evitado con un tipo de cambio de 17.21427 pesos por dólar.

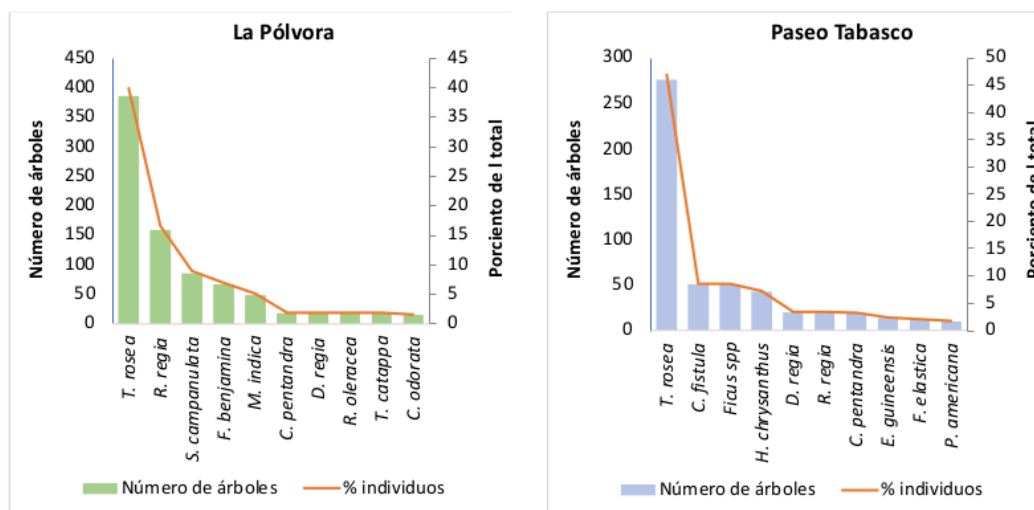
Resultados

Estructura y composición de la vegetación arbórea

Se registraron un total de 1,556 individuos, con una cobertura promedio del 63%. Los individuos pertenecen a 51 especies identificadas y cuatro especies de *Ficus* aún pendientes de identificar, que se analizaron juntas a nivel de género (Tabla 11.1). Considerando el total de individuos en los dos sitios, la especie más abundante fue el macuilís (*Tabebuia rosea*) con 42.61% de los individuos, y la palma real (*Roystonea regia*) con el 11.57%. El resto de las especies representaron el 6% o menos de los individuos registrados.

En el Parque la Pólvora se encontraron 41 especies que pertenecen a 17 familias botánicas; el 49.7% de los individuos pertenecen a la familia Bignoniaceae, y el 20.9% a la familia Arecaceae (Tabla 11.1). De éstas, el 79% son nativas de Norteamérica. El restante 21% provienen de África, Asia, Oceanía y Sudamérica. En Paseo Tabasco se registraron 36 especies pertenecientes a 19 familias botánicas; el 55.6% de los individuos corresponden a la familia Bignoniaceae, el 12.5% a la familia Fabaceae y el 12% a la familia Moraceae. De las especies registradas en esta avenida, 60.3% son nativas de Norteamérica y el resto de África, Asia, Oceanía y Sudamérica.

La gráfica 11.1 muestra las 10 especies más abundantes en cada sitio. En la Pólvora sobresale sobre todo el macuilis, que representa el 40% del arbolado, y la palma real con el 17%. El resto de las especies representan menos del 10 % del total. En Paseo Tabasco también el macuilis es la especie más dominante con un 47 %, y el resto de las especies comprenden menos del 10% de la abundancia.



Gráfica 11.1. Número de individuos en las especies más abundantes en cada sitio y el porcentaje que representan del total. En Paseo Tabasco, *Ficus spp.* comprende individuos de varias especies de ficus aún en proceso de identificación.

Tabla 11.1. Número de individuos de cada especie registrados por sitio.

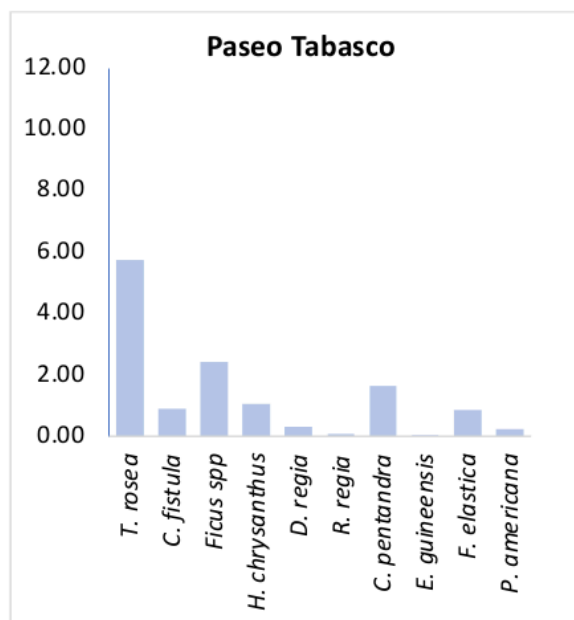
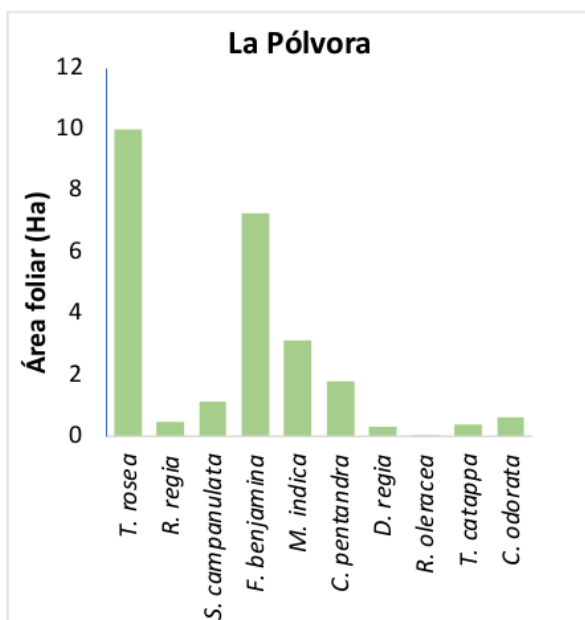
Familia	Especie	La Pólvera	Paseo Tabasco
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale</i>	4	
	<i>Mangifera indica</i>	49	2
Arecaceae	<i>Adonidia merrillii</i>	11	5
	<i>Bactris guineensis</i>	3	
	<i>Cocos nucifera</i>	2	2
	<i>Elaeis guineensis</i>		14
	<i>Phoenix dactylifera</i>		2
	<i>Roystonea oleracea</i>	18	20
	<i>Roystonea regia</i>	160	
	<i>Sabal mexicana</i>	1	7
	<i>Sabal sp</i>	7	
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	8	43
	<i>Spathodea campanulata</i>	86	8
	<i>Tabebuia rosea</i>	386	277

Familia	Especie	La Pólvara	Paseo Tabasco
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i>	2	8
Casuarinaceae	<i>Casuarina equisetifolia</i>		1
Combretaceae	<i>Terminalia catappa</i>	18	6
Fabaceae	<i>Cassia fistula</i>	3	51
	<i>Delonix regia</i>	19	20
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	1	
	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	4	1
	<i>Gliricidia sepium</i>	1	
	<i>Lysiloma sp</i>		1
	<i>Piscidia piscipula</i>	1	
	<i>Pithecellobium dulce</i>	3	
	<i>Samanea saman</i>	8	
	<i>Tamarindus indica</i>	5	1
Lamiaceae	<i>Vitex sp</i>		3
Lauraceae	<i>Cinnamomum verum</i>	2	
	<i>Persea americana</i>	8	10
	<i>Persea sp</i>	1	
Malpighiaceae	<i>Byrsonima crassifolia</i>	14	1
Malvaceae	<i>Ceiba pentandra</i>	19	19
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	2	1
	<i>Sterculia apetala</i>		1
Meliaceae	<i>Azadirachta indica</i>		1
	<i>Cedrela odorata</i>	15	3
	<i>Swietenia macrophylla</i>	7	1
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i>	68	8
	<i>Ficus elástica</i>		12
	<i>Ficus spp</i>	5	51
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	4	1
Nyctaginaceae	<i>Bougainvillea glabra</i>		1
Polygonaceae	<i>Coccoloba sp</i>		1

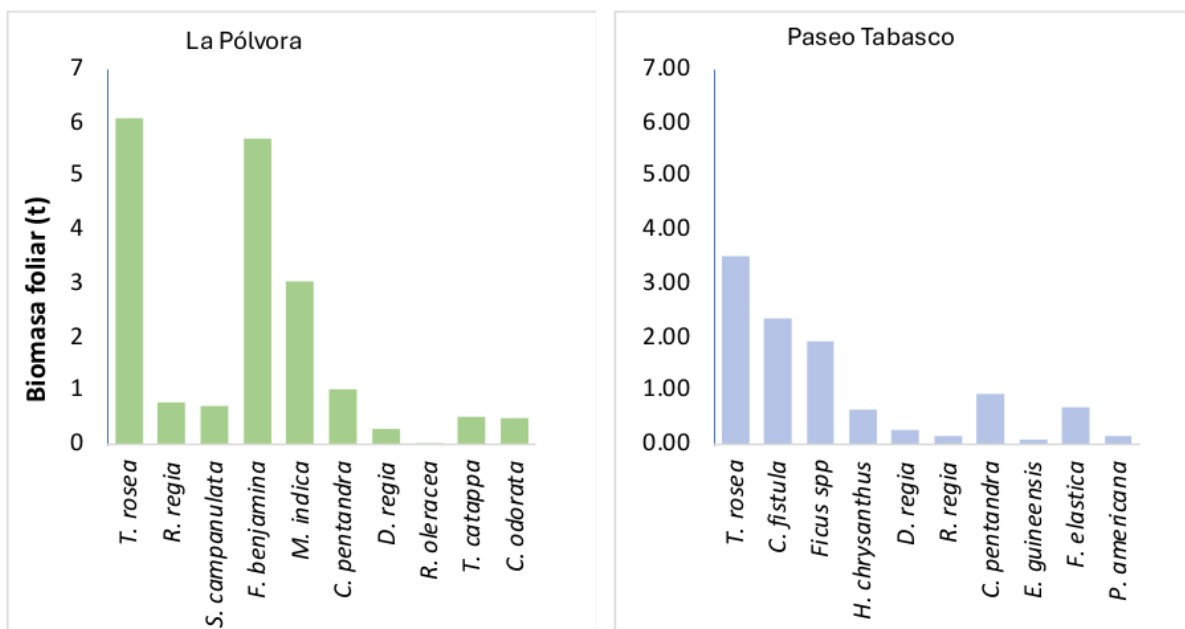
Familia	Especie	La Pólvera	Paseo Tabasco
Rubiaceae	<i>Genipa americana</i>	1	
Rutaceae	<i>Citrus aurantium</i>	4	
	<i>Citrus limon</i>	4	
Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i>		1
Sapindaceae	<i>Melicoccus bijugatus</i>	2	2
Sapotaceae	<i>Chrysophyllum cainito</i>	2	
	<i>Manilkara zapota</i>	2	
Strelitziaceae	<i>Ravenala madagascariensis</i>	6	4

Área foliar y biomasa foliar

Los valores más altos de área foliar (Gráfica 11.2) fueron del macuilís (*T. rosea*) y las especies de Ficus. Lo mismo ocurrió con la biomasa foliar (Gráfica 11.3), aunque también tuvieron valores altos algunas otras especies como el mango (*Mangifera indica*) en La Pólvera o la lluvia de oro (*Cassia fistula*) en Paseo Tabasco.



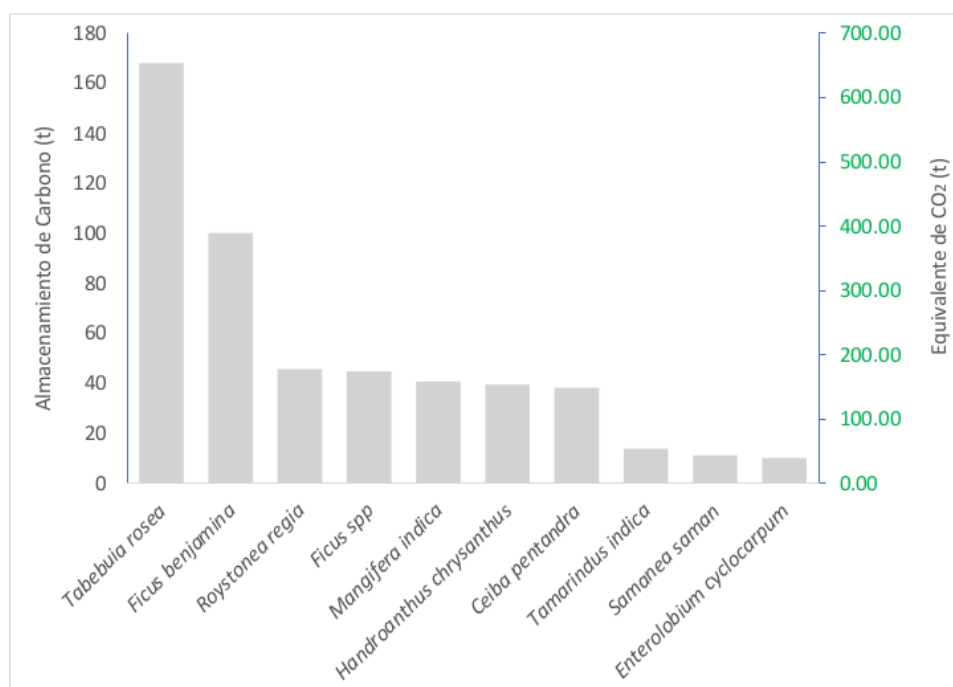
Gráfica 11.2. Área foliar (Ha) de las especies más abundantes en cada sitio.



Gráfica 11.3. Biomasa foliar (t) de las especies más abundantes en cada sitio.

Fijación y secuestro de carbono

El almacenamiento de carbono es la cantidad de carbono capturada en el tronco y las raíces. En el Parque la Pólvera, con el mayor número de árboles entre los que se incluyen los de mayor talla, el carbono almacenado fue de 374.25 t, mientras que en la avenida Paseo Tabasco fue de 225.54 t. Las especies que más contribuyen al almacenamiento de carbono (Gráfica 11.4) son el macuilís y el *Ficus benjamina*.



Gráfica 11.4. Almacenamiento de carbono en los tejidos de las especies más abundantes de ambos sitios (Paseo Tabasco y Parque la Pólvora) y su equivalente en CO₂.

Efectos hidrológicos

El escurrimiento total evitado en ambos sitios se estimó en 1,411.44 m³/año. Los beneficios hidrológicos de forma separada para el arbolado en el Parque la Pólvora y en Paseo Tabasco se muestran en la Tabla 11.2. El impacto económico que se muestra se relaciona con la reducción de la infraestructura necesaria para desalojo y control del agua pluvial y reducir la contaminación que produce su arrastre hasta lagunas y el mar. Los cálculos muestran una reducción de costos para el año 2021 de \$63,386.74 pesos. Las especies que brindan mayores servicios hidrológicos son las que tienen el área foliar mayor y más número de individuos, como el macuilis y el *Ficus benjamina* (Tabla 11.3).

Tabla 11.2. Efectos hidrológicos totales del arbolado urbano para cada sitio.

Variables	Unidad	La Pólvora	Paseo Tabasco	Total
Número de árboles	individuos	966	590	1,556

Área foliar	(ha)	29.94	14.95	44.89
Posible evapotranspiración	(m ³ /año)	42,993.94	21,464.85	64,458.79
Evaporación de la superficie de las hojas	(m ³ /año)	4,488	2,240.64	6,728.64
Transpiración	(m ³ /año)	22,081.28	11,024.14	33,105.42
Agua interceptada	(m ³ /año)	4,488	2,240.64	6,728.64
Escurrimiento evitado	(m ³ /año)	941.43	470.01	1,411.44
Valor del escurrimiento evitado	(Mex\$/año)	\$42,278.89	\$21,107.85	\$63,386.74

El valor del escurrimiento evitado se calcula por el precio Mex\$44.909/m³. La estación meteorológica de Villahermosa reportó 63.9 centímetros de la precipitación anual total. Eco siempre utiliza las mediciones por hora que tengan la mayor cantidad de lluvia total o la lluvia enviada por el usuario, si la hubiera.

Producción de oxígeno

La cantidad de oxígeno producido en La Pólvara fue de 5488.60 kg/año/ha (es decir, un total de 68,058.64 kg/año) y en Paseo Tabasco de 5923.90 kg/año/ha (es decir, un total de 42,652.08 kg/año).

Materias primas

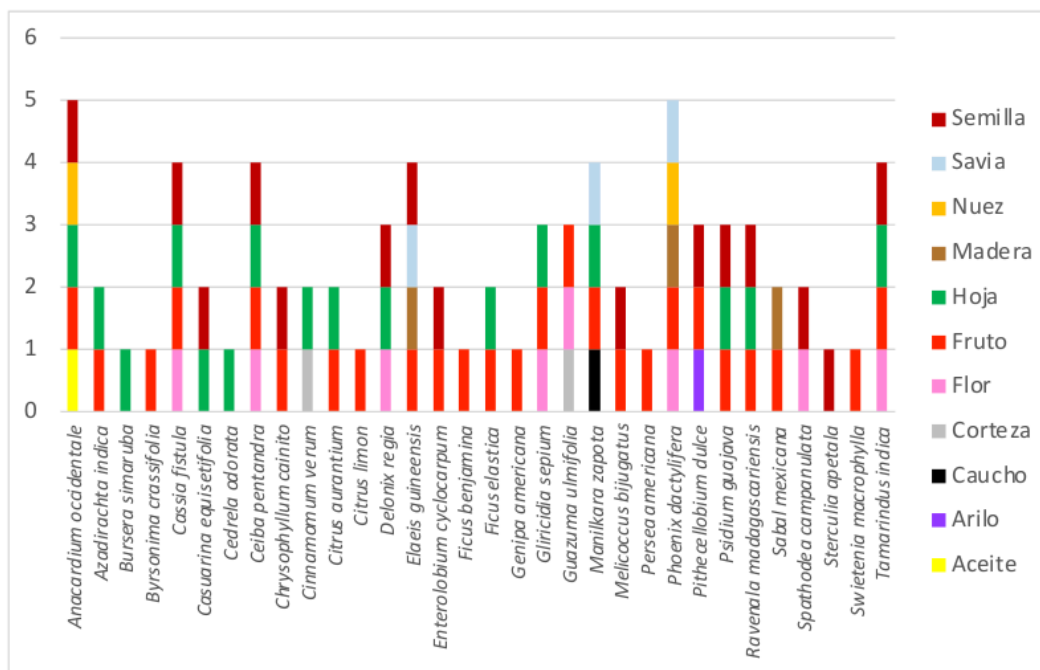
De las especies analizadas en los dos sitios, existen aprovechamientos reportados en la literatura científica para 32 de ellas. En la mayoría de estos casos se aprovechan los frutos, las hojas, las semillas y las flores (Gráfica 11.5). La nuez de la india (*Anacardium occidentale*) y la palma datilera (*Phoenix dactylifera*) fueron las especies con el mayor número de usos reportados, cinco, seguidos por la lluvia de oro (*C. fistula*), la ceiba (*Ceiba pentandra*), la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), el zapote (*Manilkara zapota*) y el tamarindo (*Tamarindus indica*), con cuatro.

Tabla 11.3. Efectos hidrológicos por especie, considerando la suma de los individuos de Paseo Tabasco y Parque la Pólvera.

Nombre de la especie	Número de foliar	Área (ha)	Potencial evapotranspiración (m³/año)	Evaporación (m³/año)	Transpiración (m³/año)	Agua interceptada	Escurrimiento evitado	Valor del escurrimiento evitado
<i>Tabebuia rosea</i>	663	15.76	22623.85	2361.63	11619.40	2361.63	495.39	22247.58
<i>Roystonea regia</i>	180	0.56	809.89	84.54	415.95	84.54	17.73	796.42
<i>Spathodea campanulata</i>	94	1.46	2094.15	218.60	1075.53	218.60	45.86	2059.32
<i>Ficus benjamina</i>	76	7.42	10656.57	1112.40	5473.11	1112.40	233.34	10479.33
<i>Cassia fistula</i>	54	1.00	1432.67	149.55	735.81	149.55	31.37	1408.85
<i>Mangifera indica</i>	51	3.14	4512.32	471.03	2317.48	471.03	98.81	4437.27
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	51	1.28	1844.13	192.50	947.13	192.50	40.38	1813.46
<i>Delonix regia</i>	39	0.67	958.59	100.06	492.32	100.06	20.99	942.65
<i>Ceiba pentandra</i>	38	3.47	4987.35	520.61	2561.46	520.61	109.21	4904.40
<i>Terminalia catappa</i>	24	0.58	826.67	86.29	424.57	86.29	18.10	812.92
<i>Cedrela odorata</i>	18	0.72	1032.49	107.78	530.28	107.78	22.61	1015.32
<i>Persea americana</i>	18	0.62	888.28	92.72	456.21	92.72	19.45	873.51
<i>Roystonea oleracea</i>	18	0.01	12.18	1.27	6.26	1.27	0.27	11.98
<i>Adonidia merrillii</i>	16	0.01	21.28	2.22	10.93	2.22	0.47	20.92
<i>Byrsonima crassifolia</i>	15	0.49	704.55	73.55	361.85	73.55	15.43	692.83

<i>Elaeis guineensis</i>	14	0.06	79.26	8.27	40.71	8.27	1.74	77.94
<i>Ficus elástica</i>	12	0.89	1276.31	133.23	655.50	133.23	27.95	1255.08
<i>Bursera simaruba</i>	10	0.35	501.06	52.30	257.34	52.30	10.97	492.72
<i>Ravenala</i>	10	0.02	31.49	3.29	16.17	3.29	0.69	30.96
<i>madagascariensis</i>								

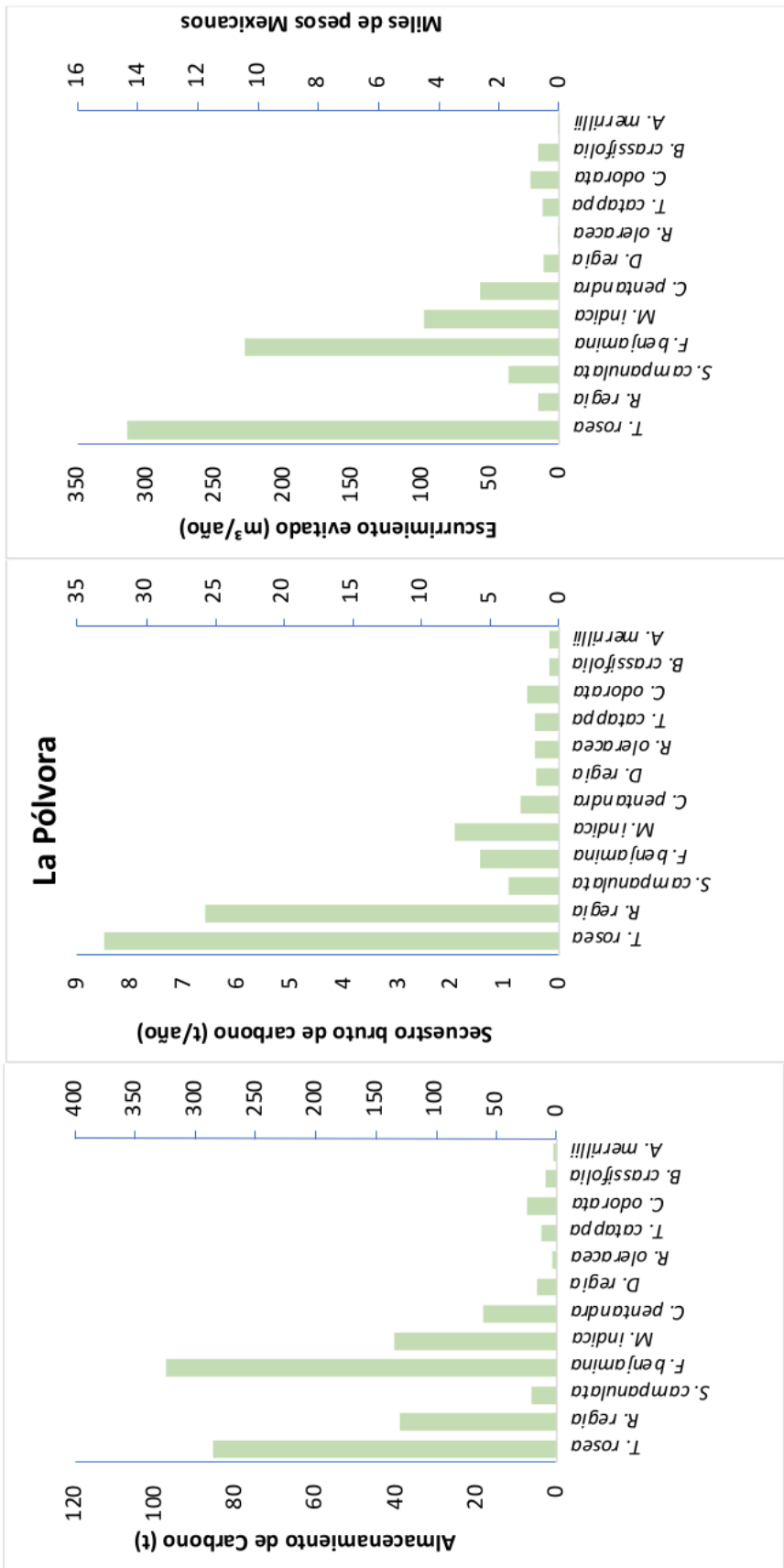
Sin embargo, estos usos son potenciales, por lo que pueden existir otras especies y productos que se aprovechan en la actualidad y que no han sido incluidas en esta lista, que pueden ser de gran relevancia para los Tabasqueños.



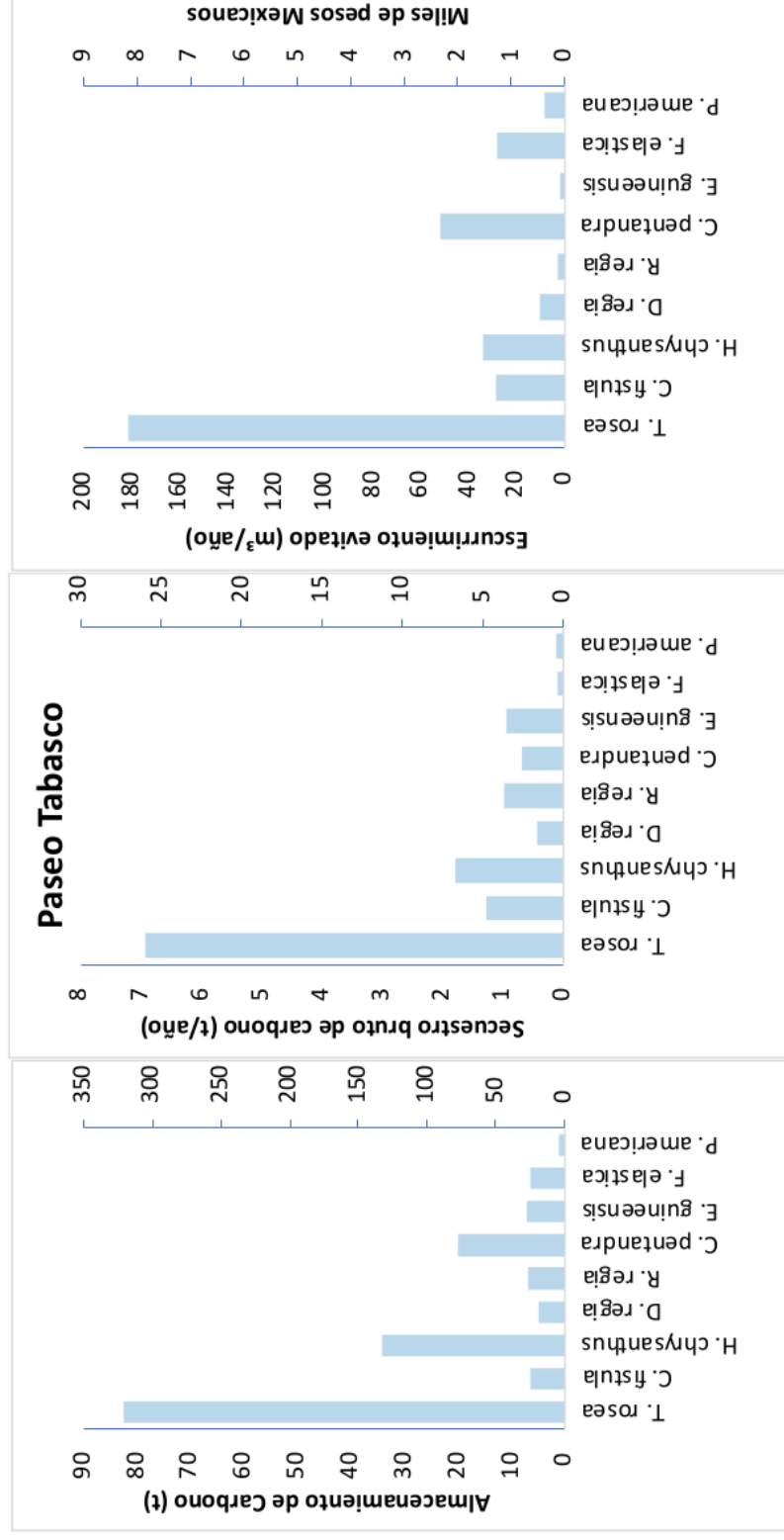
Gráfica 11.5. Especies para las que se ha reportado algún uso. Es posible que localmente se den usos adicionales, y que las especies no incluidas también sean aprovechadas.

Beneficios económicos de los servicios ambientales

Los beneficios económicos derivados de los servicios ecosistémicos en cada sitio para las especies más abundantes se observan en las Gráficas 11.6 y 11.7. En total, el secuestro bruto de carbono tuvo un valor de \$153,099.31 pesos mexicanos (\$98.39/árbol), y el escurrimiento evitado de \$63,386.74 (\$40.74/árbol).



Gráfica 11.6. Beneficios proporcionados por los árboles del Parque la Pólvera. En el eje y del lado izquierdo se muestra el servicio ambiental, y en el derecho el beneficio en miles de pesos mexicanos. Se muestran únicamente las especies con al menos 10 individuos.



Gráfica 11.7. Beneficios proporcionados por los árboles de Paseo Tabasco. En el eje y del lado izquierdo se muestra el servicio ambiental, y en el derecho el beneficio en miles de pesos mexicanos. Se muestran únicamente las especies con al menos 10 individuos.

Discusión

El valor que tiene el arbolado urbano sólo puede ser entendido a través del conocimiento de su riqueza, diversidad, estructura y función, y de la cuantificación de sus servicios ecosistémicos. Por ello, para tener una aproximación de este valor en la ciudad de Villahermosa, Tabasco, se evaluó el arbolado presente en el Parque La Pólvara y a lo largo de la Avenida Paseo Tabasco.

Riqueza de especies

En los dos sitios analizados se encontraron 55 especies en total. Considerando únicamente el Parque La Pólvara, el número de especies se reduce a 41, distribuidas en 6.85 ha de superficie terrestre (la superficie es de 12.4 ha si se incluyen las lagunas), lo que equivale a 6 especies/ha. Este número es bajo en comparación con otras ciudades de clima tropical o subtropical. Por ejemplo, en Oaxaca, en 26 parques con una superficie total de 13.3 ha, se registraron 115 especies, que equivalen a 8.6 especies/ha (de la Concha, 2022), y en el Parque La Ceiba de Quintana Roo, con una superficie de 1 ha, se registraron 79 especies (de la Concha *et al.*, 2017). La riqueza de especies en La Pólvara es más similar a la registrada en parques de una ciudad con un clima templado como León, Guanajuato, donde se registraron 104 especies en varios parques con una superficie total de 19.47 ha, lo que equivale a 5 especies/ha (de la Concha, 2020).

Esto sugiere que, a pesar del clima tropical de Tabasco, y a que en ecosistemas naturales de la región existe una alta diversidad de especies arbóreas (por ejemplo la reserva Yu-balcah, en Tacotalpa; Maldonado-Sánchez *et al.*, 2016), el Parque la Pólvara tiene un número muy reducido de especies en relación a las que podría tener. En los resultados se observa que existe una marcada preferencia por el macuilís (*Tabebuia rosea*) sobre cualquier otra especie. Sin embargo, sería deseable incrementar la diversidad en el Parque la Pólvara, priorizando árboles sobre palmeras, que aportan una mayor provisión de servicios ambientales (lo que se puede observar en los resultados por especie), y utilizando una mayor variedad de otras especies nativas.

Favorecer una alta diversidad en la vegetación urbana es fundamental. Desde hace décadas se han observado los efectos nocivos que tiene una baja diversidad de especies en la salud de una cubierta vegetal. Por ejemplo, se han descrito casos en los que una plaga puede eliminar la vegetación de un parque cuando predomina una especie de árbol susceptible (Owen, 1975). Además, el uso de especies exóticas tampoco es recomendable pues a menudo se caracterizan por un alto vigor, gran

habilidad de adaptarse, alta capacidad de reproducción y falta general de enemigos naturales, por lo que tienen el potencial de ser muy competitivas y desplazar a las especies nativas (McKinney, 2006). En cambio, una alta diversidad de la vegetación urbana provee de una mayor diversidad de servicios ambientales, y tiene la capacidad de amortiguar eventos desfavorables como plagas, enfermedades o eventos hidrometeorológicos extremos, pues las especies tienen diferentes capacidades de responder a ellos (McKinney, 2006). Esto se debe a que los factores que pueden causar un daño severo a una especie pueden tener un efecto limitado sobre otras, lo que incrementa la resiliencia y favorece el mantenimiento en el largo plazo de la cobertura arbórea de la ciudad.

Los servicios ecosistémicos dependen de las características de las especies

La contribución de cada especie en la generación de servicios ecosistémicos no sólo depende del número de individuos presentes, sino también de su morfología, fisiología, tamaño y arquitectura. Por ejemplo, el macuilís, la especie más abundante en ambos sitios (42.6% del total de árboles registrados), fue la más importante almacenando carbono (Gráfica 11.4). Sin embargo, el *Ficus benjamina* fue la segunda especie que más carbono almacenó en sus tejidos, aunque representa sólo el 4.9% del total de los individuos registrados. En Paseo Tabasco, el guayacán representó sólo el 7% de los individuos registrados, pero almacenó el 15% del carbono total, y retuvo el 11% del carbono secuestrado. La Ceiba sólo representó el 3% de los individuos en la avenida, pero almacenó el 9% del carbono total.

Esto demuestra que para incrementar los servicios ecosistémicos en el ámbito urbano, deben considerarse ciertas características de las especies para su selección (Liang y Huang, 2023). Por ejemplo, las plantas leñosas de gran porte minimizan la erosión del suelo al evitar el golpe directo del agua de lluvia sobre éste gracias a su follaje. También lo hacen incrementando los aportes de materia orgánica con ramas y hojarasca, que además de representar obstáculos físicos para el desprendimiento y arrastre del suelo, le da una mejor estructura e incrementa su permeabilidad (Burylo *et al.*, 2012). Por ende, las características de la copa y de las hojas, así como la altura del árbol, pueden ser características clave para una selección de especies enfocada en minimizar la erosión (Liang y Huang, 2023). Si el interés es el almacenamiento y secuestro de carbono, sería deseable seleccionar especies con una mayor densidad de madera y alto contenido seco de las hojas, y con una alta densidad del follaje, características asociadas a una larga durabilidad de los tejidos y baja descomponibilidad, lo que hace que el carbono sea retenido por mucho tiempo en los tejidos

y en el suelo (De Deyn *et al.*, 2008). Si el interés es contribuir a la calidad del aire, el área foliar, el tamaño y grosor de la copa y la densidad del follaje serían características más importantes (Liang y Huang, 2023).

Sin embargo, además de los rasgos asociados a los servicios ambientales, es importante considerar otras características de las especies que pueden tener implicaciones económicas, como el daño que las raíces pueden causar en la infraestructura urbana (Shi *et al.*, 2023). En el caso que nos ocupa, se registró que entre las especies más ampliamente utilizadas en la ciudad, se encuentran el framboyán, el tulipán africano, la ceiba y varias especies de ficus (sobresaliendo *Ficus elástica* y *Ficus benjamina*), las cuales pueden proporcionar una alta cantidad de servicios ambientales por las características de su follaje y acumulación de biomasa. Sin embargo, estas especies tienen raíces altamente invasivas, masivas y superficiales que pueden romper las banquetas y tuberías (Vargas-Garzón y Molina-Prieto, 2012). Por esta razón, aunque no son recomendables para avenidas y calles, es posible su uso en áreas extensas, como los parques urbanos.

Conclusiones

El arbolado urbano es de gran importancia no sólo por su belleza estética y por su valor recreativo, sino también porque cumple con diversas funciones biológicas que resultan en la provisión de servicios ecosistémicos para la población. Cada especie de árbol provee de beneficios diferentes de acuerdo con sus características morfológicas, fisiológicas, de tamaño y arquitectura, por lo que las especies más adecuadas dependerán del lugar urbano de que se trate (camellón, banqueta, parque), y de los servicios ecosistémicos que se deseen maximizar.

Es importante promover una alta diversidad de especies nativas en las ciudades, ya que esto no solo incrementa la resiliencia del arbolado urbano, sino que también contribuye a la protección de la biodiversidad. A pesar de que el mantenimiento del arbolado urbano tiene un costo económico, éste es compensado por los beneficios económicos que proveen, y por los servicios de soporte, regulación, provisión y culturales que brindan a la población.

Referencias

- Adams, M.A., Turnbull, T.L., Sprent, J.I., y Buchmann, N. (2016). Legumes are different: Leaf nitrogen, photosynthesis, and water use efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4098–4103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1523936113>
- Balvanera, P., Quijas, S., Karp, D.S., Ash, N., Bennett, E. M., Boumans, R., Brown, C., Chan, K. M.A., Chaplin-Kramer, R., Halpern, B.S., Honey-Rosés, J., Kim, C.K., Cramer, W., Martínez-Harms, M.J., Mooney, H., Mwampamba, T., Nel, J., Polasky, S., Reyers, B., y Walz, A. (2017). Ecosystem Services. In Walters, M. y Scholes, R.J. (Eds.), *The GEO Handbook on Biodiversity Observation Networks* (pp. 39-78). Springer International Publishing. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-27288-7_3
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W.D., Garmestani, A.S., Goddard, H.C., Herrmann, D.L., y Hopton, M.E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Bowler, D.E. (2021). Complex causes of insect declines. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10), 1334–1335. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01508-x>
- Brashares, J.S., y Gaynor, K.M. (2017). Eating ecosystems. *Science*, 356(6334), 136–137. <https://doi.org/10.1126/science.aan0499>
- Burylo, M., Rey, F., Bochet, E., y Dutoit, T. (2012). Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion. *Plant and Soil*, 353(1), 135–144. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1017-2>
- Butchart, S.H.M., Walpole, M., Collen, B., van Strien, A., Scharlemann, J.P.W., Almond, R.E.A., Baillie, J.E.M., Bomhard, B., Brown, C., Bruno, J., Carpenter, K.E., Carr, G.M., Chanson, J., Chenery, A.M., Csirke, J., Davidson, N.C., Dentener, F., Foster, M., Galli, A., Watson, R. (2010). Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, 328(5982), 1164–1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>
- Cardinae, B.J., Emmett Duffy, J., Kinzig, A.P., Daily, G.C., Loreau, M., Grace, J.B., Larigauderie, A., Srivastava, D.S., Naeem, S., Gonzalez, A., Hooper, D.U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G.M., Tilman, D., y Wardle, D.A. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity: RIO+20 - Second Chance for the Planet. *Nature*, 486(7401), 59–67.
- Cherif, N., Lasram, A., Lopes, H.S., y Silva, L. (2024). The extent of the impact of green spaces on urban heat islands: a meta-analysis of research using remote sensing between 2010 and 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4534390/v1>

- Clavel, J., Julliard, R., y Devictor, V. (2011). Worldwide decline of specialist species: Toward a global functional homogenization? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(4), 222–228. <https://doi.org/10.1890/080216>
- Core Writing Team IPCC, Pachauri, R.K., y Meyer, L.A. (eds.). (2014). IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- De Deyn, G.B., Cornelissen, J.H.C., y Bardgett, R.D. (2008). Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 11(5), 516–531. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01164.x>
- De la Concha Dupret H. (2020). Inventario del arbolado urbano, León, Gto. Gobierno del Municipio de León y Agrinet Sa de CV. Guanajuato, México. 61 p.
- De la Concha H. (2022). Plan para el manejo integral del arbolado urbano del municipio de Oaxaca de Juárez. Secretaría de Medio Ambiente y Cambio Climático del Municipio de Oaxaca de Juárez, y Agrinet SA de CV. Oaxaca, México, 206 p.
- De la Concha, H. 2016. Inventario del arbolado urbano de la ciudad de Mérida. Ayuntamiento de Mérida y Agrinet SA de CV. Yucatán, México. 62 p.
- De la Concha, H., Sánchez, E., y Pech, C. 2017. Resultados del censo del arbolado de Parque La Ceiba 2017. Playa del Carmen, Quintana Roo, México. 91 p.
- Hao, H., Qin, J., Sun, Z., Guo, Z., y Wang, J. (2021). Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils. *CATENA*, 203, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105378>
- Liang, D., y Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. *Land*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/land12091699>
- Livesley, S.J., McPherson, E.G., y Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Luederitz, C., Brink, E., Gralla, F., Hermelingmeier, V., Meyer, M., Niven, L., Panzer, L., Partelow, S., Rau, A.-L., Sasaki, R., Abson, D. J., Lang, D. J., Wamsler, C., y von Wehrden, H. (2015). A review of urban ecosystem services: Six key challenges for future research. *Ecosystem Services*, 14, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.05.001>

- Maldonado-Sánchez, E.A., Ochoa-Gaona, S., Ramos-Reyes, R., Guadarrama-Olivera, M. de los Á., González-Valdivia, N., y de Jong, B.H.J. (2016). La selva inundable de canacoite en Tabasco, México, una comunidad vegetal amenazada. *Acta Botánica Mexicana*, 115, 75–101.
- Maxwell, S.L., Fuller, R.A., Brooks, T.M., y Watson, J.E.M. (2016). Biodiversity: The ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, 536(7615), 143–145. <https://doi.org/10.1038/536143a>
- McKinney, M.L. (2006). Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3), 247–260. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.005>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press.
- Nowak, D.J. (2021). Understanding i-Tree: 2021 Summary of programs and methods (NRS-GTR-200-2021; p. NRS-GTR-200-2021). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021>
- Nowak, D.J. (1994). Air pollution removal by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G; Nowak, D.J.; Rowntree, R.A. (eds.), Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Gen. Tech. Rep. NE-186. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 63–81.
- Owen DF. (1975). Lessons from a Caterpillar Plague in London's Berkeley Square. *Environmental Conservation*, 2(3):171-177. 9
- Pacheco, P., Mo, K., Dudley, N., Shapiro, A., Aguilar-Amuchastegui, N., Ling, P.Y., Anderson, C., y Marx, A. (2021). Deforestation Fronts. Drivers and responses in a changing world (p. 12). WWF.
- Reddy, C.S., Manaswini, G., Satish, K.V., Singh, S., Jha, C.S., y Dadhwal, V.K. (2016). Conservation priorities of forest ecosystems: Evaluation of deforestation and degradation hotspots using geospatial techniques. *Ecological Engineering*, 91, 333–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.007>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S.I., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P., Costanza, R., Svedin, U., y Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>

- Roloff A. (2015). Chapter 1: Urban trees- Importance, benefits, problems. En: Urban tree management for the sustainable development of green cities. Roloff A. Ed. Wiley Blackwell. Primera edición.
- Shi, F., Meng, Q., Pan, L., y Wang, J. (2023). Root damage of street trees in urban environments: An overview of its hazards, causes, and prevention and control measures. *Science of The Total Environment*, 904, 166728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166728>
- Singh, O., Kar, S.K., y Reddy, N.M. (2023). Impact of forestry interventions on groundwater recharge and sediment control in the ganga river basin. *Open Journal of Forestry*, 13(01), 13-31. <https://doi.org/10.4236/ojf.2023.131002>
- Sun, J. (2024). Uncovering the nexus between urban heat islands and material stocks of built environment in 335 chinese cities. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c04739>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Urbanization. Prospects 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421).
- Vargas Garzón, B., y Molina Prieto, L.F. (2012). *Ficus benjamina* L. in the cities: High number of individuals, severe damages to infrastructure and expensive economic losses. Nodo: Arquitectura. Ciudad. *Medio Ambiente*, 7(13), 93–101.

Capítulo 12. Desafíos en la gestión del agua de tabasco: un análisis desde la geopolítica hídrica

Lilia Gama Campillo*²⁸

Coral Jazvel Pacheco-Figueroa**

Ena Edith Mata-Zayas***

Juan de Dios Valdez Leal****

Eduardo Javier Moguel Ordoñez*****

Hilda María Díaz López*****

Resumen

La geopolítica analiza cómo los factores geográficos, físicos y biológicos influyen en las decisiones políticas y las relaciones entre estados. Este análisis integra aspectos físicos y socioeconómicos para entender su efecto en el poder y la seguridad del territorio. La delimitación geográfica es esencial para establecer referencias claras de localización y responsabilidad del estado. Tabasco, con una historia profundamente entrelazada con el agua, cuenta con una vasta red hidrológica dominada por los ríos Usumacinta y Grijalva. Estos ríos, vitales para las actividades productivas y socio-económicas, actualmente generan desafíos asociados entre otras cosas al cambio climático como incremento en inundaciones por la variabilidad hidroclimática. En ese sentido, la gestión del agua es un desafío multifacético que requiere una comprensión coordinada y equitativa de los recursos hídricos. La Región Hidrológica-Administrativa XI Frontera Sur, que abarca Chiapas, Tabasco y una parte de Campeche, es vital por su riqueza en este recurso. Las civilizaciones maya

²⁸ *Doctora en Ciencias Botánica. División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5417-9697>

**Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Tropicales. División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5281-9251>

***Doctora en Ciencias Biológicas División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7673-3081>

****Doctor en Ecología y Manejo de Recursos Tropicales. División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0315-2400>

*****Doctor en Ciencias. División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1641-6794>

*****Maestra en Ciencias Ambientales. División Académica de Ciencias Biológicas, de la Universidad Autónoma de Tabasco, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7754-9072>

y olmeca florecieron gracias a su abundancia y hoy enfrenta retos ambientales como la deforestación, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad. La geopolítica del agua resalta la necesidad de una gestión coordinada y equitativa de los recursos hídricos para promover la seguridad hídrica, el desarrollo sostenible y la estabilidad regional. Los planes sectoriales de agua, basados en la Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), son esenciales para enfrentar estos desafíos. La Constitución de 1917 establece que las aguas son propiedad de la nación, y la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 1992 regula su gestión. En México, la legislación hídrica ha evolucionado para enfrentar los retos derivados del crecimiento demográfico, la urbanización, la contaminación y el cambio climático, y una gestión eficaz del agua, requiere de una coordinación interjurisdiccional y participación comunitaria. Los Consejos de Cuenca son mecanismos clave para lograr una gestión integrada y participativa, con potencial para asegurar la sostenibilidad y equidad en su distribución a través de la gobernanza. Lamentablemente, hoy estos en vez de fortalecerse y capacitarse, aparentemente están sin función, centralizando las decisiones en el gobierno federal, con cambios en la regionalización hídrica-administrativa.

Palabras clave: *gobernanza, territorio, política ambiental, consejo de cuenca.*

Introducción

Los cambios globales que impactan la hidrodinámica regional están modificando la geografía de Tabasco, comprometiendo el futuro bienestar de la población, y las políticas implementadas no evolucionan al mismo ritmo para solventarlos. En ese sentido, la geopolítica es un método de estudio y análisis espacial, que examina la influencia de factores geográficos en las acciones políticas y en las relaciones entre los estados. Se enfoca en cómo las características físicas de un territorio, tales como su ubicación, recursos naturales, clima y topografía, impactan en las decisiones políticas y estratégicas de los estados (Herrera-Santana, 2018). Este proceso parte en primer lugar, de lo que implica la capacidad de delimitar geográficamente un espacio, que es lo que permite al mismo establecer referencias claras de localización y responsabilidad. El espacio delimitado, se convierte en el escenario donde se toman decisiones con importantes implicaciones para la población y el entorno, adaptándose a las transformaciones del territorio a lo largo del

tiempo, mismas que evolucionan interactuando con fenómenos locales, regionales, nacionales y globales que las influyen.

En ese sentido, la geopolítica actúa como una herramienta esencial para entender la complejidad de los factores e intereses que configuran el espacio geográfico, proporcionando un marco analítico para evaluar cómo la multiplicidad de elementos y dinámicas interrelacionadas influyen en la configuración y evolución del territorio. Esto permite, una comprensión profunda y matizada de los procesos a diferentes escalas geográficas y temporales (Ferro-Núñez *et al*, 2017). Se reconocen tres escalas básicas, global, nacional y local, siendo esta última, la que permite identificar las problemáticas de los municipios, y desde ahí influir en los procesos locales del territorio, generando un intercambio bidireccional con la escala regional.

Partiendo de esta base, el principal objetivo de la geopolítica es el de canalizar el conocimiento integral de una región, para orientar las acciones políticas, buscando potenciar los beneficios de estas y a la vez que amortiza los impactos que pudieran generar. En México, la autoridad responsable de la administración del agua es el ejecutivo federal, quien la ejerce a través de la Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (LAN, 2023), que, para tener una administración eficiente, subdivide al país en Regiones Hidrográfico-Administrativas (Gobierno de México, 2023), considerado diferentes instrumentos de seguimiento como son los Consejos de Cuenca. Este capítulo tiene como objetivo, partir de una reflexión en el tiempo, de la geopolítica de Tabasco, como una estrategia para analizar como el agua conforma, delimita y da sustento socio-económico al territorio, impulsando el bienestar local, y como cambios administrativos generan decisiones políticas que debilitan la gobernanza regional y centralizan el poder amenazando con desacelerar el desarrollo, en particular por los retos que el cambio climático está potenciando, como inundaciones más frecuentes y extensas, asociadas a fenómenos globales como los fenómenos de “El niño” o “La niña” que han incrementado su frecuencia.

Tabasco una visión geopolítica vinculada al agua

El Estado-Nación mexicano de acuerdo con García (2006), nació, con un “conocimiento estructurado de su territorio”, basado en el trabajo previo de españoles que marcaron las divisiones políticas. Esta delimitación para la región fue originalmente nombrada por Aguilar como Tazcoob, que correspondía al espacio gobernado por un cacique, cuando Juan de Grijalva lo describió, como

parte de la zona del “aluvión entre las orillas del mar del Golfo de México y la falda Septentrional de la Sierra-madre”, de norte a sur, y desde la laguna de Mezcalapa en Las Choapas, Veracruz, a la laguna de Términos en Campeche (Gil y Sáenz, 1872). Sus habitantes hablaban una sola lengua y se comunicaban territorialmente a través de vías fluviales, lo que hoy podría ser identificado como una unidad sociocultural (Cabrera-Bernat, 1994), territorio cedido a Montejo en 1535 por la corona española, referida como, tierra pantanosa incomprensida por los conquistadores, donde los chontales florecían por su vinculación con el agua. Tierra que hoy representan las llanuras y pantanos tabasqueños, limitando al occidente con el río de Coatzacoalcos y al oriente con la zona kárstica de Yucatán (Figura 12.1),

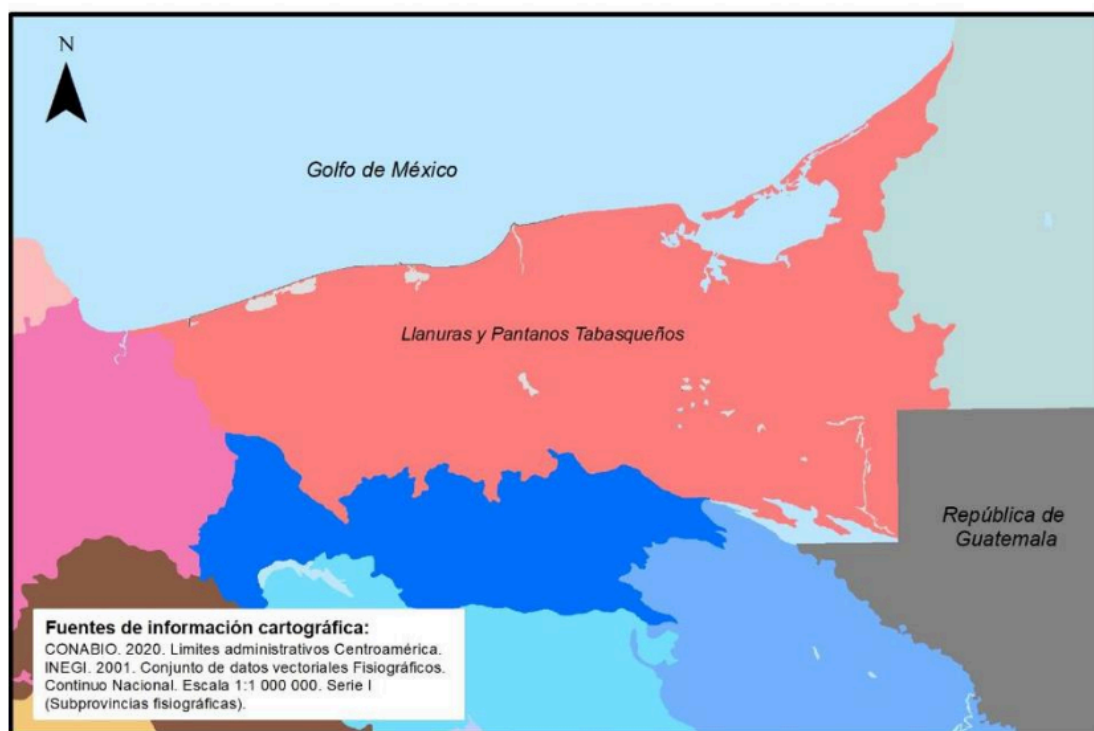


Figura 12.1. Zona fisiográfica Llanuras y Pantanos Tabasqueños, que dan sustento a la primera delimitación geográfica de Tabasco, conocida originalmente como *Tazcoob*.

En ese sentido, se aprecia que, desde tiempos prehispánicos, las culturas que habitaron Tabasco, como los olmecas y los mayas, desarrollaron una relación íntima con la intrincada hidrografía de este aluvión. Estos primeros habitantes, conocían sus recursos, y utilizaron los ríos y lagunas tanto

para el transporte, como para la pesca y la agricultura. Mientras la civilización Olmeca, primera reconocida en este territorio y considerada la "cultura madre" de Mesoamérica, se estableció en áreas cercanas a ríos y lagunas costeros, utilizando el agua para irrigación y como vía de transporte, la cultura maya de Tabasco, que también dependió del agua para la agricultura y comercio, construyó canales y sistemas de almacenamiento, extendiéndose hasta la zona selvática del sur del estado (Cabrera-Bernat, 1982).

Durante la época colonial, el virrey de la Nueva España Gaspar de Zúñiga, establece las bases tributarias del pueblo que habitaba la región, conocido como "Ahualulca", término que según Marcos F. Becerra viene de agua, (Cabrera-Bernat, 1982). Con el tiempo, conquistadores y piratas reconocieron la importancia de los ríos de Tabasco para la navegación y el comercio, estableciendo asentamientos y puertos fluviales, utilizados para la explotación de recursos naturales como el palo de tinto y maderas preciosas (Díaz-Perera y de los Santos González, 2021). De acuerdo con una cédula real expedida a Montejo en 1533, los territorios de Tabasco comprendían de la región de Las Chopas en Veracruz a Laguna de Términos, Campeche, limitando al sur con la zona montañosa de Chiapas (Cabrera-Bernat, 1982), o sea lo que corresponde a la subprovincia fisiográfica de Llanuras y Pantanos Tabasqueños (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], s/f). En 1811, entre los últimos límites gestionados ante el gobierno de la Nueva España, y debido a los cambios continuos en la región del río Coatzacoalcos, José Eduardo de Cárdenas señala que "no hay mojones estables", y sugiere un cambio en el límite occidental, proponiendo el río Tonalá, y en 1787 la zona de Laguna de Términos pasó a formar parte de la intendencia de Yucatán (Cabrera-Bernat, 1982). Respecto al límite con Chiapas, Tabasco se expandió al sur siguiendo la forma de los ríos Tonalá, Mezcalapa, Sierra, Teapa, Pichucalco, Tulijá, Usumacinta, Chacamax y San Pedro Mártir, de ahí la forma de tres picos del mismo (Cabrera-Bernat, 1982), límite que después ajustado, por los gobiernos estatales. En 1824, la nascente nación, revisó "peculiaridades del territorio nacional" para establecer el sentido "geopolítico o geocultural de los lugares", que se señala en la Constitución de 1824 (Gobierno de México, 1824), donde se reconocen los límites de 19 estados entre ellos Tabasco. Sin embargo, respecto a parte sur del límite oriental, correspondiente al margen izquierdo del Usumacinta junto con una parte de los petenes y del soconusco que pertenecían a Tabasco, fueron negociados por México con Guatemala en 1882, lo que le dio a Tabasco un límite político que refleja el actual (Cabrera-Bernat, 1982).

Cabe aclarar, que si bien, el límite político de Tabasco fue conformándose históricamente con la participación de diferentes actores, se consideró en él, tanto características físicas del territorio, como fronteras naturales, ya que seguía el cauce de los ríos, además de características culturales como la lengua utilizada localmente, el cual se ajustó, mediante acuerdos políticos posteriores. En ese sentido, como en cualquier cambio de límites políticos, las causas varían y pueden ser debido a cuestiones históricas que buscan proteger y promover la identidad cultural de grupos étnicos o comunidades locales, causas legales por reclamos hechos por comunidades, o asociadas a temas demográficos, económicos o administrativos que buscan mejorar la administración y la prestación de servicios públicos locales. Sin embargo, cuando los límites son naturales, estos pueden cambiar con el tiempo debido a fenómenos naturales como terremotos, inundaciones o la erosión, en una región con una hidrodinámica en evolución, un río puede cambiar su curso, alterando así el límite propuesto originalmente y esto debe tener un seguimiento.

Geopolítica del agua, un desafío para Tabasco

El estado de Tabasco está conformado por una vasta red hidrológica, con numerosos afluentes que forman un complejo sistema de drenaje, y es conocido por su abundancia de ríos, lagunas, pantanos y humedales, dominado por dos de los ríos más caudalosos de México: Usumacinta y Grijalva, que no solo han moldeado su paisaje, sino también su desarrollo económico, social y cultural. El río Usumacinta, es considerado el más grande de México en términos de caudal y es uno de los más importantes de Mesoamérica. Nace en Guatemala y después de atravesar Chiapas, llega a Tabasco para conformar en parte la zona del área natural protegida “Pantanos de Centla”, antes de unirse al río San Pedro y el Grijalva y desembocar en el Golfo de México (Cotler, 2010). Esta área natural protegida, de carácter federal, es considerada uno de los sistemas de humedales más importantes de América, y alberga una rica biodiversidad, que incluye aves, reptiles y peces. Por otro lado, el río Grijalva que nace en Chiapas conforma el sistema hidroeléctrico del Grijalva con las presas: Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas, después de lo cual ingresa al territorio tabasqueño, con un largo recorrido que lo une al río Usumacinta en Pantanos de Centla, antes de desembocar en el Golfo de México (Figura 12.2; Cotler, 2010).

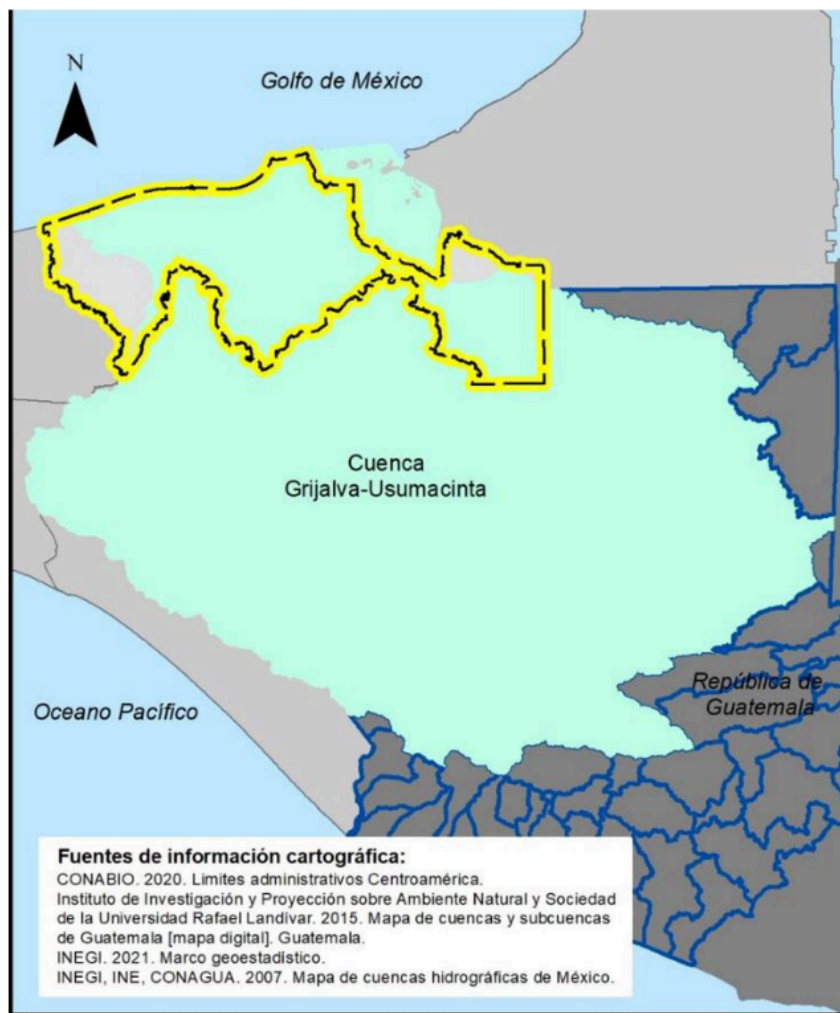


Figura 12.2. Delimitación de la cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta.

El agua ha sido fundamental en el desarrollo y la economía de la región en especial la cuenca baja en Tabasco, como fuente de recursos, y transporte, para las diferentes actividades productivas, sin embargo, enfrenta el desafío constante de inundaciones, que son un riesgo debido a la geografía plana y la alta pluviosidad. En un inicio, la población enfrentaba estos eventos como parte de la dinámica natural que generaban un aporte a su economía, ya que permitían el enriquecimiento de los suelos y el acceso a recursos pesqueros, conocida como “la cultura del agua”. En cambio, en la actualidad las inundaciones representan nuevos desafíos, ya que, por efectos del calentamiento global, han incrementado en intensidad, duración y extensión, causando daños significativos a la infraestructura y las viviendas e impactado tanto a las comunidades rurales como urbanas (Gama

et al., 2019). Actualmente ya se ven reflejados en el sureste de México, los efectos del cambio climático, con retos en cuanto a las anomalías registradas de temperatura como de precipitación que impactan todos los sectores, comprometiendo su sustentabilidad. Durante la última década, a nivel mundial se han superado los valores máximos de temperatura, lo que se ha reflejado también en intensas sequías. De acuerdo con el monitor de sequía de CONAGUA (Conagua, 2024), para el organismo de cuenca Frontera Sur XI, desde 2003 se han experimentado períodos importantes de sequía, comprometiendo el acceso al agua para diferentes actividades. Sin embargo, estas han sido particularmente fuertes en los municipios de la cuenca Grijalva- Usumacinta, llegando a ser extremas, especialmente para Tabasco. Por otro lado, de acuerdo con Andrade-Velázquez (2017), los problemas de inundación recurrentes en la región, en especial en la cuenca media y baja tiene una tendencia a incrementar, especialmente por los cambios en los fenómenos que modulan el clima en la región, como es El Niño-Oscilación del Sur y las modificaciones antrópicas a la región que causan deforestación.

En este contexto, es importante comprender regionalmente, como este recurso es “compartido” entre estados, para identificar los retos. La geopolítica y el agua están intrínsecamente relacionadas, ya que la gestión de los recursos hídricos tiene profundas implicaciones políticas y estratégicas que históricamente han generado conflictos en diferentes partes del mundo (Kloster, 2016). En el sureste de México, una región caracterizada por su riqueza hídrica, pero también por su vulnerabilidad a problemas de gestión y distribución, la gestión del agua es un desafío complejo y multifacético, su relación con la geopolítica, se ve reflejada en la necesidad de una gestión coordinada y equitativa de los recursos hídricos para promover la seguridad hídrica, para el desarrollo sostenible y estabilidad de la región. La comprensión de esta dinámica es esencial para formular políticas efectivas que aborden los desafíos actuales y futuros relacionados con este recurso vital. Además, la delimitación geopolítica, entendida como las fronteras políticas y administrativas que dividen el territorio, juega un papel crucial en la implementación y eficacia de los planes sectoriales del agua en los estados, buscan asegurar la disponibilidad, calidad y sostenibilidad del recurso hídrico a través de medidas específicas y políticas públicas.

Además, en México, la legislación en materia de agua ha evolucionado para enfrentar los desafíos derivados del crecimiento demográfico, la urbanización, la contaminación y el cambio climático. Sin embargo, muchas veces el sistema se enfrenta a leyes mal planeadas o difícilmente aplicables, donde “la administración, trabaja sobre el ideal de una ley” (Mestre, 2005). Esta intención de

regulación del agua se remonta en México a la época prehispánica, cuando las civilizaciones mesoamericanas ya desarrollaban sistemas de gestión hidráulica avanzados. Con la llegada de los españoles, las leyes de Las Indias regularon el uso del agua en las colonias y posteriormente, durante el México independiente, se promulgaron diversas leyes y reglamentos que, aunque fragmentados, sentaron las bases para una regulación del recurso hídrico.

Destaca que en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917 se establece en su Artículo 27, que las aguas son propiedad de la nación, lo que permitió al Estado regular el uso y aprovechamiento de este recurso. Sin embargo, hoy es la Ley de Aguas Nacionales (LAN), decretada en 1992 el sustento legal de la legislación hídrica en México. Esta ley fija un marco integral para la gestión del agua, promoviendo su uso sostenible y la protección de los ecosistemas acuáticos y ha sido objeto de diversas reformas para adaptarse a los nuevos desafíos ambientales y sociales (LAN, 2023). En ella se crea la CONAGUA, encargada de administrar y preservar las aguas nacionales, y se establecen los mecanismos para la participación de los usuarios en la toma de decisiones a través de lo que se conoce como Consejos de Cuenca. Actualmente, esta ley incluye también la protección de los derechos humanos al agua y al saneamiento, y la incorporación de criterios de equidad y sostenibilidad en la distribución del agua, en concordancia con la reforma en 2012 del Artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), para reconocer este como un derecho humano, con lo que el Estado se obliga a garantizar estos derechos e implementar políticas públicas que aseguren su cumplimiento.

Respecto a la gestión de este recurso, la legislación mexicana promueve la GIRH “Gestión Integral de Recursos Hídricos” (GIRH) (LAN, 2023), que es un enfoque integral, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos y ambientales y las interdependencias entre las cuencas hidrográficas y los usuarios del agua. Además, promueve la coordinación y la administración de agua, tierra y otros recursos, de manera equitativa y sostenible, coordinando las acciones de diferentes sectores y niveles de gobierno. Esta gestión inició su implementación, a través de Consejos de Cuenca, establecidos por la LAN, que son, espacios donde se involucran diversos actores para la toma de decisiones sobre el uso y conservación del agua en cada cuenca hidrográfica.

Coparticipes en materia legal están un conjunto de leyes nacionales, federales y generales que abordan también el tema del agua desde diferentes perspectivas. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente establece las bases para la protección, conservación y

restauración del medio ambiente, incluyendo los recursos hídricos. La Ley de Desarrollo Rural Sustentable promueve el desarrollo rural sostenible para mejorar la calidad de vida de la población rural, e incluye disposiciones sobre el uso y manejo sostenible del agua para actividades agrícolas y pecuarias, fomentando prácticas que reduzcan la sobreexplotación y contaminación de los recursos hídricos. La Ley General de Cambio Climático establece las bases para enfrentar los efectos del cambio climático, incluyendo la gestión del agua como un componente crucial y promueve medidas de adaptación y mitigación para proteger los recursos hídricos y asegurar su disponibilidad y calidad frente a los impactos del cambio climático. Independientemente, varias leyes tocan aspectos administrativos del agua a nivel federal y cada estado al igual que Tabasco tiene su propia legislación al respecto, en concordancia con la LAN y otras leyes federales. Estas leyes locales abordan la gestión del agua a nivel estatal y municipal, adaptándose a las condiciones y necesidades específicas de cada estado.

Planes, programas y políticas sectoriales

Junto con el sustento legal en México, el artículo 26 de la CPEUM, señala que el instrumento para implementar el sistema de planeación democrática del desarrollo nacional es el Plan Nacional de Desarrollo (PND), que recoge las aspiraciones y demandas de la sociedad por medio de un proceso democrático y deliberativo. De este plan de desarrollo derivan obligatoriamente todos los programas de la Administración Pública Federal (APF), que se vinculan con los tratados internacionales y leyes federales. Sin embargo, el hecho de que nuestro país este conformado por varios estados, y cada uno tenga su propio gobierno y políticas sectoriales representa un reto en el tema del agua. Esta fragmentación administrativa genera desafíos significativos, ya que las diferencias en las políticas y regulaciones entre estados pueden generar incoherencias políticas y normativas que puedan dificultar la implementación de planes integrales del agua o incluso una “zona de indiferencia” (Christensen y Per, 2005).

En ese sentido, el agua es un recurso compartido, su gestión eficaz requiere coordinación interjurisdiccional, o sea entre diferentes niveles de gobierno y entidades estatales. La falta de mecanismos de coordinación robustos puede resultar en conflictos y duplicación de esfuerzos, como ocurre en la gestión de la cuenca de los ríos Usumacinta y Grijalva, que atraviesan dos estados e incluso otro país (Kauffer, 2005). Conocer los posibles conflictos políticos entre los

gobiernos de Chiapas y Tabasco, así como con el gobierno federal, que puedan limitar la efectividad de los planes sectoriales del agua, debido a que las diferencias políticas, pueden llevar a la priorización de diferentes agendas sobre las necesidades hídricas reales, afectando la asignación de recursos y la ejecución de proyectos clave. Además, la politización de la gestión del agua puede retrasar o impedir la implementación de proyectos vitales, ya que los proyectos de infraestructura hídrica podrían ser utilizados como herramientas políticas, lo que puede resultar en la falta de continuidad de los programas.

Por otro lado, la diversidad sociocultural y económica de la región, añade otra capa de complejidad. Las comunidades indígenas y rurales tienen necesidades y percepciones diferentes sobre la gestión del agua en comparación con las áreas urbanas. Las políticas del agua que no consideren los contextos locales pueden ser ineficaces, ya que se requiere la participación comunitaria para asegurar que los planes sectoriales del agua sean aceptados y sostenibles. Además, la existencia de disparidades económicas, pueden resultar en acceso desigual al agua, generando que las comunidades más pobres y marginadas estén menos equipadas para participar en la toma de decisiones y pueden ser las más afectadas por la mala gestión del recurso.

En México, se generan cada seis años, propuestas de planes y programas, asociados al Programa Nacional de Desarrollo (PND) y en el tema del agua destaca el Programa Nacional Hídrico (DOF, 2020), que, a través de una consulta ciudadana, señala que han incrementado las extracciones de agua de cuencas y acuíferos ocasionado un importante grado de presión sobre el recurso y un uso ineficiente. Además, de que una mala planeación del uso del territorio pone en riesgo a los asentamientos humanos. Señala también que, a pesar de existir espacios de participación para la toma de decisiones, estos han sido ineficientes y tienen limitaciones para su labor, debido a una falta de representatividad y coordinación interinstitucional, además de defender intereses de grupos, gobiernos, usuarios, académicos o de la misma sociedad civil, lo que ha propiciado corrupción. En ese sentido, se propone hacer una revisión del sistema, objetivos e indicadores mediante los cuales se da seguimiento a estos consejos, e inicia por revisar la regionalización de las zonas administrativas coordinadas por CONAGUA (DOF, 2020).

Región Hidrológico-Administrativa Frontera Sur XI y Consejo de Cuenca

El Organismo de Cuenca Frontera Sur XI (DOF, 2023), que corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa Frontera Sur XI, modifica administrativamente la gestión del agua en esta zona, ya que incluye las regiones hidrográficas RH30 y RH23, (RH30 corresponde a la cuenca Grijalva-Usumacinta), que comprenden a Chiapas, Tabasco, y la zona de Laguna de Términos, Campeche, una de las más importantes de México y América Central, con una rica historia que abarca aspectos geográficos, culturales, económicos y ecológicos. El sistema hidrológico formado por 108 cuencas (DFO, 2023), no solo es vital por su biodiversidad, sino también por su relevancia histórica y socioeconómica. Se formó hace millones de años durante los procesos tectónicos que moldearon el paisaje del sureste de México y Guatemala, y en ella nacen los ríos Grijalva y Usumacinta atravesando diversos ecosistemas y regiones climáticas, lo que contribuye a su alta productividad ecológica y biodiversidad. En el cauce del Grijalva, se encuentra el complejo de presas del alto Grijalva, fundamental para el control de inundaciones, generación de energía hidroeléctrica y suministro de agua. Además, el Usumacinta, es notable por su naturaleza salvaje y sus áreas protegidas, que son refugio de especies amenazadas como el jaguar y el manatí. Esta región crisol de culturas desde tiempos precolombinos, ha sido escenario de conflictos desde la época de la colonia por la explotación de recursos naturales y en el siglo XX, experimentó un desarrollo significativo, con fuertes procesos de deforestación que afectaron los ecosistemas locales y desplazaron a comunidades indígenas.

A pesar de que las cuencas hidrológicas no reconocen fronteras políticas, la gestión fragmentada (Mestre, 2005) puede resultar en impactos ambientales negativos propiciando la sobreexplotación, degradación, y la disminución de caudales. El agua, esencial para el desarrollo económico, especialmente en sectores como la agricultura, industria y turismo, puede limitar el crecimiento económico y la inversión, si existe una gestión ineficaz que afecte el acceso al agua potable y saneamiento, un derecho humano básico. En ese sentido, la delimitación geopolítica en el sureste presenta desafíos significativos para la implementación efectiva de los planes sectoriales del agua, que requieren de promover una gestión integral y coordinada, que trascienda las fronteras político y administrativas, asegurando una distribución equitativa y sostenible. La cooperación interjurisdiccional, la participación comunitaria y la adaptación de políticas a los contextos locales son fundamentales para lograr una gestión más eficaz y resiliente en la región.

La cuenca Grijalva-Usumacinta, enfrenta desafíos ambientales importantes como la deforestación, la contaminación del agua, la pérdida de biodiversidad (Cotler, 2010), y una creciente demanda del

recurso hídrico para la agricultura, la industria y el consumo humano, resulta en una gestión compleja y conflictiva. En ese sentido, el cambio climático representa una amenaza significativa, que potencia los problemas de sequías e inundaciones, así como alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura, que afectan la disponibilidad de agua y la salud de los ecosistemas acuáticos (CONAGUA, 2023). La implementación de una gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) es crucial para abordar los desafíos actuales y futuros. Esto implica una planificación y administración coordinada que considere las necesidades de todos los usuarios del agua, incluidos los sectores agrícola, industrial y doméstico, así como la protección de los ecosistemas. La conservación y restauración la cuenca, es esencial para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Iniciativas como la creación de áreas protegidas y la restauración de humedales pueden ayudar a mitigar los impactos del desarrollo y el cambio climático, pero requiere de seguimiento y evaluación.

En México, uno de los mecanismos clave para lograr una gestión integrada y participativa del agua, es a través de los Consejos de Cuenca. Estos, son parte fundamental del sistema de gestión de agua implementado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012 y 2023) y permiten superar algunos de los obstáculos que enfrenta una gestión interestatal. Su creación y funcionamiento están establecidos en la Ley de Aguas Nacionales de México (LAN, 2023), y la gestión esta, asociada a la participación de las comunidades locales, para implementar cualquier política integral en ese sentido. Entre sus objetivos está el coordinar y armonizar las acciones de diversos actores para asegurar el uso sostenible y equitativo en la cuenca, fomentando la participación activa de todos los actores involucrados, que incluyen el sector público, privado, social y académico, en la toma de decisiones informadas y consensuadas. Estos en conjunto, elaboran e implementan planes de manejo que incluyan estrategias de conservación, uso eficiente del agua y protección de los ecosistemas acuáticos. La estructura de los consejos considera representantes de gobierno, usuarios del agua, organizaciones de la sociedad civil y comunidades locales, y particularmente en esta región, a las comunidades indígenas y rurales, respetando sus derechos y conocimientos tradicionales y actuando como un foro para la resolución de conflictos relacionados con el uso y gestión del agua. Sin embargo, de acuerdo con el proceso realizado para elaborar el Programa Nacional Hídrico 2020-2024, estos están sobrepasados, siendo uno de los problemas el no garantizar la representación de todos los usuarios del agua.

El Consejo de la Cuenca Grijalva-Usumacinta (Figura 12.3), geográficamente es parte de la RH30, y corresponde a Tabasco y la parte de Chiapas en lo que corresponde a la cuenca Grijalva-Usumacinta. Tiene en su estructura un presidente, un secretario técnico, siete vocales que representan los principales sectores representados en la región, un representante por cada estado, un representante de los municipios de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas) y Centro (Tabasco), donde están las capitales de los estados participantes, nueve vocales que presentan a los usuarios en la región de diferentes sectores y nueve vocales de organizaciones ciudadanas. Este consejo, debe reunirse periódicamente en sesiones ordinarias y extraordinarias, para discutir y evaluar los problemas y desafíos relacionados con la gestión del agua en la cuenca, y tomar decisiones sobre las acciones a seguir. Estas decisiones tienen como objetivo, desde elaborar los planes de manejo, monitorearlos y evaluarlos, hasta generar conciencia en el tema y atender conflictos. Su importancia radica también en promover una visión holística e incluyente de la cuenca, que busque implementar acciones de conservación y restauración de ecosistemas acuáticos, contribuyendo a la protección de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, de acuerdo con el análisis de Kauffman (2005), respecto a la dinámica de trabajo del Consejo de Cuenca Grijalva-Usumacinta, se presenta una competencia entre los intereses de Chiapas y Tabasco, que se reflejaba en el intercambio continuo de sedes para las sesiones, en la integración de los grupos de trabajo por actores de estos estados y en la elaboración de los planes hidráulicos por estado. Además, en los últimos años, estos procesos han sido desvirtuados y menospreciados, regresando a un control centralizado, lo cual se muestra en la falta de minutas que muestre que este sistema sigue siendo considerado, mismo que no se menciona en el Programa Hídrico Regional 2021-2024 (Gobierno de México, 2020).



Figura 12.3. Límite del Consejo de Cuenca Grijalva-Usumacinta en achurado rojo, sobre la zona que abarca la nueva Región Hidrológica-Administrativa en rosa.

Actualmente, el cambio de límites de las regiones hidrológico-administrativas, conforme al Acuerdo DOF: 18/09/2023 publicado en Diario Oficial de la Federación, señala que el Organismo de Cuenca Frontera Sur, abarca todo Tabasco, Chiapas y considera parte de Campeche (el Consejo de Cuenca tendría que ajustarse a este nuevo límite) y establece como su sede permanente en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Es importante señalar, que el que exista una sede permanente del consejo, de acuerdo a las experiencias previas, podría propiciar una brecha entre estados, que conllevaría a generar una distancia en la atención a los problemas desde su origen o poder mitigar/compensar

los efectos negativos, disminuyendo la probabilidad de tener una visión integral, de considerar objetivos conjuntos sobre un futuro común y la posibilidad de generar soluciones que resuelvan los conflictos derivados de los sistemas socioeconómicos existentes, así como y de los programas y las políticas públicas en curso. Cabe destacar que fisiográficamente, la cuenca alta y media corresponden a Chiapas, mientras la cuenca baja está en Tabasco y Campeche, donde sin duda se reflejarán fuertemente tanto las buenas como las malas decisiones de la región.

Por otro lado, existen retos que exceden los límites de la cuenca misma, como enfrentar los efectos del cambio climático con eventos cada vez menos extraordinarios de sequías e inundaciones, además de tormentas y huracanes más poderosos, que presentan nuevos desafíos para la gestión del agua y que requieren respuestas adaptativas y resilientes. Estos retos, requieren de identificar tecnologías avanzadas que faciliten tanto el monitoreo, como la gestión del agua para mejorar la eficiencia y efectividad de los procesos y servicios. En ese sentido, un futuro sustentable en la cuenca requiere de restaurar y proteger sus ecosistemas y biodiversidad, al mismo tiempo que se mejora la calidad de vida de las comunidades que dependen de ella, incrementando la conciencia sobre la importancia del agua.

Conclusiones

La historia de la cuenca Grijalva-Usumacinta en la Región Hidrológico-Administrativa Frontera Sur, es una rica travesía de interacciones entre humanos y naturaleza, desde las civilizaciones precolombinas hasta los desafíos contemporáneos, esta zona ha sido y sigue siendo vital para México y su futuro dependerá de nuestra capacidad para gestionar sus recursos de manera sostenible, equilibrando el desarrollo económico con la conservación ambiental y la equidad social. Solo a través de un enfoque integrado y participativo podremos asegurar que región hidrológica continúe siendo una fuente de vida y prosperidad para las generaciones venideras. En ese sentido, la gobernanza entendida como la estructura y los procesos de toma de decisiones, juega un papel crucial en este contexto, además, su interrelación con la geopolítica, en la manera en que las decisiones y políticas sobre la distribución y gestión de los recursos naturales se da, es un factor que influye en las relaciones de poder entre las diferentes entidades políticas participantes. Si bien, una gobernanza efectiva puede facilitar la cooperación y la resolución de conflictos en el ámbito

geopolítico asegurando un uso sostenible y equitativo de los recursos, este requiere de la coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y actores sociales.

El análisis de la geopolítica y la gestión del agua en Tabasco revela una compleja interrelación entre los factores geográficos, históricos y socioeconómicos que han influido en la configuración y evolución del territorio en diferentes escalas de tiempo y espacio. El agua, como recurso vital, ha sido central en su economía y el desarrollo, y su gestión es un desafío multifacético. Si bien, el Consejo de Cuenca, en el que participaba Tabasco, había mostrado ser un mecanismo de gestión participativa fundamental para promover una administración equitativa y sostenible del agua, la inclusión de todos los actores con equidad es esencial, para asegurar que las políticas y proyectos de gestión del agua sean aceptados y sostenibles. Hoy, aún no se tiene claridad sobre el futuro de este organismo de representación con los cambios en las delimitaciones de las Regiones Hidrológicas Administrativas, lo que deja en indefensión no solo a Tabasco, sino a todos los habitantes de esta región en la toma de decisiones, hasta que se determinen los ajustes necesarios en el mismo que consideren este cambio.

Finalmente, si bien la geopolítica es una herramienta útil para analizar y determinar las acciones al interior y exterior de un territorio, la gobernanza es imprescindible para el éxito de la implementación de políticas públicas propuestas en planes y programas gubernamentales. La gestión del agua en Tabasco y la cuenca Grijalva-Usumacinta requiere una aproximación integrada y coordinada que trascienda las fronteras políticas y administrativas y que claramente respete y represente los intereses no solo de los habitantes que en ella están, sino su interacción en la región, siendo esta la zona del país con más riqueza en este recurso. Solo a través de esfuerzos conjuntos se podrá asegurar la disponibilidad, calidad y sostenibilidad del recurso hídrico, protegiendo el bienestar de las comunidades y la biodiversidad de la región. En ese sentido, la gobernanza efectiva, caracterizada por la transparencia, la rendición de cuentas y la inclusión, es fundamental para el éxito de estos esfuerzos.

Referencias

Andrade-Velázquez, M. (2017). Visión climática de la precipitación en la cuenca del río Usumacinta, En Soares, D. y García-García, A. (coords.), La cuenca del río Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático (pp. 57-76). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/download/?key=213>

- Cabrera-Bernat, C.A. (1994). Geografía y población de Tabasco. En Romo-López, R.M. (ed.), *Historia General de Tabasco: Historia social* (Vol. 1, pp. 27-119). Gobierno del Estado de Tabasco, Secretaría de Educación, Cultura y Recreación. <https://culturatabasco.gob.mx/wp/wp-content/uploads/2020/08/historia-general-de-tabasco-TOMO-I-cabrera-PRIMERA-PARTE.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (2012). Programa Hídrico Nacional Visión 2030. En Sistema Nacional de Información del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Materiales. Recuperado 27 de junio de 2024, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD1210.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (2023). Estadísticas del agua en México. En Sistema Nacional de Información del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Materiales. Recuperado 27 de junio de 2024, de <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/img/Imagenes/EAM2023.webpDOF 18/09/223>
- Comisión Nacional del Agua (2024). Monitor de Sequía en México (MSM). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Materiales. Recuperado 27 de junio de 2024, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Cotler-Ávalos, H. (2010). Las Cuencas Hidrográficas de México: Priorización y Toma de Decisiones. En Cotler-Ávalos, H. (Coor.), *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización*. (pp. 210-215). Semarnat, INECC, Fundación Gonzalo Río Arronte. https://vortice.conagua.gob.mx/storage/files.conagua/upload/05022021_1612548612.pdf
- Christensen, T., y Laegreid, P. (2005). El estado fragmentado: los retos de combinar eficiencia, normas institucionales y democracia. *Gestión y Política Pública*, 14(3):557-598. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13314306>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2023). ACUERDO por el que se determina la circunscripción territorial de los Organismos de Cuenca de la Comisión Nacional del Agua. Recuperado 27 de junio de 2024, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5702095&fecha=18/09/2023#gsc.tab=0

- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2020). Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Recuperado 27 de junio de 2024, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020
- Díaz-Perera, M.A. y De Los Santos-González, C.C. (2021). *La frontera olvidada. Poblamiento costero de Tabasco en cuatro momentos decisivos, 1518-2020*. ECOSUR. <https://www.ecosur.mx/libros/producto/la-frontera-olvidada-poblamiento-costero-de-tabasco-en-cuatro-momentos-decisivos-1518-2020-epub/>
- Ferro-Núñez, G., y Castaño-Ferro, Ó. A. (2017). Geopolítica contemporánea y análisis de factores relevantes a escala global. *Razón Crítica*, (3), 111-144. <https://doi.org/10.21789/25007807.1235>
- Gama-Campillo, L., Villanueva-García, M., Díaz-López, H., Collado-Torres, R. y Moguel-Ordoñez, E.J. (2019). Vulnerabilidad al cambio climático. En *La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado*. Vol. III (pp. 76-79). CONABIO. https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/Tabasco/TAB_EE_2019_vol%203_CLOSE.pdf
- García-Rojas, I.B. (2006). Poder y territorio en México. En Consejo Español de Estudios Iberoamericanos (eds.), *Viejas y nuevas alianzas entre América Latina y España: XII Encuentro de Latinoamericanistas españoles* (pp. 1402-1423). Santander. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=10777>
- Gil y Saenz, M. (1872). *Compendio histórico, geográfico y estadístico del Estado de Tabasco*. Tip. de José M. Abalos. México. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080018033/1080018033.PDF>
- Gobierno de México. (1824). Constitución de 1824. Cámara de Diputados. Recuperado 27 de junio de 2024, de https://www.diputados.gob.mx/biblioteca/bibdig/const_mex/const_1824.pdf
- Gobierno de México. (2021). Programa Hídrico Regional 2021-2024. Recuperado 27 de junio de 2024, de https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_XI_FRONTERA_SUR.pdf
- Herrera-Santana, D. (2018). Geopolítica. Conceptos y Fenómenos Fundamentales de Nuestro Tiempo. UNAM. <https://www.academia.edu/36937359/Geopol%C3%ADtica>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s. f.). Fisiografía. Recuperado 27 de junio de 2024, de <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>

- Kauffer-Michel, E.F. (2005). El consejo de cuenca de los ríos Usumacinta y Grijalva: los retos para concretar la participación y la perspectiva de cuencas. En Vargas-Velázquez, S. y Mollard, E. (eds.), *Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México* (pp. 195-218). IMTA-IRD. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010038079>
- Kloster, K.B. (2018). Conflictos y luchas por el agua en el medio urbano: una contribución desde la sociología. En M.L. Torregrosa y Armentia (Coord.), *El conflicto del agua: política, gestión y demanda social* (pp. 61-82). Consejo Editorial de la Flacso en México. <https://www.flacso.edu.mx/el-conflicto-del-agua-politica-gestion-resistencia-y-demanda-social/>
- Ley de Aguas Nacionales, [LAN], Reformada, Diario Oficial de la Federación [DOF.], 8 de mayo de 2023, (México). Recuperado 27 de junio de 2024, de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/leyes.php#>
- Mestre, E. (2005). Cuencas en Latinoamérica: Perfiles y casos de organización y gestión ambiental y social. En S. Vargas Velázquez y E. Mollard (Eds.) *Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México* (pp. 195-218). IMTA-IRD. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010038079>

Apartado 3. Enfoque transdisciplinario y estudios en zonas costeras

Gema Hidalgo Rodríguez

Los socioecosistemas costeros del sureste de México involucran una gama de elementos y condiciones, que transcurren desde su variada geomorfología, biota, paisajes, hasta las actividades socioeconómicas que se desarrollan en éstos y su vulnerabilidad ante diversos estresores y shocks, tanto naturales como antrópicos. Éstos tienen la capacidad de absorber las perturbaciones y reorganizarse, hasta ciertos umbrales a partir de los cuales puede verse afectada su estructura y funcionalidad.

La diversidad y dinámica de estos sistemas, su amplitud de interacciones y amenazas, se tornan aún más complejos en un contexto de crecimiento urbano e industrial, con la consiguiente pérdida de conectividad y contracción costera, tanto desde tierra como mar. Esto implica que sea necesario el enfoque de transdisciplina, para la comprensión más acertada de su integridad ecológica.

El análisis de sus variaciones espaciotemporales naturales, su resiliencia y adaptabilidad a tensores de estrés socioambientales, en el contexto del cambio climático, así como la integración de la información socioecológica disponible de los mismos es, cada vez más, de importancia inminente. Esa base de conocimiento es clave para contribuir a la mitigación de los impactos y a mejorar la toma de decisiones, que redunde en una mayor disponibilidad de bienes y servicios ecosistémicos, valor económico y sostenibilidad.

Para la planificación de estas zonas y la prevención de riesgos, accidentes y desastres, es preciso involucrar a toda la sociedad, e implementar estrategias y herramientas de manejo adecuadas, eficientes e innovadoras, basadas en la naturaleza. Con miras a continuar profundizando en estos mecanismos, en este apartado se abordan temas ecológicos tan cruciales como la eutrofización cultural y el fitoplancton, la restauración de humedales costeros, los efectos del cambio climático en los socioecosistemas, la implementación de un observatorio costero para la resiliencia, o el uso de indicadores de la calidad bentónica. Es nuestro propósito que estos capítulos, escritos por profesionales expertos de investigación costera en la región, aporten ideas y conceptos desde una perspectiva transdisciplinaria, que coadyuven en el desarrollo de índices, modelos, e instrumentos de comunicación de la ciencia para la estimación y medición del estado socioambiental y respuestas de los sistemas del sureste de México ante los desafíos del cambio global.

Capítulo 13. Eutrofización cultural y el fitoplancton desde la transdisciplina en el sureste mexicano: esfuerzos del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C.

Karina Esqueda Lara²⁹

Resumen

El sur sureste mexicano es la segunda región más poblada del país, en el se encuentran dos de los ríos más caudalosos del país, el río Grijalva y el río Usumacinta, en sus cuencas se desarrollan actividades antrópicas como la ganadería extensiva y la agricultura comercial, lo que favorece el uso de fertilizantes. Además, el río Grijalva cuenta con cuatro obras hidráulicas que controlan el flujo que descarga al Golfo de México, mientras que el río Usumacinta cuenta con localidades establecidas a su largo, así como con descargas de aguas municipales, lo que enriquece con nutrientes adicionales al sistema de ambos ríos y la zona costero-marina. Los sistemas enriquecidos de nutrimentos por las actividades antrópicas que responden con múltiples cambios relacionados con la calidad del agua y del hábitat y ciclos biogeoquímicos son considerados sistemas en proceso de eutrofización. Éste es uno de los cambios globales más alarmantes, ya que involucra, al menos seis de los subsistemas fundamentales del planeta, por lo que El Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C., desarrolló diversos proyectos, algunos transdisciplinarios, lo que permitió contribuir con información en los tópicos: de fitoplancton y morfoespecies parcialmente nocivos y tóxicos, indicadores, en sedimentos, de la eutrofización, nutrientes y otras variables fisicoquímicas en columna de agua. Los resultados generados pueden ser útiles para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Palabras clave: *subsistemas fundamentales, florecimiento algal nocivo, Cyanobacteria.*

Introducción

²⁹Doctora en Ciencias. Investigadora del Centro de Investigación sobre el Cambio Global (CICG), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). ORCID: 0000-0002-4498-1424

El sur sureste mexicano es la segunda región más poblada del país, ya que cuenta con casi el 30% de la población mexicana, es la región con la mayor diversidad de México y cuenta con una enorme riqueza natural y la mayor concentración de agua dulce, por lo que se distingue por su potencial agropecuario (FIDESUR, 2021). Tabasco es una de las entidades que se encuentran en esta región. En él corren dos de los ríos más caudalosos del país, el río Grijalva y el río Usumacinta, en sus cuencas se desarrolla una ganadería extensiva de bovinos y la agricultura comercial, lo que favorece el uso de fertilizantes. Sumado a ello, el río Grijalva cuenta con cuatro obras hidráulicas (ubicadas en territorio Chiapaneco) que controlan el flujo que llega al territorio tabasqueño y descarga al Golfo de México, mientras que el río Usumacinta cuenta con localidades establecidas a su largo, así como con descargas de aguas municipales, lo que impacta y enriquece con nutrientes adicionales al sistema de ambos ríos y la zona costero-marina (Toledo, 2003).

Los sistemas enriquecidos de nutrimentos por actividades antrópicas que responden de manera directa o indirecta con múltiples cambios relacionados con la calidad del agua y del hábitat y ciclos biogeoquímicos son considerados sistemas en proceso de eutrofización (Cloern, 2001). Éste es uno de los cambios globales más alarmantes, ya que involucra, al menos seis de los subsistemas fundamentales del planeta, por lo que El Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C., consideró conveniente la exploración del proceso de eutrofización y el impacto de esto sobre la diversidad fitoplanctónica como una de sus respuestas de los ecosistemas acuáticos en el territorio tabasqueño y la zona marino costera influenciada. Para ello desarrolló diversos proyectos, algunos transdisciplinarios, tanto para investigación bibliográfica como para campo, apoyados a través de diversos programas como el de Fomento Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica y de Innovación, Incorporación de maestros y doctores para fomentar la competitividad y la innovación, Programa de Laboratorios Nacionales y Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación. Esto permitió contribuir a una línea base con una variedad de información en el sur del Golfo de México que pueden ser útiles para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Eutrofización

Los nutrimentos son de gran importancia para los ecosistemas acuáticos ya que de ellos depende la productividad primaria. Estos se pueden encontrar incrementados de forma natural,

principalmente, en ambientes acuáticos con baja renovación hidrodinámica, lo que lleva a una eutrofización natural. Los nutrientes también pueden incrementarse en los cuerpos acuáticos receptores debido a las actividades humanas y producirles una eutrofización cultural (Malone y Newton, 2020; Sedyaaw *et al.*, 2024). La eutrofización cultural es uno de los problemas más severos en los sistemas acuáticos continentales y costeros (Herrera-Silveira *et al.*, 2011; Muciño-Márquez *et al.*, 2017) ya que el aumento de las concentraciones de nitrógeno y fósforo generan, principalmente, un cambio en la composición específica y abundancia de las comunidades fitoplanctónicas (Andersen *et al.*, 2006; Muciño-Márquez *et al.*, 2017) y degradan la calidad del agua (Akinawo, 2023).

Los responsables principales de estas modificaciones en los ecosistemas acuáticos, al igual que muchas de las modificaciones en otros ambientes que se producen en el planeta, tienen su origen en el siglo XXI con el crecimiento demográfico y el desarrollo económico en todo el mundo, lo que ha intensificado los efectos negativos de las actividades humanas (Valiela *et al.*, 1992; NRC, 2000; Malone y Newton, 2020), las cuales han transformado diversos subsistemas fundamentales del planeta como la biodiversidad, el clima, el océano, la atmósfera-estratosfera, el agua, los ciclos biogeoquímicos y la cobertura del suelo (Vitousek *et al.*, 1997; Richardson *et al.*, 2023). Entre los factores antrópicos que ejercen presión y modifican con ello la calidad del agua y su biodiversidad como consecuencia de la eutrofización cultural en los ecosistemas acuáticos se encuentran: los vertidos de aguas residuales urbanas, agrícolas e industriales, acumulación de sedimentos y la modificación de las características ambientales (Allan, 2004; Jansen *et al.*, 2014). Aunque en la actualidad este proceso se percibe con claridad, no siempre fue así, por lo que pasaron décadas para que los científicos reconocieran el proceso de eutrofización cultural, en especial la marina (Nixon, 1995).

El estudio del proceso de la eutrofización se inició en la década de 1960 con el proceso natural que presentan los sistemas epicontinentales envejecidos por procesos autóctonos (NAS, 1969; Cloern, 2001), lo que impulsó el primer simposio sobre la eutrofización realizado en 1967 (NAS, 1969), mientras que para reconocer el proceso de eutrofización en aguas marinas, tuvo que pasar poco más de una década (Nixon, 1995; Cloern, 2001), siendo hasta los años de la década de 1980 que se le reconoció como una grave problemática al lanzar una alerta para las zonas costeras. En ella se advirtió que, de no controlarse el proceso de eutrofización costera provocado por actividades humanas, éste amenazaría la biodiversidad por la alteración de la producción primaria en dichos

ecosistemas (Arrhenius, 1992; Epstein y Rapport, 1996). A pesar de ello, los primeros trabajos sobre el proceso de eutrofización costera se presentaron hasta la década de 1990 (Vollenweider *et al.*, 1992).

Dos de los conceptos que consideraron la complejidad de la eutrofización cultural están enfocados al proceso en la zona costera y son el propuesto por Goldberg (1995) en la década de 1990 y el de Cloern (2001) en la década del 2000. El primero, considera al proceso como el ingreso de nutrientes vegetales como los fosfatos, nitratos y silicatos que provocan una producción excesiva de biomasa en las aguas y sedimentos a lo que le continúa una transferencia de materia orgánica a las aguas más profundas donde puede ser oxidada por el gas oxígeno disuelto, con lo que se puede desarrollar condiciones de hipoxia y anoxia. A este enriquecimiento de nutrientes se le atribuye la disminución de los rendimientos de la pesca y la cría de mariscos, la proliferación de algas exóticas y tóxicas, las alteraciones de la estructura de las comunidades en los ecosistemas costeros y la disminución de la calidad del agua.

El segundo concepto, es el presentado por Cloern (2001) que lo considera como un conjunto de respuestas directas e indirectas que incluyen cambios vinculados en la transparencia del agua, distribución de plantas vasculares y biomasa de macroalgas, biogeoquímica de sedimentos y ciclo de nutrientes, proporciones de nutrientes y su regulación de la composición de la comunidad de fitoplancton, frecuencia de floraciones de algas tóxicas/dañinas, calidad del hábitat para metazoos, reproducción/crecimiento/supervivencia de invertebrados pelágicos y bentónicos, y cambios sutiles como en la estacionalidad de las funciones del ecosistema. Hoy en día sabemos que el proceso de la eutrofización cultural es complejo, tanto en ecosistemas epicontinentales como costeros (Rose *et al.*, 2024), y existe a nivel mundial una creciente preocupación respecto a la sobreproducción de nutrientes proveniente de diversas fuentes, así como a sus efectos ecológicos. Para la zona costera el enriquecimiento forzado en nitratos (procedentes en su mayoría del lavado de tierras agrícolas), en amonio y fosfatos (abundantes en vertidos urbanos), ha causado un desequilibrio del medio acuático que se manifiesta por una gran producción algal conocida como Florecimiento Algal Nocivo (FAN). Este FAN puede ser tóxico o no tóxico y puede ser producido, en especial, por especies de dinoflagelados y diatomeas, pero también por cianobacterias no solo marinas sino también de agua dulce que son arrastradas por los ríos desde los cuerpos epicontinentales eutrofizados, en los cuales es justo este último grupo taxonómico el que predomina en los ecosistemas epicontinentales eutrofizados (Day, 2000; Moncheva *et al.*, 2001).

A pesar de que el estudio del proceso de eutrofización cultural inició décadas después que el de aguas epicontinentales, para la década del 2000 ya se sabía que 415 zonas costeras alrededor del mundo experimentaban alguna forma de eutrofización y 169 ya eran hipóxicas (Selman *et al.*, 2008) y en tan solo un año las zonas costeras afectadas por la eutrofización superaban las 500 (Selman *et al.*, 2009). Para el 2014 éstas se incrementaron a 550 (NOAA-EPA, 2014). Una de las regiones afectadas por este tipo de contaminación es el Océano Atlántico en el que se encuentra el Golfo de México. En él se encuentran importantes recursos ecológicos y económicos que influyen en las zonas costeras de manera que los sistemas lagunares-estuarinos estudiados son susceptibles a la eutrofización desde la década de 1980, y en especial se considera que la porción sur tiene un potencial alto de eutrofización (Caso *et al.*, 2004).

Por otro lado, también se conoce que en el Golfo de México se desarrolla la segunda zona muerta más extensa del planeta, la cual es ocasionada, principalmente, por el exceso de nutrimentos contenidos en los residuos de los fertilizantes que fluyen por el río Mississippi y son vertidas en el mar y favorecen el crecimiento del fitoplancton llegando a producir el fenómeno conocido como Florecimiento Algal Nocivo (FAN). Cuando el fitoplancton muere, éste cae al fondo como desecho y su materia orgánica es consumida por bacterias que utilizan el oxígeno para su desintegración, de modo que, se reduce la concentración de oxígeno (hipoxia) o llega a desaparecer en la columna de agua (anoxia) y los organismos marinos huyen de la zona o mueren en el fondo por asfixia (Kannan, *et al.*, 1997; Fuentes, 2015). Por lo que, el proceso de eutrofización tiene implicaciones evidentes a gran escala y se está extendiendo desde hace décadas rápidamente (Díaz y Rosenberg, 1995; Malone y Newton, 2020).

Zona costera de Tabasco

El estado de Tabasco se ubica en la región sureste de México, entre las coordenadas 17° 19' 00" y 18°39'00" de latitud Norte y los 94° 57' 00" y 94°08'00" de longitud Oeste. Delimita al norte con la Bahía de Campeche en el Golfo de México, hacia el sur con el estado de Chiapas, al oeste con Veracruz, al noreste con Campeche y al sureste con Guatemala. Tiene una población aproximada de 2,402,598 habitantes (INEGI, 2021), distribuidos en 17 municipios que se subdividen a su vez en 4 regiones geopolíticas (Palma-López *et al.*, 2007).

1. La región de Chontalpa (Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Paraíso, Cunduacán, Nacajuca y Jalpa de Méndez)
2. La región del centro (Villahermosa)
3. La región de la sierra (Teapa, Tacotalpa, Jalapa y Macuspana)
4. La región de los Ríos (Balancán, Tenosique, Emiliano Zapata, Jonuta y Centla)

Presenta una superficie total de 24,730.9 km² (INEGI, 2024) y 191 km de litoral ubicado entre la cuenca de los ríos Papaloapan, Grijalva y Usumacinta al sur del Golfo de México (Kumpf *et al.*, 1999). El 96% del territorio continental de Tabasco está compuesto por llanura costera y está representada por humedales adyacentes a la zona costera (Sánchez y Barba, 2005). La temperatura media anual es de 27°C, la máxima promedio es de 36°C y se presenta en el mes de mayo y la mínima promedio es de 18.5°C durante enero.

La precipitación promedio anual en Tabasco es de 2,550 mm, condición que se presenta entre los meses de junio y octubre, periodo que corresponde a la temporada de lluvias. El territorio cuenta con 129,331.2 hectáreas de cuerpos de agua repartidas entre 33 ríos y 17 lagunas (INEGI, 2014), las cuales ocupan aproximadamente el 5.25% de la superficie de Tabasco. En el estado fluyen los ríos más caudalosos de México, el Grijalva y el Usumacinta que junto con el río Coatzacoalcos representan aproximadamente un tercio de la descarga fluvial en las costas del sur del Golfo de México (Ortiz-Zamora *et al.* 2002).

El río Grijalva y el río Usumacinta, así como, sus afluentes descienden desde la región montañosa de Chiapas y se incrementan aguas abajo en la llanura tabasqueña. Lo que da como resultado una serie de cauces que forman múltiples pantanos y áreas lagunares (Figura 13.1; Mier y Terán-Suárez *et al.*, 2006).

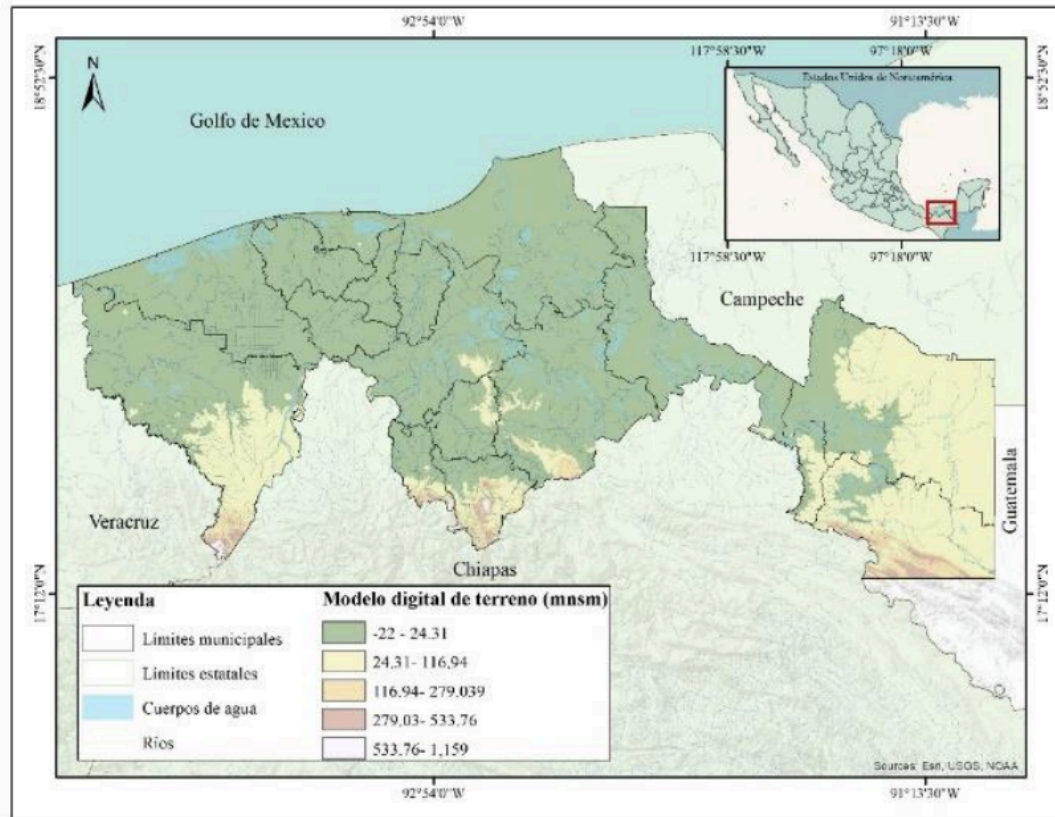


Figura 13.1. Principales cuerpos de agua en Tabasco.

El río Grijalva es el río principal que atraviesa el estado, tiene una longitud de 700 km y su origen se ubica en Guatemala, en la Sierra de Cuchumatanes. Éste recibe diferentes nombres según la localidad, en Guatemala se le conoce como “El Cuilco” el cual entra a Chiapas y recibe el afluente de los ríos Lagartero, Dolores y Selegua para ahora formar el río San Gregorio. Por último, se le incorpora en Río San Miguel donde se le conoce como el Río Grijalva.

En él se encuentran cuatro obras hidráulicas que sirven para regular su caudal y generar energía eléctrica. Estas presas se ubican en la Sierra de Chiapas y son 1) Presa La Angostura, 2) Chicoasén, 3) Nezahualcóyotl o Malpaso y 4) Peñitas. En contraste con el río Grijalva, el río Usumacinta no cuenta con obras hidráulicas, pero tiene, al igual que el Grijalva, su origen en Guatemala. Este río marca una parte del límite con Chiapas en el norte para desembocar en el río Grijalva a unos kilómetros de la costa del Golfo de México (Cabrera y Cuc, 2002). El caudal del Usumacinta crece

conforme avanza hacia el Grijalva gracias a la aportación de diversos afluentes a lo largo de su trayecto como el río San Pedro y San Pablo y el río Palizada.

El Usumacinta descarga hacia el Golfo de México mediante tres afluentes: el río Palizada, que desagua en la laguna de Términos en Campeche, la Barra de San Pedro, que confluye directo al mar, y la unión del Usumacinta con el Grijalva a través de la desembocadura de Frontera (De la Lanza, 2002). La cuenca de este río cuenta con una gran cantidad de áreas naturales protegidas de relevancia internacional como el Péten, Montes Azules, Pantanos de Centla y otras de importancia estatal como el Parque Estatal Cañón del Usumacinta y las Cascadas de Reforma (Galindo *et al.*, 2006). Sin embargo, la cuenca del Usumacinta es también una de las zonas con los mayores índices de crecimiento poblacional.

De acuerdo con Toledo (2003) para el caso de México, el proceso de modernización de las estructuras productivas del país promovida por el gobierno federal provocó la ocupación del trópico, mediante una estrategia basada en tres líneas de acción: 1) Una política de colonización y desmontes orientada a eliminar grandes extensiones de selvas tropicales y establecer en las superficies desmontadas programas agrícolas y ganaderos. 2) El aprovechamiento de sus recursos hídricos, con la finalidad de crear el más grande complejo hidroeléctrico del país. 3) La explotación de sus yacimientos petroleros.

Cabe destacar que los resultados de estas políticas se han reflejado directa e indirectamente en el funcionamiento de este frágil hidrosistema tropical, ya que, en tan solo medio siglo, Tabasco redujo sus espacios naturales y los transformó en favor de una agricultura comercial de plantación y una ganadería extensiva de bovinos (Toledo, 2003). El impulso a la agricultura y las agroindustrias favoreció el establecimiento de cultivos de caña de azúcar, coco, plátano, cacao y algunos cítricos en las planicies (Toledo, 2003) y con ello, el uso de fertilizantes que representan un aporte adicional de nutrimentos a lo largo de la cuenca, que ingresan a las aguas costeras y marinas del Golfo de México. En el Usumacinta, además de las actividades agrícolas, otra fuente importante de nutrimentos son las descargas de aguas residuales de zonas urbanas y localidades a lo largo de ambos márgenes del Usumacinta, siendo los municipios más importantes Centla, Macuspana y Jonuta (Paredes *et al.*, 2012).

El impulso del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad para el estudio del proceso de eutrofización en territorio tabasqueño

Dada la importancia que tiene el proceso de eutrofización a nivel global, la presencia de la zona muerta en el norte del Golfo de México y la vulnerabilidad de las zonas costeras en tema de eutrofización y florecimientos algales en el sur del Golfo de México, así como a las características del territorio tabasqueño es que el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. (CCGS) se planteó impulsar entre sus investigaciones la búsqueda de la posible presencia del proceso de eutrofización y fitoplancton a través de sus indicadores como el fitoplancton, el oxígeno disuelto y los nutrientes en territorio tabasqueño y zona costera.

Para ello, fue necesario el equipamiento tanto de campo como de laboratorio e iniciar con investigación básica a través de diversos proyectos en conjunto con otras instituciones, como el de tipo FOMIX: “Retos para la sustentabilidad en la cuenca baja del Río Usumacinta en Tabasco: ecosistemas, cambio climático y respuesta social”, en el cual Esqueda-Lara *et al.* (2016) registraron por primera vez 129 morfoespecies del fitoplancton en el sistema lagunar Chaschoc ubicado en la cuenca del río Usumacinta, Tabasco, los cuales pertenecen a 6 grupos taxonómicos (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chlorophyta, Cryptophyta, Euglenophyta y Dinophyta) y destacan 40 nuevos registros para la cuenca, 13 potencialmente tóxicas y 42 indicadoras de contaminación por materia orgánica o eutrofización.

Además, el CCGS se sumó al esfuerzo multi-institucional (Universidad Nacional Autónoma de México, El Centro de Investigación de Estudios Avanzados y El Instituto Tecnológico de Sonora) para la creación en el 2015 del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC) en el cual se han desarrollado diversos proyectos incluyendo la exploración del oxígeno disuelto y de las especies de fitoplancton, en especial las potencialmente tóxicas, lo que permitió a Esqueda-Lara *et al.* (2021) detectar entre 2015 y 2016 la presencia de 86 morfoespecies de fitoplancton en el sistema lagunar costero de Carmen-Pajonal-Machona, pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos (Cyanobacteria, Bacillariophyta, Chlorophyta y Dinophyta) registrando 10 nuevos registros para el sitio de los cuales 11 fueron potencialmente tóxicas y 5 potencialmente nocivas.

Otro proyecto multi-institucional llevado a cabo por el CCGS y múltiples instituciones participantes fue de tipo FORDECYT: “Cambio global y sustentabilidad en la cuenca del río Usumacinta y zona marina de influencia. Base para la adaptación al cambio climático desde la Ciencia y la Tecnología (CONACyT)” en él se colaboró para el eje temático de agua con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Con este proyecto Machain *et al.* (2020) exploraron un núcleo sedimentario cercano a la desembocadura del

sistema Grijalva Usumacinta, al que se le analizó los ensamblajes de dinoquistes y foraminíferos bentónicos, el carbono orgánico e índices de hipoxia (A-E y PEB).

Con ello se registraron especies predominantes en los ensamblajes de dinoquistes que pertenecían al género *Spiniferites*, lo que sugiere el desarrollo de condiciones eutróficas. Además, se encontró concordancia con un contenido mayor de Carbono orgánico y ensamblajes de foraminíferos bentónico e índices de hipoxia (índices A-E y PEB) que indicaron posibles concentraciones más bajas de oxígeno en las aguas del fondo. Lo que sugiere que la zona podría verse afectada por procesos de desoxigenación y demuestra la necesidad de un monitoreo para proporcionar más evidencias con base científica para prevenir la creciente vulnerabilidad en esta zona costera.

Por otro lado, Cardoso-Mohedano *et al.* (2020) evaluaron variables fisicoquímicas como el oxígeno disuelto y los nutrientes de nitrógeno y fósforo en la columna de agua influenciada por las descargas de los ríos en el ecosistema costero receptor durante la temporada de secas y de lluvias. Esto permitió registrar que la pluma fluvial del sistema del río Grijalva-Usumacinta alcanzó ~9 km mar adentro y que la concentración más baja de oxígeno disuelto para el 2017 durante la temporada de lluvias fue, dentro de la pluma fluvial, de 3,6 mg L⁻¹, con lo que concluyeron que de presentarse eventos de hipoxia (concentraciones de oxígeno ≤ 2 mg L⁻¹) estos se presentarían durante dicha temporada en aguas más profundas (>80 m de profundidad) y cuando los vientos sean débiles.

En cuanto a los nutrientes, Cardoso-Mohedano *et al.* (2022) reconocieron que en la temporada de lluvias, las distribuciones superficiales del sistema del río Grijalva-Usumacinta en el 2017 fueron mucho más altas de manera significativa, por lo que la disponibilidad de nutrientes sobre el sur del Golfo de México costero, provoca un contraste en la descarga estacional de nutrientes que parece aumentar el estado trófico en el área costera, pero que los procesos de transporte costero parecen prevenir la acumulación de nutrientes y el agotamiento de oxígeno en la columna de agua durante la temporada de lluvias. Debido a que las descargas del sistema del río Grijalva y el Usumacinta (GURS: Grijalva-Usumacinta River Sistem) transportan altas concentraciones de nutrientes, los eventos de flujo extremos podrían causar eventos de hipoxia en el área costera y la variabilidad climática interanual puede aumentar o reducir la precipitación en el GURS, por tanto, modular estos efectos. Por lo que sugieren, se necesita más investigación para caracterizar completamente la variabilidad de las descargas de nutrientes de dicho sistema y su impacto en la biota costera.

Otros de los resultados de los proyectos antes mencionados sobre el fitoplancton fue el desarrollado por Esqueda-Lara *et al.* (2021) en la laguna “El Cometa” ubicado en Pantanos de Centla, en el cual se registraron las primeras 50 morfoespecies de fitoplancton de cinco grupos taxonómicos: Cyanobacteria, Bacillariophyta, Charophyta, Euglenophyta y Chrysophyta. Siete especies potencialmente tóxicas y cinco bioindicadoras de contaminación y de condiciones de eutrofización. Además, evaluar a la comunidad fitoplanctónica en la zona influenciada por el Grijalva-Usumacinta.

La constante presencia de nuevos registros de morfoespecies del fitoplancton y los de morfoespecies potencialmente nocivos y tóxicos demuestran la necesidad de continuar explorando sobre el tema en los cuerpos de agua tabasqueños. Su estudio como elemento para el estado trófico del ambiente y las implicaciones que tiene, en términos de cambio global, se considera oportuno. Además, los resultados de sus indicadores en sedimentos que sugieren el probable desarrollo del proceso de la eutrofización a través del ensamblaje de dinoquistes (estadio de vida de dinoflagelados, un grupo taxonómico estudiado como parte de la comunidad del fitoplancton) que sugiere condiciones eutróficas, en concordancia con el contenido de carbono orgánico y ensamblajes de foraminíferos bentónicos e índices de hipoxia (A-E y PEB) que indican posibles condiciones más bajas de oxígeno en aguas de fondo y los nutrimentos registrados en la zona influenciada por el sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta deja clara la necesidad e importancia de caracterizar y monitorear la variabilidad de las descargas de nutrimentos de dicho sistema y su impacto en la biota costera, de manera que permita prevenir el incremento de la vulnerabilidad del territorio (incluyendo la zona costera). Los resultados de todos estos trabajos de investigación contribuyen a una línea base con variedad de información en el sur del Golfo de México que puede ser útil para tomadores de decisiones del sistema de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Conclusiones

La investigación transdisciplinaria para abordar las problemáticas del cambio global como el proceso de eutrofización, requiere del esfuerzo disciplinario, multidisciplinario e interdisciplinario con miras a la transdisciplinariedad. Los cambios que suceden a nivel global como las alteraciones de los subsistemas fundamentales del planeta son complejos en sus causas, desarrollo y efectos, se relacionan entre ellos y requieren la suma del conocimiento y acciones locales, nacionales e

internacionales que permitan amortiguar o mitigar sus efectos. Los resultados aquí mencionados, son hasta el día de hoy, solo algunos de los realizados en territorio tabasqueño que involucran de algún modo las temáticas de eutrofización, hipoxia y fitoplancton, demuestran que existe un proceso de eutrofización que debe continuar explorándose en otros sitios y de ser posible monitorearse para conocer su trayectoria, los tiempos de ésta y si es posible detener. Para ellos se requiere del esfuerzo de la comunidad académica y de los tomadores de decisiones tanto dentro como fuera del estado.

Agradecimientos

Al MCA Candelario Peralta Carreta por la elaboración del mapa para este trabajo.

Literatura citada

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (1998). Capítulo 10. Medio ambiente marino y litoral. En: Agencia Europea de Medio Ambiente (ed). *El medio ambiente en Europa: segunda evaluación*. Copenhagen, Denmark: Agencia Europea de Medio Ambiente, pp. 1-31.
- Akinnawo, S.O. (2023). Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigations strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
- Allan, J.D. (2004). Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 257-284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
- Andersen, J.H., Schlüter, L. & AErtebjerg, G. (2006). Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*, 28(7), 621-628. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl001>
- Aranda, N.C. (2004). *Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical* [tesis de doctorado]. Universita de Barcelona. Departament d' Ecologia. p. 246.
- Arrhenius, E. (1992). Protecting tropical and subtropical coastal waters: a resource for future generations. *A Journal of the Human Environment*, 21(7), 488-490.
- Cabrera, J. y Cuc, P. (2002). *Ambiente, conflicto y cooperación en la cuenca del río Usumacinta*. Costa Rica: Fundación para la Paz y la Democracia Proyecto Conflicto y Cooperación Ambiental en Cuencas Internacionales Centroamericanas.

- Cardoso-Mohedano, J.G., Canales-Delgadillo, J.C., Machain-Castillo, M.L., Sanchez-Muñoz, W.N., Sanchez-Cabeza, J.A., Esqueda-Lara, K., Gómez-Ponce, M.A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Lestayo-González, J.A. & Merino-Ibarra, M. (2022). Contrasting nutrient distributions during and rainy seasons in coastal waters of the southern Gulf of Mexico driven by the Grijalva-Usumacinta River discharges. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113584. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113584>
- Cardoso-Mohedano, J.G., Canales-Delgadillo, J.C., Machian-Castillo, M.L., Hernández-Hernández, J.G., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Gómez-Ponce, M.A., Esqueda-Lara, K., Merino-Ibarra, M., Hernández-Becerril, D.U. & Gelabert-Fernández, R. (2020). Absence of hypoxia events in the adjacent coastal waters of Grijalva-Usumacinta River, Southern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 156, 111174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111174>
- Caso, M., Pisant, I. y Ezcurra, E. (2004). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología.
- Cloern, J.E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253. <https://doi.org/10.3354/meps210223>
- Day, J.W., Jr., Britsch, L.D., Hawes, S.R., Shaffer, G.P., Reed, D.J. & Cahoon, D. (2000). Pattern and process of land loss in the Mississippi Delta: a spatial and temporal analysis of wetland habitat change. *Estuaries*, 23(4), 425-438. <https://doi.org/10.2307/1353136>
- De la Lanza, E.G. (2002). Recursos hidrológicos de México. En: Abarca, J.F, Herzing, M. Eds. Manual para el manejo y la conservación de los humedales en México, 3ra ed. Phoenix, Arizona: Dirección General de Vida Silvestra-SEMARNAT, Arizona Game and Fish Department, North American Wetland Conservation Act., U.S. Fish and Wildlife Service, Convención Ramsar, U.S. State Department, Ducks Unlimited of México-A.C., Pronatura Noreste, Canadian Wildlife Service, Society of Wetlands Scientists.
- Diaz, R.J. & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia-review of ecological effects and behavioural responses of marine macrofauna. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, 33, 245-303.
- Diaz, R.J. & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321, 926-929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>

- Epstein, P.R. & Rapport, D.J. (1996). Changing coastal marine environments and human health. *Ecosystem Health*, 2(3), 166-176.
- Esqueda-Lara, K., Carnero-Bravo, V., Varona-Cordero, F., Rincones-Reyes, K.M., Ahuja-Jiménez, Y., García-Valdéz, C.G. y Sánchez, A.J., (2021). Fitoplancton en el sistema tropical Carmen Pajonal Machona, Tabasco. *Hidrobiológica*, 31(1), 53-68.
<https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/Esqueda>
- Esqueda-Lara, K., Sánchez A.J., Valdés-Lagunes, G., Salcedo, M.A., Franco-Torres, A.E. y Florido, R. (2016). Fitoplancton en el humedal tropical Chaschoc en la cuenca baja del río Usumacinta. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 1177-1188.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.10.015>
- Esqueda-Lara, K., Sánchez, A.J., Salcedo, M.A., Rincones-Reyes, K.M. y Popoca-Cruz, P.E. (2021). Morfoespecies de fitoplancton de la laguna el cometa en la reserva de la biosfera pantanos de Centla. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, Número, Especial I, e2707.
<https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2707>
- FIDESUR (Fideicomiso para el Desarrollo Regional del Sur Sureste). (2021). El Sur Sureste una región rica pero rezagada. <https://sursureste.org.mx/region/>
- Fuentes, I. L. (2015). Hipoxia marina en el Golfo de México “Zona Muerta”. *Muy interesante*, 4, 70-73.
- Galindo, A., Gama, L., Salcedo, M., Ruiz, S., Morales, A. y Zequeira, C. (2006). Programa de ordenamiento ecológico del estado de Tabasco. México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Gobierno del Estado de Tabasco.
- Goldberg, E.D. (1995). Emerging problems in the coastal zone for the twenty-first century. *Marine Pollution Bulletin*, 31(4-12), 152-158. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00102-S](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00102-S)
- Herrera-Silveira, J.A., Morales-Ojeda, S.M., y Cortes-Balan, T.O. (2011). *Eutrofización en los ecosistemas costeros del Golfo de México*. SEMARNAT-NOAA-GEF-UNIDO.
- INEGI. (10 de agosto de 2024). Cuéntame sobre México. Información por Entidad, México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/territorio/clima.aspx>
- INEGI. (2014). Conociendo México. 4 edición. Aguascalientes, México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI. (2021). Panorama sociodemográfico de Tabasco -Censo de población y vivienda 2020. México: CPV/Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Janse, J.H., Kuiper, J.J., Weijter, M.J., Westerbeek, E.P., Jeuken, M.H.L., Bakkenes, M., Alkemade, R., Mooij, W.M. & Verhoeven, J.T.A. (2014). GLOBIO-Aquatic, a global model of human impact on the biodiversity of inland aquatic ecosystems. *Environmental Science & Policy*, 48, 99-114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.007>
- Kannan, K., Senthilkumar, K., Loganathan, B.G., Takahashi, S., Odell, D.K. & Tanabe, S. (1997). Elevated accumulation of tributyltin and its breakdown products in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) found stranded along the U.S. Atlantic and Gulf coasts. *Environmental Science and Technology*, 31, 296-301. <https://doi.org/10.1021/es960657d>
- Kumpf, H., Steindenger, K. & Sherman, K. (1999). *The Gulf of Mexico large marine ecosystem: assessment, sustainability, and management*. Massachusetts, USA: Blackwell Scientific Inc.
- Malone, T.C. & Newton, A. (2020). The globalization of cultural eutrophication in the coastal ocean: causes and consequences. *Frontiers in Marine Science*, 7, 670. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00670>
- Mier y Terán-Suárez, J., Castro-Georgana, V., Mayor-Nucamendi, H.F. y Brito-López, J.A. (2006). Floraciones algales en Tabasco. *Salud en Tabasco*, 12 (1), 413-422.
- Moncheva, S., Gotsis-Skretas, O., Pagou, K. & Krastev, A. (2001). Phytoplankton blooms in Black Sea and Mediterranean coastal ecosystems subjected to anthropogenic eutrophication: similarities and differences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 281-295. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0767>
- Muciño-Márquez, R.E., Aguirre-León, A. y Figueroa-Torres, M.G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27 (3), 281-291.
- NAS (National Academy of Science). (1969). *Eutrophication: causes, consequences, correctives*. Washington, D.C. National Academy of Science.
- Nixon, S.W. (1995). Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41 (1), 199-219. <https://doi.org/10.1080/00785236.1995.10422044>
- NOA-EPA. (National Oceanic and Atmospheric Administration-Environmental Protection Agency). (2024). Supported scientists find average but large Gulf dead zone.

<https://www.noaa.gov/media-release/noaa-epa-supported-scientists-find-average-but-large-gulf-dead-zone>

- NRC (National Research Council). (2000). *Clean coastal waters. Understanding and reducing the effects of nutrient pollution*. Washington, D.C. USA: National Academy of Science, National Academic Press.
- Ortiz-Zamora, G., Huerta-Díaz, M.A., Salas-de-León, D.A. & Monreal-Gómez, M.A. (2002). Degrees of pyritization in the Gulf of Mexico in sediments influenced by the Coatzacoalcos and Grijalva-Usumacinta Rivers. *Ciencias Marinas*, 28 (4): 369-379. <https://doi.org/10.7773/cm.v28i4.238>
- Palma-López, D.J., Cisneros, J.D., Moreno, E.C. y Rincón-Ramírez, J.A. (2007). *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. México: Colegio de Postgraduados-Isprotab-fundacion produce tabasco.
- Paredes, V.P. Pedrozo-Acuña, A., Rodríguez, R.J., Domínguez, M.R. & González, V.F. (2012, 7-9 de noviembre). *Estimación de mapas de inundación con una probabilidad de ocurrencia en la cuenca del río Usumacinta* [ponencia]. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México. <https://amh.org.mx/>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J.F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L. & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Rose, K.C., Ferrer, E.M., Carpenter, S.R., Crowe, S.A., Donelan, S.C., Garçon, V.C., Grégoire, M., Jane, S.F., Leavitt, P.R., Levin, L.A., Oschlies, A. & Breitburg D. 2024. Aquatic deoxygenation as a planetary boundary and key regulator of Earth system stability. *Nature ecology & evolution*, 8, 1400-1406. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02448-y>
- Sánchez, A.J. y Barba, E. (2005). Biodiversidad de Tabasco. En: Bueno J., Álvarez, F. y Santiago, S. (eds). *Biodiversidad del estado de Tabasco*. México: Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, pp. 1-16.

- Sedyaaw, P., Bhatkar, V.R., & Sawant AN. (2024). A review on effects of eutrophication in aquatic ecosystem. *International Journal of Development Research*, 14 (04), 65362-65369 <https://doi.org/10.37118/ijdr.28143.04.2024>
- Selman, M. & Greenhalgh. (2009). *Eutrophication sources and drivers of nutrient pollution. Water quality: eutrophication and hypoxia water quality: eutrophication and hypoxia policy note series No 2*. Washington, D.C: World Resources Institute.
- Selman, M., Greenhalgh, S., Diaz, R. & Sugg, A. (2008). *Eutrophication and hypoxia in coastal areas: a global assessment of the state of knowledge. Water quality: eutrophication and hypoxia policy note series No 1*. Washington, D.C: World Resources Institute.
- Sonarghare, P.C., Masram, S.C., Sonparote, U.R., Khaparde, K.P. & Kharkate, S.K. (2000). Causes and effects of eutrophication on aquatic life (a review). *International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*. XI (SP2), 213-218. <https://eoi.citefactor.org/10.11208/essence.20.11.SP2.147>.
- Toledo, A. (2003). *Ríos, costas, mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, El Colegio de Michoacán.
- Valiela, I., Foreman, K., LaMontagne, M., Hersh, D., Costa, J., Peckol, P., DeMeo-Andreson, B., D'Avanzo, C., Babione, M., Chi-Ho, S., Brawley, J., & Lajtha, K. (1992). Couplings of watersheds and coastal waters: sources and consequences of nutrient enrichment in Waquoit Bay, Massachusetts. *Estuaries*, 15(4), 443-457. <https://doi.org/10.2307/1352389>
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. & Melillo, J.M. (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 277, 494-499. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.49>
- Vollenweider, R.A. (1992, 21-24 march). Coastal marine eutrophication: principles and control. Proceedings of an International Conference, Bologna, Italy, *Marine Coastal Eutrophication*, 1-20. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-89990-3.50011-0>

Capítulo 14. Restauración de los humedales costeros y la recuperación de los servicios ambientales

Rodrigo M. Villanueva-Meza³⁰

José G. Chan-Quijano

Resumen

La pérdida de los humedales costeros se debe a factores antropogénicos directos y por los efectos del cambio climático, que ocasionan severas afectaciones a los servicios ambientales y a la calidad de vida de los organismos. Sin embargo, la restauración de los humedales costeros, además de brindar bienes y servicios, contribuyen a la recuperación del medio ambiente y de la diversidad biológica del ecosistema. Además, la clasificación de humedales costeros a nivel mundial ha permitido lograr la conservación, monitoreo y gestión de los recursos naturales; siendo la Convención Ramsar la agencia internacional más importante para su conservación. Por lo tanto, esta revisión documental tiene como objetivo presentar un análisis de las restauraciones de los humedales costeros con la ayuda de estudios de caso en América, la cual es considerada una estrategia clave para la gestión, conservación, mantenimiento de sus funciones y servicios ambientales. Se documentó que diversos factores influyen sobre la restauración, principalmente el tiempo y las características particulares del sitio. Además, se analizaron las estrategias, técnicas y metodologías de la restauración ecológica en humedales costeros, las cuales son categorizadas en activa, pasiva y creación, considerando los ecosistemas de referencia como los puntos claves para guiar y la sucesión ecológica como parte del restablecimiento de una comunidad a partir de su recuperación controlada. Finalmente, se documentó que el monitoreo es reconocido por evaluar, planificar y redirigir los objetivos, dando resultados favorables.

Palabras clave: *gestión, monitoreo, servicios ambientales, sucesión, clasificación de humedales.*

³⁰Técnico ambiental independiente. <https://orcid.org/0000-0002-4277-6400>

²Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. Autor de correspondencia: jose.chan@ccgs.mx, guadachaqui@gmail.com

1 Introducción

Los humedales se encuentran en casi todos los continentes, excepto en la Antártida, y su mayor distribución es en las regiones boreal y tropical, en menor medida en las zonas templadas. A nivel mundial tienen una extensión territorial de 7 a 10 millones de km² (5-8 % de la superficie del mundo; Mitsch y Gosselink, 2015). De dicha porción, los humedales costeros ocupan 45,000 km² (Greenberg *et al.*, 2016). En el Sudeste Asiático, Sudamérica y África se encuentran las mayores zonas de humedales tropicales de marea (Valiela *et al.*, 2009; Scott *et al.*, 2014).

Los humedales costeros son reconocidos por su alta productividad, diversidad biológica, poca extensión, alta complejidad y dinamismo, por lo cual son distinguidos como refugios y sitios de crianza de diversas especies de peces, aves, crustáceos y moluscos. Además, ofrecen una gama de bienes y servicios ambientales (Dugan, 1992; Berlanga-Robles *et al.*, 2008; Mitsch y Gosselink, 2015; Vidal *et al.*, 2015).

En las últimas décadas los humedales se están perdiendo a una velocidad alarmante, teniendo efectos en la economía y en los beneficios sociales, por ejemplo, el aumento de riesgo de inundaciones, deterioro en la calidad del agua, salud humana y medios de subsistencia (Gardner *et al.*, 2015; Kundu *et al.*, 2024). En América latina y diversas partes del mundo se implementan planes de manejo, leyes y normas para protegerlos, basados en tratados internacionales que promueven su conservación y uso racional de los recursos naturales (Berlanga-Robles *et al.*, 2008; Bianchi *et al.* 2019).

La restauración de humedales costeros ha resultado ser clave para su permanencia y se ha basado en el manejo de tres componentes esenciales: el agua, la biota y el suelo. El componente hidrológico es el que más atención ha recibido en los proyectos de restauración (Zhao *et al.*, 2016), sin embargo, se ha identificado que cuando se conocen las interacciones entre los componentes de un humedal, incluyendo sus funciones, se pueden identificar los mecanismos responsables de la degradación y revertir sus efectos negativos (Williams y Faber, 2001; Zhao *et al.*, 2016).

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar la restauración de los humedales costeros por medio de estudios de caso en América que muestran cómo ha sido la recuperación de sus servicios ambientales. Específicamente se describe su gestión, se analizan y determinan sus principales

amenazas, así como su relación con los servicios ambientales que proveen. Finalmente se analizan las técnicas y metodologías generales empleadas para su restauración.

Clasificación y gestión de humedales costeros

La palabra “humedales” está referida a una amplia variedad de hábitats que comparten diversas características. A nivel mundial existen diferentes agencias internacionales y nacionales que clasifican, conservan, monitorean y gestionan los humedales costeros, los cuales son categorizados por su posición latitudinal, paisaje y comunidades vegetales, que les otorgan diferentes funciones y servicios ambientales (Bruland, 2008).

Las tres principales agencias internacionales que clasifican, conservan, monitorean y gestionan los humedales son el Sistema de Clasificación del Servicio de Pesca y Vida Silvestres (Fish and Wildlife Service, USFWS), el Sistema Canadiense de Clasificación (Canadian Classification System, CCS) y la Convención Ramsar (Bruland, 2008). De las diferentes definiciones y clasificaciones que existen, las más ampliamente utilizadas son las de la última agencia, que agrupa los diferentes humedales de acuerdo con sus características biológicas y físicas (Dugan, 1992; Ramsar, 2006).

La USFWS es una agencia internacional creada en 1941 por los Estados Unidos para gestionar y monitorear las características ecológicas y extensión territorial de los humedales con datos geoespaciales (Federal Geographic Data Committee, 2013). Ésta define a los humedales como “tierra de transición entre sistemas terrestres y acuáticos, donde el manto freático suele estar en o cerca de la superficie, o la tierra está cubierta por agua poco profunda”. La clasificación de humedales costeros marinos, estuarinos y de ribera, está basada en los modificadores del régimen de agua (naturales o antropogénicos) así como en la química del agua y el suelo (Bruland, 2008; Federal Geographic Data Committee, 2013).

En 1973 se desarrolló la CCS, la cual define a los humedales como “tierra que está saturada con suficiente agua como para promover los humedales y los procesos acuáticos, formando suelos mal drenados, vegetación hidrófila y diversos tipos de actividad biológica que se adapta a un ambiente húmedo” y los clasifica en cinco clases; pantanos, ciénegas, esteros, marismas y humedales poco profundos (Rubec, 2018).

1 Los humedales costeros se encuentran incluidos en cuatro de sus cinco clases: ciénegas, esteros, marismas y humedales poco profundos. Estos criterios considerados para su categorización son: la química del agua, el origen de ésta y el sistema hidrológico, este último se puede dividir en dos subsistemas de abastecimiento de agua, los terrígenos y los litógenos (Ramsar, 2006; Rubec, 2018). En 1971 se creó la Convención Ramsar y fue creada para atender la progresiva degradación y pérdida de los humedales, así como de las aves migratorias (Ramsar, 2017). Ramsar (2006) define a los humedales como “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanente o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” y de acuerdo con Bruland (2008) se ha determinado una lista de humedales de importancia internacional.

1 El sistema de clasificación de Ramsar se basa en el tipo de ambiente, la geoforma, la saturación de agua en el suelo, la presencia de especies, la profundidad y temporalidad de la lámina de agua, la presencia y tipo de vegetación. Asimismo, las áreas de transición (tierra-sistemas acuáticos) agrupa a los humedales en tres tipos principales: humedales marinos o costeros, humedales continentales y humedales artificiales. Además, se reconoce cinco tipos de humedales; estos son: marinos (humedales costeros, lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral), estuarinos (incluye deltas, marismas de marea y manglares), lacustres (aquellos asociados a lagos), ribereños (adyacentes a ríos y arroyos), palustres (humedales pantanosos, como marismas, pantanos y ciénegas) y humedales artificiales (Ramsar, 2006; Bruland, 2008; López-Portillo *et al.*, 2010; Ramsar CREHO, 2010).

Ramsar ha desarrollado una lista de 973 humedales costeros para todo el mundo, 99 para América latina y el Caribe, de los cuales 88 son costeros (Figura 14.1. y en su sistema de definición y clasificación se agrupa a los arrecifes de coral y lechos de pastos marinos en humedales marinos o costeros. En el presente documento solo se mencionan los humedales ribereños, marismas de marea de agua dulce, marismas saladas y manglares (Tabla 14.1; Ramsar, 2019).

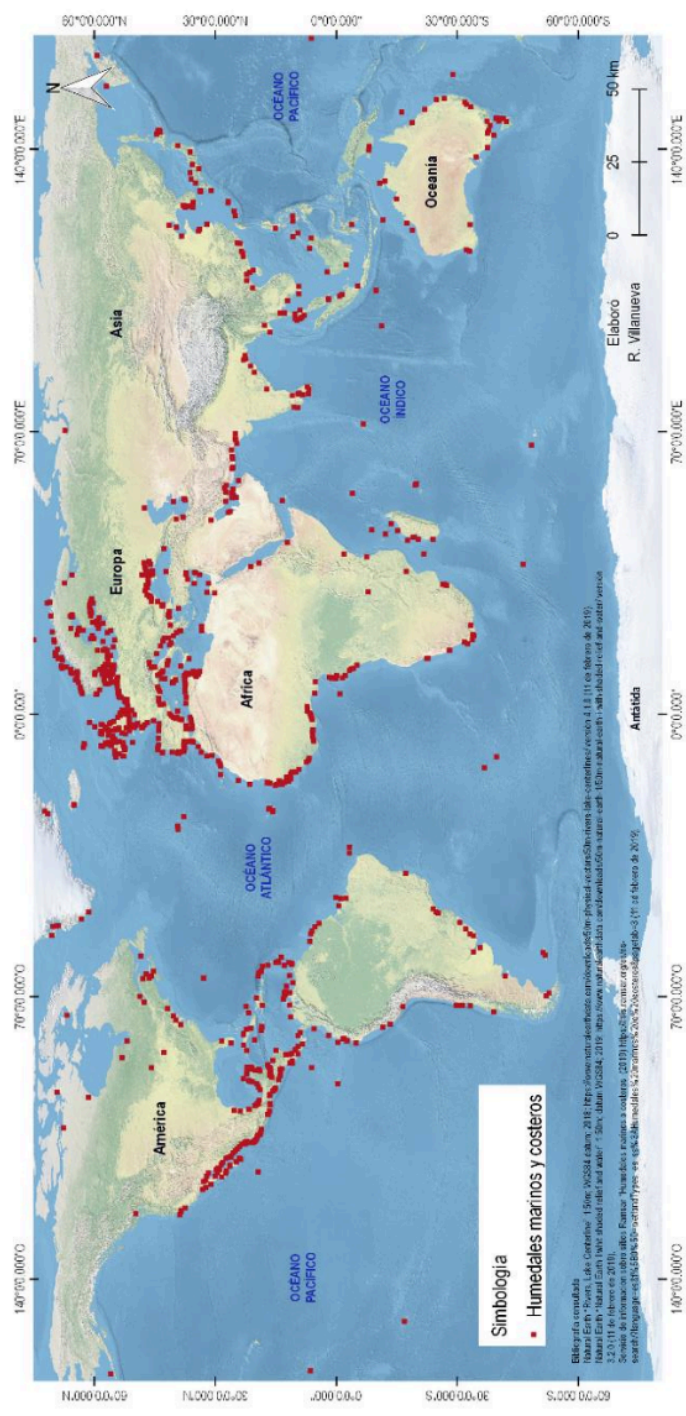


Figura 14.1. Humedales marinos y costeros definidos por Ramsar (2019).

Tabla 14.1. Características de los humedales para este estudio.

Tipo de humedal	Características	Referencia
Ribereño	1 Son sistemas abiertos y dinámicos, se presentan entre un ecosistemas terrestres y acuáticos. Produciendo ecotonos, dificultando así su delimitación, puesto que presentan un relieve y junto con los mosaicos de vegetación pueden conformar un gran paisaje. Estos se caracterizan por la abundancia de agua y suelos aluviales fértiles, presentan una forma lineal debido a su cercanía con los ríos o arroyos y siempre se encuentran conectadas aguas arriba y abajo, así como lateralmente a los ecosistemas. En ellos fluye agua o energía en gran cantidad a diferencia de los otros humedales de agua dulce, lo que les confiera la capacidad de retener y transformar partículas provenientes de actividades agrícolas o urbanas y, con ello, se evita la llegada de estas últimas a las zonas costeras.	Brinson (1981); Bruland (2008)
Marismas de agua dulce	1 Son humedales próximos a los océanos que combinan características de las marismas saladas y de agua dulce, lo que provoca una gran dificultad para delimitarlas, pero les confiere una estructura y funciones principalmente de las marismas saladas; sin embargo, su principal diferencia es una alta diversidad en la biota, causada por la reducción de salinidad y una alta cantidad de sedimentos orgánicos. Debido a su particularidad han sido declaradas prioridad para su conservación, pero solo tres tipos de marismas han sido así determinadas, los pantanos maduros, los pantanos flotantes y los pantanos nuevos en deltas de progresión.	Bruland (2008); Mitsch y Gosselink (2015)

	1 Se presentan en latitudes medias y altas donde la acumulación de sedimento puede ser mayor o igual a la tasa de hundimiento de la tierra, además dan una protección contra el oleaje y tormenta. Su vegetación varía a lo largo de los gradientes de salinidad e inundaciones, el cual ofrece un hábitat para plantas y animales, algunos de ellos se adaptan al estrés de salinidad. 1 En el mundo, estos humedales presentan diferentes asociaciones de vegetación, pero su estructura ecológica y función es similar en todas ellas.	
Marismas salinas	Representan un ecotono entre los ecosistemas terrestres y marinos, esto permite que ocasionalmente algunas áreas de las marismas saladas se inunden con la marea alta y no con la marea baja, lo que permite dividir la marisma salada con dos límites, superior e inferior, definidos por los rangos de marea, la tensión física, la profundidad, los efectos mecánicos del oleaje, la disponibilidad de sedimentos, la erosión y la comunidades de plantas, donde solo las plantas tolerantes al estrés salino dominan las partes bajas. 1 Son áreas con arbustos de alturas menores a 2 m y con árboles que pueden tener una altura de 30 m, desarrollándose sobre suelos saturados en agua periódica o permanentemente, en agua salinas o salobres. 1 Los bosques de manglar presentan seis tipos funcionales los de franja, ribereños, inundables (tipo islotes), arbustivos o enanos y de hamaca, parecidos a los de cuenca, pero en una porción de suelo más elevada. En América, los manglares cubren una superficie de 49,096 km². Se han registrado solo 13 especies nativas de mangle para América, las cuales	Bruland (2008); Mitsch y Gosselink (2015)
Manglares		Bruland (2008), López-Portillo et al. (2010); Mitsch y Gosselink (2015), Teutli-Hernández y Herrera-Silveira (2016)

tienen adaptaciones particulares, raíces especializadas,
zancos o neumatóforos y estructuras especializadas que
les permite la absorción de oxígeno y secreción de sal.

Cuando un humedal se encuentra impactado se debe reunir un grupo de expertos junto con la comunidad local para darle un seguimiento de gestión para su remediación y un buen manejo.

1 **Gestión de los humedales costeros**

Durante la década de los años setenta se registró a nivel mundial la destrucción y pérdida de los humedales. Un detonante clave de esta problemática fue la falta de valoración de los recursos naturales que albergan, el paradigma dominante fue la expansión agrícola, pesquera, industrial, residencial y desarrollo comercial. El diseño de estrategias de desarrollo basadas en la productividad de los ecosistemas y comunidades se planteaba sólo a nivel científico (Dugan, 1992; Mitsch y Gosselink, 2015). En el último cuarto del siglo XX los gobiernos reconocieron a los humedales como hábitat de vida silvestre, principalmente para las aves acuáticas, sin embargo, aún existía poca comprensión y preocupación por preservarlos (Mitsch y Gosselink, 2015).

1
A nivel gubernamental mundial se ha reconocido la pérdida y contaminación de los humedales costeros y se realiza su gestión con doce objetivos para proteger y conservar los servicios ambientales. **1**
Sin embargo, la protección y conservación de los humedales costeros, incluidas en la gestión de zonas costeras, está sujeta a los intereses de los gestores y la regulación ambiental centrándose en resolver los problemas ambientales, considerando una visión integral y el análisis de los factores ecológicos, sociales y económicos (Day Jr *et al.*, 2012; Ceccon *et al.*, 2015; Mitsch y Gosselink, 2015).

1
La cooperación internacional para la conservación y gestión de los humedales costeros puede ser uno de los soportes clave para este tipo de ecosistemas, puesto que muchos de ellos comparten recursos, particularmente hídricos (sistemas fluviales internacionales) o migración de especies (aves acuáticas y peces), o simplemente porque la experiencia de otro país en la gestión o restauración podría ayudar a otros a resolver situaciones ambientales críticas (Dugan, 1992).

1
Además, el elemento clave para su conservación y protección es mantener la calidad y cantidad del agua (Assessment Millennium Ecosystem, 2005). Es así como, la convención Ramsar, realiza la conservación y gestión a través de las 170 partes contratantes y el marco de “tres pilares”: 1) trabajar en pro del uso racional, 2) designar humedales idóneos para la lista de sitios de importancia internacional y garantizar el manejo idóneo y 3) la cooperación internacional en humedales transfronterizos (humedales ecológicamente cohesivos distribuidos en fronteras nacionales, donde ambas autoridades han acordado colaborar),

sistemas compartidos y especies compartidas (Dugan, 1992; Ramsar, 2014a, 2023). Los cuales aportan un manejo adecuado para cada ecosistema.

Ramsar (2016) y las partes contratantes acordaron un conjunto de políticas y compromisos internacionales sobre un desarrollo verdaderamente sostenible, para la conservación y uso racional de los humedales, a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las Metas Aichi para la Diversidad Biológica elaboraron el Plan Estratégico 2016-2024. El cual se menciona, además, cuatro objetivos (dirigir los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales, conservar y administrar de una manera efectiva la Red de Sitios Ramsar, el uso razonable de todos los humedales y fomentar la aplicación) y 19 metas que contribuirán directamente con los ODS.

En este contexto, cada trienio Ramsar reúne a las partes contratantes, comprometiéndose a involucrar a las poblaciones, especialmente las locales, con la finalidad de hacer crecer el bienestar humano y mitigar la pobreza (Ramsar, 2010a). Además de trabajar para el uso racional de los humedales y recursos hídricos de su territorio, basado en los planes, políticas y legislación nacional, medidas de gestión y educación, mencionando que el uso racional de los humedales es “el mantenimiento de sus características ecológicas, logrado mediante la implementación de enfoques por ecosistemas, dentro del contexto del desarrollo sostenible”. Específicamente, en 1990 se hizo énfasis en el uso racional, además de adoptar políticas nacionales con planes de acción nacional a favor del medio ambiente, en elaborar programas ambientales basado en inventarios, monitoreo, investigación, formación, educación y concientización ambiental y en elaborar planes integrados de gestión de humedales (Ramsar, 2014b).

En el mundo tres cuartas partes de las poblaciones indígenas habitan dentro, cerca o donde existió anteriormente un humedal costero, ya que los recursos hídricos y alimenticios que estos proveen son vitales (Dugan, 1992; Moreno-Casasola e Infante-Mata, 2010). Esta estrecha relación y dependencia ha sido modificada por los esquemas de desarrollo económico, los cambios en los sistemas tradicionales, la presión demográfica y el aumento del uso de suelo ocasionaron la presión ambiental y pérdida de humedales. Aunado a esto, los efectos del cambio climático como la sequía prolongada, provocaron que algunas comunidades indígenas sean afectadas (Dugan, 1992; Olán-Pérez *et al.*, 2021).

¹ A lo largo de la historia de la gestión de los humedales costeros el mayor error ha sido otorgarles todo el control a los gobiernos y no considerar a las comunidades indígenas, quienes frecuentemente tienen mayor conocimiento o entendimiento del uso de los recursos naturales, ya que realizan un aprovechamiento integral y racional de los recursos para su alimento, energía y materiales para construcción (Moreno-Casasola e Infante-Mata, 2010; Ceccon, 2013). Asimismo, ¹ muchos de los servicios ambientales que proveen los humedales costeros son valorados y bien entendidos por las comunidades indígenas, por ello la correcta gestión deberá considerarlas en sus planes de manejo y, en primer término.

¹ Amenazas e implicaciones de la pérdida de los humedales costeros

Los humedales costeros son ecosistemas sensibles a los efectos del cambio climático principalmente al aumento global del nivel del mar y se encuentran gravemente amenazados por diversas causas antropogénicas, sobreexplotación industrial, el crecimiento de la mancha urbana o conversión de humedales para fines pecuarios (Marín-Muñiz *et al.*, 2016). Las implicaciones de la pérdida de humedales costeros tienen grandes resultados negativos para las poblaciones.

Sobre todo, aquellos que albergan una gran biodiversidad y se localizan en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Flores-Verdugo *et al.*, 2007). La actividad humana es uno de los factores que ocasionan alteraciones directa o indirectamente, por ejemplo, el aumento en el nivel del agua de mar, descargas de nutrientes que alteran los ciclos biogeoquímicos y otras perturbaciones (drenaje, relleno parcial o total, construcción de presas) y permiten un cambio gradual o drástico (Mitsch y Gosselink, 2015). ¹ Las principales causas de la pérdida de los humedales costeros ha sido la transformación de los ecosistemas. Algunas de estas transformaciones son el dragado, causando una desviación del agua, la escorrentía de contaminantes y sobreexplotación industrial o agrícola. Una de las más comunes es la agrícola, en ella las inundaciones temporales o permanentes limitan y cambian las condiciones del suelo con el aporte y movilidad de nutrientes, formando un suelo rico en nutrientes que se ha utilizado para diversos cultivos, como caña azúcar, arroz y algodón (Mitsch y Gosselink, 2015; International Wetlands, 2019).

1 La transformación por el desarrollo urbano (drenaje y relleno) ocasiona una pérdida en los humedales costeros del mundo, puesto que dos tercios de la población mundial habita en ellos y ha ejercido una presión socioambiental, en especial durante la década de los 50 hasta la década de los 70 (Mitsch y Gosselink, 2015). Finalmente, otra de las actividades más remarcables es la acuicultura, la cual incrementó considerablemente en la década de los 80 y 90 con una producción de 18 millones de t año⁻¹, aproximadamente (FAO, 1999; Páez-Osuna, 2005).

1 De igual forma, las modificaciones hidrológicas de los humedales cambian drásticamente las condiciones naturales, la principal de ellas es la desecación causada por la construcción de diques o drenajes cuyos propósitos son el control y transporte de agua, construcción de canales de navegación, rutas de transporte, puertos y actividad industrial petrolera. La construcción de carreteras sobre humedales costeros causa cambios ambientales en periodos cortos, por ejemplo, en la carga de sedimentos, la eliminación directa de la superficie forestal y principalmente en la alteración del régimen hidrológico (mareas, corrientes, escorrentía, flujo natural del agua) que es el principal suministro de energía y permite mantener las condiciones adecuadas (Mitsch y Gosselink, 2015).

1 La modificación del paisaje natural da lugar a muchos efectos o riesgos ecológicos difíciles de evaluar por sus resultados integrales, acumulativos o sinérgicos. Los principales efectos negativos son la pérdida de hábitat, perturbaciones ambientales; cambio en la hidrología y salinidad en los humedales costeros. Afectación o pérdida de los corredores biológicos naturales, mortalidad de la fauna silvestre, formación de un efecto barrera y cambio en el área que modifica el comportamiento de la fauna silvestre (Li *et al.*, 2014; Rivera-Arriaga, 2017). Todo esto, de igual manera, afecta a la vegetación, uno de los elementos más importantes de los humedales.

1 Los humedales costeros en el mundo son afectados por contaminantes, sin embargo, se ha demostrado que tienen la capacidad para limpiar el agua, mediante un proceso de filtración. Contrariamente, el exceso de contaminantes o carga de elementos químicos como el fósforo, metales pesados, aceites y otros compuestos tóxicos (Mitsch y Gosselink, 2015) que, puede causar cambios drásticos en la vegetación, deformidades excesivas en los organismos de los humedales o muerte de estos.

1 La modificación de las condiciones ambientales en los ecosistemas causadas por las actividades humanas, alteran directa e indirectamente la estructura y función de las diversas comunidades y facilita la invasión de especies exóticas. Por ello, si las especies nativas carecen de lo necesario para ocupar un lugar en el ecosistema y se da la introducción o fuga de especies exóticas, éstas pueden alterar las condiciones ambientales a su favor, brindando una gran oportunidad a sus poblaciones para establecerse (Moles *et al.*, 2008; Catford *et al.*, 2011).

1 Las especies exóticas son una amenaza para los ecosistemas, consumen y eliminan especies nativas, así como compiten por sus recursos, infectan con enfermedades y alteran las condiciones ambientales, lo que hace costosa la restauración o incluso devolver condiciones más deseables que involucren una mejor composición de especies, estructura de la comunidad o recuperación de la funcionalidad del ecosistema (Vitousek *et al.*, 1997; D'Antonio y Meyerson, 2002).

1 **Pérdida de los humedales costeros: tendencias de cambio**

El valor de los humedales costeros se centra en satisfacer las necesidades de desarrollo, basadas en el mantenimiento de su integridad funcional que permite obtener una amplia gama de servicios y productos en condiciones naturales y bajo la correcta gestión para su conservación (Dugan, 1992). Los humedales costeros forman parte de la historia de la humanidad y hoy en día su conservación es muy importante para el mantenimiento de los servicios ambientales que proveen (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Moreno-Casasola, 2008). Sin embargo, esto puede verse en peligro por las afectaciones antropogénicas e incluso por el cambio climático.

1 El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2014) argumenta que, si continúa la afectación y pérdida de los humedales costeros, alrededor del 35 % de la superficie de manglares en el sureste de Asia y el 38 % en Indonesia podría desaparecer entre 2000-2050. Por otra parte, existen tres factores que producen alteración y pérdida de los humedales costeros, estos son 1) los cambios demográficos y el desarrollo en zonas costeras, 2) cambios generados por el desarrollo económico, el turismo, industrias y uso urbano y 3)

las actividades productivas, como las acuícolas y agropecuarias, que generan un cambio en el uso del suelo (Moreno-Casasola, 2008).

Las tendencias actuales sobre la pérdida de los humedales costeros darán lugar a la desaparición de importantes servicios ecosistémicos como lo es las fuentes de alimento o medicina, filtración de aguas residuales o protección contra tormentas (Gardner *et al.*, 2015) y, al llegar a una devastación completa de los humedales costeros estaremos firmando nuestra propia extinción como seres humanos, pues las afectaciones antropogénicas siguen en aumento por el desarrollo y a la par el aceleramiento del cambio climático aumentan más los problemas que las soluciones.

1 Humedales costeros afectados por el cambio climático

Las consecuencias del cambio climático pueden ser severas, desde pequeños cambios en la vida diaria, como exposición a los rayos del sol, hasta inundaciones catastróficas (Naciones Unidas, 2019). Es por ello, que la convención Ramsar clasificó a los humedales costeros de acuerdo con las amenazas generadas por el cambio climático y clima severo, tiene un total de 171 sitios que ocupan una superficie de 18,172,568 ha en todo el mundo. Particularmente para América Latina y América del norte se reportan 46 sitios (2,919.720 ha), siendo México el país que más sitios Ramsar reporta con estas características (21 sitios), seguido de los Estados Unidos con ocho sitios (Ramsar, 2019; Ramsar, 2024).

De acuerdo con la vulnerabilidad de estos ecosistemas, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014) ha reportado que los datos que van de 1880 a 2012 reflejan que la temperatura media anual aumentó 0.85 °C y, de 1901 a 2010 el nivel medio del mar incrementó 19 cm debido al derretimiento del hielo. Así mismo, el agua de los océanos incrementó su temperatura, con ello el hielo y la nieve ha disminuido, reportándose una pérdida de 106 km² de hielo por cada 10 años.

Los efectos del cambio climático continuaron a pesar de parar las emisiones de gases de efecto invernadero. Se pronostica que la temperatura del agua de los océanos incrementará y el deshielo persistirá, para 2065 el nivel medio del mar podría presentar un aumento de entre 24 y 30 cm y para el 2100 podría ser de 40 a 63 cm. Por ello, el cambio climático es considerado una amenaza para los humedales costeros, puesto que a nivel mundial

comprende grandes afectaciones ambientales, como el cambio en la hidrología y vegetación (Burkett y Kusler, 2000; Williams *et al.*, 2003; Ferrati *et al.*, 2005; Mitsch *et al.*, 2013; Peñuelas *et al.*, 2018; Mehvar *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019). Es importante mencionar que cada región es distinta, por lo tanto, los ecosistemas difieren entre sí. Es por ello, que cada toma de decisiones futuras deberá considerarse de una manera específica.

1 Servicios ambientales de los humedales costeros

Los humedales costeros son importantes porque proveen de numerosos servicios ambientales, siendo caracterizados en función de su clase, tamaño y ubicación (Ramsar, 2002; Moreno-Casasola, 2005; CBD, 2015). Sin embargo, no todos los humedales costeros presentan los mismos servicios ambientales. Esto depende de muchos factores como las interacciones biológicas, químicas o físicas del sitio, que dan como resultado la generación de ciertos atributos (Dugan, 1992). Por ello, tienen una correlación con la calidad de vida, ya que los diversos factores, ayudan a mantenerlos y a satisfacer las necesidades del ser humano (Moreno-Casasola, 2005; CBD, 2015). Los servicios ecosistémicos del agua permiten la productividad en la agricultura, sitios para las aves acuáticas del mundo, especialmente para las migratorias, recursos alimenticios, valor por su uso recreacional, histórico, científico y cultural (Ramsar, 2002; Mitsch y Gosselink, 2015).

Muchos servicios ambientales son gratuitos y en diferentes partes del mundo alivian la pobreza, por ejemplo, las comunidades se favorecen cuando los servicios ecosistémicos son bastos y sufren cuando se degradan, aquellas que viven en los manglares se benefician principalmente de la pesca y la obtención de madera (UNEP, 2014; CBD, 2015).

El vínculo que existe entre el grado de conservación y los servicios ambientales están relacionados con la calidad, cantidad y mantenimiento de éstos (Moreno-Casasola, 2005; CBD, 2015; Gardner *et al.*, 2015). Anteriormente, los servicios ambientales eran categorizados en tres niveles jerárquicos; 1) el valor de la población incluye y se relaciona con las provisiones de hábitat, la caza de animales, recolección de madera, 2) los valores del ecosistema, se enfocan en la mejora de la calidad del agua, la mitigación de inundaciones y tormentas, recarga de acuíferos y sustento para las comunidades y, 3) los valores globales, basados en mantener las influencias de calidad del agua y aire en una escala más amplia que

a nivel de ecosistema, vigilar los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno, azufre y carbono (Mitsch y Gosselink, 2015; Ferro-Azcona *et al.*, 2019).

La EEM (Assessment Millennium Ecosystem, 2005) al igual que Dugan (1992), UNEP (2014), CBD (2015) y Gardner *et al.* (2015) clasifican los servicios ambientales para todos los ecosistemas en cuatro categorías: provisión, regulación, culturales y de soporte (Tabla 14.2). Además, existen cuatro componentes de bienestar humano de acuerdo con el potencial económico e indirectamente según la intensidad del vínculo entre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano (Tabla 14.3).

Tabla 14.2. Tipos de servicios ambientales de los humedales.

Tipo de servicio*	Características
Provisión	Son recursos tangibles, contabilizados y consumibles, pueden ser o no renovables. Se pueden encontrar en casi todos los tipos de humedales costeros, particularmente el servicio de comida es el único que se encuentra en todos los humedales costeros, este se centra en la producción pesquera, obtención de algas, plantas y otros invertebrados (la intensidad de producción puede variar). Los humedales costeros sostienen la vida de poblaciones de peces y otras formas de vida silvestre, debido a que brindan una zona de protección (desove, criadero, refugio o hábitat). Algunos son áreas destinadas a la ganadería como sitios de pastoreo, en ocasiones las hojas, los pastos y los frutos, pueden ser recolectados como forraje, para su venta o mantenimiento del ganado. Este aprovechamiento puede traer grandes beneficios a las comunidades involucradas, siempre que se respete la tasa de reproducción anual y la capacidad de regeneración de cada especie.
Regulación	Otorga el mantenimiento a los procesos y las funciones naturales de los ecosistemas, entre ellos se destaca la regulación del clima, composición química de la atmósfera (incluidos los gases del efecto invernadero), temperatura, precipitación, entre otros procesos. Estabilizan los microclimas, los ciclos hidrológicos, de nutrientes, materia y flujo de energía, de

Cultura

precipitación y temperatura. Estos servicios permiten mantener el régimen hidrológico (recarga, descarga, y almacén del agua, importante para el almacenamiento y prevención de inundaciones inusuales); controlan la contaminación mediante la retención, recuperación y remoción de excesos de nutrientes; ofrecen protección contra la erosión, retienen el suelo y contribuyen a la prevención de los cambios en la estructura de los humedales costeros. La protección contra la erosión se lleva a cabo por la vegetación, que estabiliza la zona costera y reduce la energía de las olas, corrientes y otras fuerzas de erosión, y con las raíces retiene los sedimentos de fondo. Este tipo de servicios son el resultado de la percepción del hombre, relación con la función o valor que cada cultura le otorga. Pueden ser de inspiración o espirituales, afines con los sentimientos personales o religiosos, de educación, recreacionales, oportunidades para el turismo y actividades recreacionales. Los significados culturales se basan en sentimiento personales y espirituales con el soporte de amplios paisajes y especies de vida silvestre que en ocasiones pueden otorgar inspiración artística. Durante siglos algunos de los humedales costeros, principalmente manglares, han sido fundamentales para la subsistencia de las comunidades locales, puesto que forman parte de su patrimonio cultural e identidad. En algunas comunidades los servicios de cultura permiten mantener los métodos de pesca tradicional, los usos y métodos de recolección de especies de flora y fauna, así como los conocimientos ecológicos. En algunas otras presentan un eslabón entre las creencias y prácticas espirituales como festivales, ritos religiosos, tabúes o áreas sagradas. Otro de sus servicios culturales es sobre los servicios de recreación, principalmente actividades turísticas y oportunidades recreacionales, éstas en los humedales incluyen la caza deportiva, la pesca, observación de aves, interpretación de senderos o paseos marinos, la fotografía de naturaleza, enfocada a especies como aves migratorias, peces, corales o diversos paisajes, la natación, el buceo, la navegación en veleros, kayak, snorkel, entre otros. Particularmente, los humedales costeros, son un centro de investigación o de educación

ambiental, principalmente sobre estudios ecológicos e hidrográficos, los cuales se han convertido en laboratorios vivos que han contribuido al conocimiento y divulgación, principalmente sobre la vida marina y la conexión entre los ecosistemas de agua dulce y marinos, aportando información a los vínculos entre la salud del ecosistema costero y el bienestar humano.

Soporte

Mantienen los procesos de los ecosistemas, así como permiten proveer el resto de los servicios ambientales y no siempre están implicados en el bienestar humano. Estos pueden ser, biodiversidad, hábitats temporales o permanentes para especies, formación del suelo, retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica, continuación del ciclo de nutrientes (como almacenamiento, reciclado, y adquisición de ellos) y polinización. Uno de los más importantes es la biodiversidad, el cual se caracteriza por la conformación de hábitats para especies residentes o migratorias. La diversidad de especies ha sido una de las características particulares de los humedales costeros, pues en ella se encuentran determinadas especies, algunas de ellas son endémicas o en peligro de extinción. La retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica favorece la calidad, principalmente del agua, ya que puede funcionar como una planta de tratamiento de agua, debido a la concentración de los nutrientes durante los diferentes periodos de inundación. Sin embargo, el exceso de nutrientes causa condiciones eutróficas y grandes alteraciones.

Fuente: elaboración propia a partir de Dugan (1992); Assessment Millennium Ecosystem (2005); Moreno-Casasola (2005); UNEP (2014); CBD (2015); Gardner *et al.* (2015). *Para conocer más sobre los servicios ambientales de acuerdo con la clasificación de humedales costeros con su magnitud relativa (por unidad de área) se puede consultar a Assessment Millennium Ecosystem (2005).

Componente	Características
------------	-----------------

Seguridad	¹ Se refiere al acceso seguro de los recursos naturales y protección ante los fenómenos naturales, este se relaciona con fuertes eventos climáticos o con el aprovisionamiento de suministros naturales (madera, leña, pesca).
Acceso	¹ Se refiere al acceso al material básico para una buena vida, por ejemplo el abastecimiento de alimentos, vivienda o bienes, el acceso a un ingreso económico por medio del turismo recreacional, la disponibilidad de agua para conservar el funcionamiento del ecosistema y satisfacer las necesidades personales.
Salud	¹ Otorga una buena calidad de vida, por ejemplo, el agua limpia, alimentos con fuente de proteína, productos forestales como leña, medicina tradicional.
Buenas relaciones sociales	¹ Se refiere a tener una excelente relación entre comunidades cercanas y con los visitantes que viven las experiencias de turismo recreacional, religiosas, espirituales o culturales a través de la vida tradicional de las comunidades locales.

Tabla 14.3. Componentes de bienestar humano en la restauración de acuerdo con el potencial bienestar y económico.

Fuente: elaboración propia a partir de Dugan (1992); Ceccon (2013); UNEP (2014); CBD (2015); Gardner *et al.* (2015); Ferro-Azcona *et al.* (2019).

¹ Técnicas y metodologías para la restauración de los humedales costeros

Se han establecido diferentes técnicas y metodologías para la restauración de humedales costeros, donde los mecanismos de ajuste entre la hidrología, la vegetación y el hábitat deben de conocerse antes de seleccionar la técnica adecuada (Zhao *et al.*, 2016). La restauración ecológica puede ser relativamente rápida hasta lenta y sin ningún resultado, lo anterior depende de la estrategia de restauración elegida y utilizada, las cuales puede ser categorizadas en pasiva, activa y creación (Tabla 14.4; Chazdon, 2008; Suding, 2011; Zhao *et al.*, 2016).

Tabla 14.4. Estrategia de restauración.

Estrategias de restauración categorizadas	Características
Activa	Tiene como objetivo reducir, detener o remover la causa de perturbación, pero con la necesidad de intervención humana, es decir con el control y mediación del área con el objetivo de mejorar, recrear o restaurar la estructura y función de los procesos o comunidades de los ecosistemas involucrados.
Pasiva	Tiene como objetivo la eliminación de las causas de la degradación para dirigir su trayectoria a un estado saludable, pero bajo condiciones naturales. Este tipo de restauración se enfoca en la mejora y recuperación de los procesos hidrológicos y ecológicos para generar una auto-restauración.
Creación	Esta se realiza para minimizar el impacto por la pérdida de humedales, principalmente marismas. Es un proceso de transformar áreas (tierras altas o hábitat submareal) en sitios donde antes no existían este tipo de humedales y requieren de condiciones apropiadas, particularmente hidrológicas.

Fuente: elaboración propia a partir de Mitsch y Wang (2000); Hunter *et al.* (2008); Suding (2011); Jarzemsky *et al.* (2013); Mitsch y Gosselink (2015); Zhao *et al.* (2016).

La elección de la técnica de restauración o creación deberá de considerar algunos factores ambientales e indicadores claves para analizar el potencial de restauración (Zhao *et al.*, 2016). El éxito de los sitios restaurados por el tipo de restauración elegida depende de diversos factores sociales y ambientales, asociados a la escalera de restauración: biodiversidad y servicios ecosistémicos, tiempo; particularmente el éxito de la restauración pasiva depende de la historia de uso, como el periodo de abandono, tipo y uso del suelo y disponibilidad de recursos bióticos (Chazdon, 2008).

La restauración de humedales costeros incluye experimentos en combinación con la vegetación, medición de diversos factores físicos como la salinidad y la hidrología, y biológicos como las invasiones de especies exóticas o antropogénicas, asimismo, incluye

1
otros estudios como los de contaminación y de salud (Scott *et al.*, 2014). El diseño de las estrategias de restauración en humedales costeros podría centrarse en su valoración económica y ambiental. A su vez, ésta podría mejorar las políticas públicas y ayudar a los tomadores de decisiones y comunidades involucradas, de tal manera que sea una restauración socialmente eficiente (Pueyo-Ros *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2018).

Estrategias de la restauración ecológica

1
Perrow y Davy (2002), Márquez-Huitzil (2005a) y Montes *et al.* (2007) han implementado distintas estrategias con la finalidad de controlar, mitigar o revertir los efectos de degradación, por ello la recuperación de los humedales degradados presenta varios caminos según los objetivos deseados, los cuales se describen a continuación:

- Restauración ecológica: intenta restablecer la organización y funcionamiento de un ecosistema degradado o destruido. Además, toma en cuenta las condiciones dinámicas de referencia semejantes a las originales (antes de sus afectaciones). Se realiza con ayuda de un programa coordinado por diferentes actores a corto, medio y largo plazo.
- Rehabilitación: son aquellos proyectos que no tienen como objetivo recuperar las funciones alteradas, si no, solo algunos elementos de su estructura, generalmente, coinciden con poblaciones o comunidades de organismos en leyes y convenios nacionales o internacionales sobre la conservación.
- Recreación: son acciones con el objetivo de crear elementos de ecosistemas o ecosistemas que no existían antes del origen de la perturbación antrópica.
- Remediación: son actividades o técnicas cuyo objetivo es tener un buen desempeño en el proceso y no en el fin. Su principal finalidad es eliminar todo agente causante de deterioro como sustancias contaminantes vertidas en agua, suelo o aire.
- Saneamiento: no existe ninguna intención de regresarlo a su estado original, solo de regresarlo a uno funcional y útil, podría decirse tener un equivalente al estado original, un ecosistema sustituto.

- **Mejoramiento:** son actividades que benefician el estado de un ecosistema, ya sea en proceso de restauración o no, cuyos objetivos pueden dirigirse al establecimiento de un ecosistema alternativo.
- **Mitigación:** es un término que tiene poco que ver la con la restauración, puesto que su objetivo es minimizar o moderar un efecto negativo en el ecosistema.
- **Recubrimiento vegetal:** puede implicar sólo el fortalecer los procesos de sucesión vegetal, productividad, ecología del suelo, incorporación y fijación de nutrientes, cuyo objetivo, es permitir el regreso a un estado original por sí sólo solamente estableciendo especies de vegetación o fauna nativas para el recubrimiento.

La restauración intenta regresar a un ecosistema a su trayectoria histórica (Montes *et al.*, 2007), por lo tanto, esas condiciones son el punto de partida ideal para establecer los objetivos de la restauración. Sin embargo, el camino para obtener las condiciones originales está limitado por las actuales, y en ocasiones puede orientar su desarrollo por un camino diferente, causar dificultades o imposibilitar su rehabilitación (SER, 2004). Por ello, los proyectos de restauración no siempre logran los objetivos deseados y en ocasiones los modelos de restauración presentan una la trayectoria con diferentes opciones, causando o imposibilitando el retorno de un estado de sucesión avanzado o deseado (estructural o funcional).

La estrategia utilizada para los objetivos del proyecto de restauración dependerá de las características o procesos que se busque recuperar, puesto que cada proyecto es particular y único. Por ello, es importante que al iniciar un proyecto de restauración se debe de conocer la estructura, composición de biodiversidad y funcionalidad original del ecosistema (Márquez-Huitzil, 2005a). En este sentido, Márquez-Huitzil (2005b) menciona cinco pasos que hay que seguir durante las actividades de restauración: 1) identificar y terminar la causa de afectación o disturbio, 2) mitigar los efectos producidos por la afectación o disturbio, 3) encaminar los objetivos a las condiciones más semejantes al ecosistema de referencia, 4) incorporar elementos de biodiversidad y abióticos originales y 5) monitorear y modificar los trabajos de restauración, siempre considerando los objetivos originales.

Trayectoria y alcances de la restauración ecológica

La trayectoria histórica se establece a través del conocimiento sobre la estructura, composición y funcionamiento de un ecosistema, los cuales han sido realizados sobre información ecológica, cultural e histórica, cuya combinación permite tener un ecosistema de referencia; se reconoce como un sitio existente, lo más semejante al sistema original y cercano al área en restauración, idealmente debe compartir condiciones ambientales semejantes (SER, 2004; Castillo, 2005), con el cual se pueda guiar al ecosistema. Además, esto permite incorporar diversas estrategias y manejar los ecosistemas de una manera adecuada y garantizar el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y la conservación de la biodiversidad.

Los alcances de la restauración ecológica dependen de diversos factores, los principales son el nivel de perturbación en el sitio y alrededor. El estado de conservación de los alrededores resulta primordial para la restauración, por ejemplo, en los lagos, lagunas, manglares, ubicados en las partes bajas de la cuenca, reciben muchos impactos ambientales que provienen de la degradación de las cuencas e influyen en el periodo de restauración o en la conservación, contrariamente, cuando el sitio a restaurar se encuentra cerca a un costado de un área conservada o protegida resulta favorecida (Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007).

La estructura y función de un ecosistema es importante para determinar cómo se puede recuperar y lograr los alcances de la restauración a través de su trayectoria; en la mayor parte de casos se requiere de grandes esfuerzo y largos periodos de tiempo, el trabajo debe ser permanente para llegar al estado deseado (Lindig-Cisneros *et al.*, 2003; Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007; Ceccon, 2013).

La restauración se hace más difícil de acuerdo con su nivel de degradación, disminuyendo las posibilidades de recuperar la función y estructura, por ello es el factor más importante para determinar la estrategia y las medidas prioritarias (Sánchez, 2005). Se reconoce que algunos proyectos pueden presentar condiciones de degradación particulares provenientes de las actividades humanas, como la introducción de especies exóticas o invasoras, que en algunos casos pueden ser irreversibles (Zedler, 2000; Lindig-Cisneros y Zambrano, 2007). Un ejemplo de ello es la creación de humedales en sitios donde han sido alterado el régimen hidrológico y que sean dominados por tulares (*Typha* spp.) con el objetivo de retener nutrientes disueltos en el agua y restaurar estas comunidades (Sánchez, 2005).

¹ Dentro de los procesos de degradación se reconocen diferentes aspectos, la pérdida de calidad y de extensión, los cuales permiten determinar el potencial para poder recuperar el área. Además, al aumentar el nivel de degradación de un área, los procesos de restauración resultan más complejos y difíciles de realizar, reduciendo la viabilidad económica y ecológica. Lindig-Cisneros y Zambrano (2007) mencionan que ¹ la transición entre las etapas de restauración depende de las condiciones dadas por los factores bióticos y abióticos, entre ellos destaca la variación del clima (precipitación y temperatura), ya que al modificar cualquier de los factores puede restablecer la estructura o función. Así como se debe conocer su topografía, hidroperíodo y la salinidad del humedal a restaurar.

¹ La sucesión en la restauración de los humedales costeros

La vegetación de humedales costeros ha evolucionado durante siglos para adaptarse a la alta salinidad, periodos de inundación y suelos con bajo nivel de oxígeno. Algunas plantas almacenan la sal en las hojas liberándola posteriormente por medio de las glándulas de sal, otras plantas de humedales costeros presentan adaptaciones fotosintéticas, esto les otorga una mayor tasa de producción de carbono y sitúa a los humedales costeros como hábitats extremadamente productivos donde se almacenan grandes cantidades de carbono en áreas pequeñas (Scott *et al.*, 2014).

¹ Las plantas en los humedales costeros han desarrollado adaptaciones que le confieren la capacidad de tolerar condiciones de estrés o especiales, como bajas concentraciones de oxígeno, diferentes periodos de inundación, estrés por las altas concentraciones de salinidad, entre otros. Los humedales costeros se encuentran estrechamente relacionados por medio del flujo superficial del agua y mantos freáticos, además muchos de ellos son considerados comunidades transicionales entre los sistemas terrestres y acuáticos ¹ (Lindig-Cisneros y Zedler, 2005).

Los estudios de cambio en la composición y abundancia de la vegetación durante el tiempo han sugerido mecanismos y sistemas de sucesión (Vega-Peña, 2005). La sucesión básicamente se refiere al proceso donde la composición de las comunidades cambia durante un periodo de tiempo, se enfoca en los cambios en la vegetación, el papel de la fauna, hongos,

bacterias, así como otros organismos de importancia a través de varias etapas hasta el estado clímax, último estado estable (Cain *et al.*, 2014).

La sucesión ecológica después de haber sufrido un cambio también es definida como “el patrón direccional no continuo y continuo de colonización y extinción en un sitio por poblaciones de especies” (Begon *et al.*, 2006). Dos tipos de sucesión se reconocen en las primeras etapas, estas son 1) la sucesión primaria comprende la colonización de hábitats que están desprovistos de vida, resultado de una catástrofe o de creación reciente; 2) la sucesión secundaria está involucrada en el restablecimiento de una comunidad donde una parte de sus componentes han sido destruidos; es decir, la comunidad aún se encuentra presente y se puede recuperar a partir de ellos (Begon *et al.*, 2006; Cain *et al.*, 2014).

En los humedales costeros dos factores controlan la sucesión de vegetación, que son los mismos de mayor importancia en la restauración, la salinidad y los periodos de inundación. La salinidad determina la distribución de la vegetación, los cambios de salinidad del suelo influyen en los estados de sucesión, este factor es influenciado por la salinidad del agua de marea, la frecuencia de inundación, la dilución de la lluvia y la evapotranspiración (Teal, 2020). Sin embargo, las actividades humanas también afectan los estados de sucesión autógena en los humedales costeros.

1 El papel del monitoreo en la restauración de humedales costeros

El papel del monitoreo evalúa algún cambio respecto al tiempo, considerando un estado de referencia, donde incluya los atributos (diversidad biológica, sociocultural), los cambios naturales respecto al tiempo (físicos, químicos o biológicos), las interacciones entre la estructura y procesos del ecosistema (retención de nutrientes, contaminantes, sedimentos, protección contra tormentas), percepción y producción social (bienestar humano, calidad de vida, recursos agrícolas, abastecimiento de agua; Abarca, 2007; Ramsar, 2010b).

SER (2004) menciona que existen tres estrategias para los monitoreos que permiten una evaluación son la comparación directa, identifica y determina parámetros de referencia para compararlos con el sitio monitoreado; el análisis de atributos compara datos cuantitativos y semicuantitativos de un monitoreo establecido con el de referencia, con el objetivo de saber cuánto se ha recuperado y el análisis de la trayectoria evalúa las tendencias del sitio

restaurado mediante gráficas de datos recolectados periódicamente con el objetivo de confirmar la trayectoria deseada.

Es importante señalar que el monitoreo en humedales debe de realizarse con un equipo interdisciplinario y contener elementos esenciales (Abarca, 2007). Ramsar (2010a) y Abarca (2007) mencionan que se deben realizar inventarios, evaluaciones y monitoreos con el objetivo de ayudar a la conservación y uso racional de los humedales, en el presenta la diferencia entre tres tipos de procedimientos: evaluación rápida, inventario, evaluación y monitoreo, este último lo define como: “reunión de información específica a largo plazo, atendiendo a hipótesis derivadas de actividades de evaluación, y aplicación de estos resultados de monitoreo a las actividades de gestión” sin embargo, los proyectos de restauración en humedales suelen contemplar todos esos procedimientos en uno.

Las sinergias que provocan diversos factores naturales, artificiales, autóctonos o alóctonos, causan que los programas de monitoreo sean más costosos y que sean más estrictos en sus diversas etapas (planeación, ejecución, análisis, comunicación). Por ello, los monitoreos deberán tener un enfoque que mida la integridad ecológica de los humedales (Abarca, 2007). El concepto de integridad biótica surge como respuesta a los intentos de integrar elementos estructurales y funcionales de los ecosistemas, principalmente acuáticos, con el objetivo de conocer el estado aproximado de sus procesos ecológicos y evolutivos (González, 2023). Posteriormente, dicho concepto extrapola al concepto de integridad ecológica, que pretendía integrar otros elementos y generalizarlo. Los índices desarrollados para medir la integridad (biótica o ecológica) permiten reconocer de una manera natural la variación de las comunidades, donde la medición puede ser de costo eficiente, válida científicamente, ofrece resultados rápidos, tiene enfoque regional, entre otros. Por lo anterior algunos organismos utilizados son macroinvertebrados acuáticos, peces, vegetación y aves (Pérez-Munguía *et al.*, 2007).

Estudios de caso de restauraciones exitosas de humedales costeros

Es importante considera que existen casos de éxito en la restauración de humedales costeros, en donde se establecieron conexiones y estrategias entre los componentes de la restauración y la sociedad local de cada área (Tabla 14.5). Estos pueden usarse como ejemplos de acciones

de restauración en diferentes humedales costeros, las cuales tuvieron respuestas favorables y sirven para futuros proyectos.

Tabla 14.5. Estudios de caso de restauración con éxito de humedales.

Estudio de caso	Restauración con éxito	Referencias
Restauración de una marisma en el estuario del río Tijuana	Se elaboró un plan de restauración con una serie de etapas que conforme avanzaron, la superficie restaurada incrementó. Probaron diferentes metodologías para la recuperación de la marisma, dos de las principales fueron la construcción de un canal que conectó la laguna de oxidación de aguas negras con el sistema natural de canales intermareales y la investigación sobre el número de especies necesarias para el restablecimiento de la vegetación en la planicie intermareal.	Lindig-Cisneros y Zedler (2005)
La restauración del manglar en la Laguna de Términos, México	Se creó un programa de restauración de manglar, el cual se basó en la rehabilitación hidrológica (apertura de un canal y canales secundarios) y posteriormente en la reforestación con plántulas de mangle negro (<i>Avicennia germinans</i>).	Agraz y Arriaga (2010); Agraz-Hernández <i>et al.</i> , (2010)
Prueba de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México	Se inició el programa de restauración ambiental y fortalecimiento regional en la microcuenca costera para implementar por medio de hombres y mujeres locales el desazolve de manantiales, construcción de un vivero de mangle y pruebas de reforestación en la ciénaga. El éxito de la restauración, especialmente para ciénagas costeras semiáridas, se basó en identificar el origen de	Febles-Patrón <i>et al.</i> , (2009)

		las afectaciones, particularmente ¹ se identificó la construcción de puentes y carreteras como fuente de afectación de los propágulos de manglar, por lo que el desazolve permitió cambiar la salinidad y el nivel de inundación, que determinan el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Además, es necesario contar con un monitoreo de los parámetros hidrológicos y de suelo (inundación y salinidad), ya que permite seleccionar eficientemente las especies de manglar que produzcan un mayor éxito en la restauración.
Experiencia de la restauración de la marisma salina en la Bahía de San Francisco, California, Estados Unidos	Se realizó una revegetación que estabilizó la línea de costa y mitigó los efectos negativos de la sedimentación. El éxito dependió de la investigación científica continua y del planteamiento de objetivos biológicos claros, alcanzables y medibles.	¹ Williams y Faber (2001)

Consideraciones finales

La presente revisión documental analizó en primer lugar el sistema de clasificación de los humedales costeros por tres agencias internacionales (USFWS, CCS, RAMSAR), las cuales coinciden en clasificar a los humedales por dos importantes componentes: el agua y el suelo. Estas agencias realizan acciones de conservación, monitoreo y gestión de los humedales de acuerdo con su posición geográfica, paisaje, así como tipo de vegetación. El sistema de Ramsar resultó ser el más completo, porque incluye más elementos (la vegetación, áreas de transición y especies vulnerables o en riesgo). Debido a lo anterior y a las funciones ecológicas propias de los humedales, derivadas de sus características hidrológicas, biológicas y químicas, cuatro tipos de humedales costeros fueron

contemplados en esta revisión: los humedales ribereños, las marismas de agua dulce, las marismas salinas y los manglares.

Además, se examinó el valor e importancia de los humedales a través del tiempo, el cual tuvo un gran cambio, ya que anteriormente se desconocían o desvaloraban. Posteriormente, la gestión de los humedales y sus recursos naturales integraron los análisis exhaustivos sociales, económicos y ecológicos, mejorando la valoración y su conocimiento.

1 Como resultado de este análisis se entiende que la conservación de los humedales costeros es una prioridad. Debido a que muchas comunidades e incluso naciones comparten sus recursos naturales (gran cantidad de humedales se encuentran entre dos naciones) por lo que pueden compartir experiencias en su gestión. El análisis de información muestra que existen grandes amenazas sobre los humedales costeros, ya que las actividades humanas no sustentables, no tradicionales, son las que ocasionan mayores alteraciones (ganadería, cultivo, turismo, urbanización, contaminación, introducción de especies exóticas) y constituyen la mayor amenaza.

Lo anterior ocasiona la pérdida de humedales costeros con impactos que pueden ser severos, acumulativos y sinérgicos. Además, los efectos del cambio climático tienen consecuencias sobre elementos de los humedales costeros (hidrología y vegetación). Si bien se encontró que ante cualquier situación de cambio natural los humedales tienen resistencia y resiliencia hidrológica, existe un límite tolerable, asimismo el efecto de la sinergia de los factores que afectan aún no es predecible.

La pérdida de los humedales costeros y sus amenazas afectan los servicios ambientales, por ello, la gestión, conservación y visualización generan un vínculo entre el grado de conservación y la calidad de los servicios ambientales. Esto dos anteriores se relacionan con el potencial económico y el bienestar humano, logrando una adecuada y amplia valoración.

La restauración de los humedales y en general de los ecosistemas costeros será una estrategia fundamental para su gestión, conservación, así como para el mantenimiento de sus funciones y servicios ambientales. La participación humana, así como el aporte científico serán prioritarios para la identificación anticipada del origen de los daños ambientales, el restablecimiento de los ecosistemas degradados, dañados o destruidos.

La restauración dependerá del tiempo y de las características del sitio, además, es recomendable incluir en el programa datos de un ecosistema de referencia (información

ecológica, cultural e histórica), así como considerar las afectaciones actuales (nivel de degradación). Finalmente, en todos los programas de restauración se deberá de integrar un equipo interdisciplinario que elabore un monitoreo que incluya, evalúe y compare los elementos y funciones más importantes de los sitios restaurados, preferentemente en períodos largos.

1 Las técnicas de restauración en humedales costeros se centran en los componentes agua, salinidad, biota y suelo, como la restauración de manglar en la Laguna de Términos, México que se basó principalmente en la rehabilitación hidrológica y la reforestación con manglar, en el cual se contemplaron factores químicos durante la apertura de canales.

Un factor clave a considerar en los proyectos de restauración es la capacidad de la vegetación para tolerar condiciones de estrés, lo que condiciona en parte el éxito de restauración, pero cuando se logra comprender el funcionamiento de este factor y su interacción con los otros componentes, es más fácil llevar a cabo acciones que favorezcan el proceso de sucesión (por ejemplo, restablecimiento de las conexiones hidrológicas) y rehabilitación de sus funciones.

Referencias

- Abarca, F.J. (2007). Técnicas y metodologías para la evaluación y monitoreo del estado de los humedales y ecosistemas acuáticos, En Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., Zambrano, L. (eds.), Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 113-144.
- Agraz, C.M. y Arriaga, V. (2010). Restauración del manglar en la Laguna de Términos, En Carabias, J., Sarukhán, J., de la Maza, J., Galindo, C. (eds.), Patrimonio natural de México: cien casos de éxito. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 150-153.
- Agraz-Hernández, C., Osti-Sáenz, J., García-Zaragoza, C., Chan-Keb, C., Chan-Canul, E., Arana-Lezama, R. y Torcuato-Hidalgo, M. (2010). Estrategias de restauración de ecosistemas de manglar en México. *JAINA Boletín Informativo*, 21(2), 5-27.
- Assessment Millennium Ecosystem (2005). Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis. Island Press, Washington, DC.

- Begon, M., Townsend, C.R. y Harper, J.L. (2006). Ecology from individuals to ecosystems, fourth ed. Blackwell Publishing, Malden, USA.
- Berlanga-Robles, C.A., Ruiz-Luna, A. y de la Lanza-Espino, G. (2008). Esquema de clasificación de los humedales de México. *Investigaciones Geográficas*, 66, 25-46.
- Bianchi, C., Mingo, S. Y Fernandez, V. (2019). Strategic management in Latin America: challenges in a changing world. *Journal of Business Research*, 105, 306-309. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.022>
- Brinson, M.M., Lugo, A.E. y Brown, S. (1981). Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 12, 123-161. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.12.110181.001011>
- Bruland, G.L. (2008). Coastal wetlands: function and role in reducing impact of land-based management. *Coastal Watershed Management*, 13, 185-124. <http://doi.org/10.2495/978-1-84564-091-0/04>
- Burkett, V. y Kusler, J. (2000). Climate change: potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 313-320. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04270.x>
- Cain, M.L., Bowman, W.D. y Hacker, S.D. (2014). Ecology. Sinauer, Massachusetts, USA.
- Castillo, A. (2005). Comunicación para la restauración: perspectiva de los actores e intervenciones con y por medio de las personas, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), Temas sobre restauración ecológica. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 67-76.
- Catford, J.A., Downes, B.J., Gippel, C.J. y Vesk, P.A. (2011). Flow regulation reduces native plant cover and facilitates exotic invasion in riparian wetlands. *Journal of Applied Ecology*, 8(2), 432-442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01945.x>
- CBD (2015). Wetlands and Ecosystem Services, Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/>
- Ceccon, E. (2013). Restauración en bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Universidad Nacional Autónoma de México, Ediciones D.D.S. México, Ediciones Díaz de Santos, Cuernavaca, México.

- Ceccon, E., Barrera-Cataño, J. I., Aronson, J. y Martínez-Garza, C. (2015). The socioecological complexity of ecological restoration in Mexico. *Restoration Ecology*, 23(4), 331-336. <https://doi.org/10.1111/rec.12228>
- Chazdon, R.L. (2008). Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458-1460. <http://doi.org/10.1126/science.1155365>
- D'Antonio, C. y Meyerson, L.A. (2002). Exotic plant species as problems and solutions in ecological restoration: a synthesis. *Restoration Ecology*, 10(4), 703-713. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.01051.x>
- Day Jr., J.W., Yáñez-Arancibia, A. y Kemp, W.M. (2012). Human impact and management of coastal and estuarine ecosystems, En Day J.W., Byron, C.C., Kemp, M. y Yáñez-Arancibia, A. (eds.), *Estuarine Ecology*, second ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA, pp. 483-495.
- Dugan, P.J. (1992). Conservación de humedales: un análisis de temas de actualidad y acciones necesarias. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Suiza.
- FAO (1999). Aquaculture production statistics - 1988-1997. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italia.
- Febles-Patrón, J.L., Novelo-López, J. y Batllori-Sampedro, E. (2009). Pruebas de reforestación de mangle en una ciénaga costera semiárida de Yucatán, México. *Madera y Bosques*, 15(3), 65-86. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1531186>
- Federal Geographic Data Committee. (2013). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. FGDC-STD-004-2013, second ed. Wetlands Subcommittee, Federal Geographic Data Committee and U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, DC.
- Ferrati, R., Canziani, G.A. y Ruiz-Moreno, D. (2005). Esteros del Ibera: hydrometeorological and hydrological characterization. *Ecological Modelling*, 186(1), 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.021>
- Ferro-Azcona, H., Espinoza-Tenorio, A., Calderón-Contreras, R., Ramenzoni, V.C., Gómez-País, M.M. y Mesa-Jurado, M.A. (2019). Adaptive capacity and social-ecological resilience of coastal areas: a systematic review. *Ocean and Coastal Management*, 173, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.01.005>

- 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 hidropérido: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80(80S), 33-47. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57708005>
- Gardner, R.C., Barchiesi, S., Beltrame, C., Finlayson, C.M., Galewski, T., Harrison, I., Paganini, M., Perennou, C., Pritchard, D.E., Rosenqvist, A. y Walpole, M. (2015). State of the world's wetlands and their services to people: a compilation of recent analyses. Ramsar Briefing Note no. 7. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.
- González, C. (2023). Evolution of the concept of ecological integrity and its study through networks. *Ecological Modelling*, 476, 110224. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110224>
- Greenberg, R., Maldonado, J.E., Droegge, S. y McDonald, M.V. (2006). Tidal marshes: a global perspective on the evolution and conservation of their terrestrial vertebrates. *BioScience*, 56(8), 675-685. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[675:TMAGPO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[675:TMAGPO]2.0.CO;2)
- Hamer, A.J., Harrison, L.J. y Stokeld, D. (2016). Road density and wetland context alter population structure of a freshwater turtle. *Austral Ecology*, 41(1), 53-64. <https://doi.org/10.1111/aec.12298>
- Hunter, R.G., Faulkner, S.P. y Gibson, K.A. (2008). The importance of hydrology in restoration of bottomland hardwood wetland functions. *Wetlands*, 28, 605-615. <https://doi.org/10.1672/07-139.1>
- International Wetlands (2019). Acuicultura, la pesca y la agricultura costera, Wetlands International Latinoamérica y el Caribe. <https://lac.wetlands.org/nuestro-enfoque/costas-y-deltas-llenos-de-vida/acuicultura-la-pesca-y-la-agricultura-costera/#read-more>
- IPCC (2014). Cambio climático 2014: informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza.

- Jarzemsky, R.D., Burchell II, M.R. y Evans, R.O. (2013). The impact of manipulating surface topography on the hydrologic restoration of a forested coastal wetland. *Ecological Engineering*, 58, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.002>
- Kundu, S., Kundu, B., Rana, N.K. y Mahato, S. (2024). Wetland degradation and its impacts on livelihoods and sustainable development goals: an overview. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 419-434. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.024>
- Li, Y., Yu, J., Ning, K., Du, S., Han, G., Qu, F., Wang, G., Fu, Y. y Zhan, C. (2014). Ecological effects of roads on the plant diversity of coastal wetland in the Yellow River Delta. *The Scientific World Journal*, 1, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2014/952051>
- Lindig-Cisneros, R., Desmond, J., Boyer, K.E. y Zedler, J.B. (2003). Wetland restoration thresholds: can a degradation transition be reversed with increased effort? *Ecological Applications*, 13(1), 193-205. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)013\[0193:WRTCAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0193:WRTCAD]2.0.CO;2)
- Lindig-Cisneros, R. y Zambrano, L. (2007). Aplicaciones prácticas para la conservación y restauración de humedales y otros ecosistemas acuáticos, En: Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E. y Zambrano, L. (eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 167-188.
- Lindig-Cisneros, R. y Zedler, J.B. (2005). La restauración de humedales, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), *Temas sobre restauración ecológica*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 201-214.
- López-Portillo, J., Vásquez-Reyes, V.M., Gómez-Aguilar, L.R. y Priego-Santander, A.G. (2010). Humedales, En Benítez, G. y Welsh, C. (eds.), *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz*. Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana, Veracruz, México, pp. 229-248.
- Marín-Muñiz, J.L., Hernández-Alarcón, M.E., Silva-Rivera, E. y Moreno-Casasola, P. (2016). Percepciones sobre servicios ambientales y pérdida de humedales arbóreos en la comunidad de Monte Gordo, Veracruz. *Madera y Bosques*, 22(1), 53-69. <https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/477/652>

- Márquez-Huitzil, R., (2005a). Fundamentos teóricos y convenciones para la restauración ecológica: aplicación de conceptos y teorías a la resolución de problemas en restauración, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), Temas sobre restauración ecológica. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 159-168.
- Márquez-Huitzil, R., (2005b). Planificación para la restauración asociada con el aprovechamiento de los recursos naturales, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), Temas sobre restauración ecológica. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 169-179.
- Mehvar, S., Filatova, T., Sarker, M.H., Dasgheib, A. y Ranasinghe, R. (2019). Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands: a case study in the west coast of Bangladesh. *Ocean and Coastal Management*, 169, 273-283. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.009>
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C.J., Jørgensen, S.E. y Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28, 583-597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Mitsch, W.J. y Gosselink, J.G. (2015). Wetlands, 5th ed, John Wiley & Sons, Inc., Nueva Jersey, USA.
- Mitsch, W.J. y Wang, N. (2000). Large-scale coastal wetland restoration on the Laurentian Great Lakes: Determining the potential for water quality improvement. *Ecological Engineering*, 15(3-4), 267-282. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00081-1)
- Moles, A.T., Gruber, M.A.M. y Bonser, S.P. (2008). A new framework for predicting invasive plant species. *Journal of Ecology*, 96(1), 13-17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01332.x>
- Montes, C., Rendón-Martos, M., Varela, L. y Cappa, M.J. (2007). Manual de restauración de humedales mediterráneos. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, España.
- Moreno-Casasola, P. (2008). Los humedales en México: tendencias y oportunidades. *Cuadernos de Biodiversidad*, 28, 10-18. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2008.28.02>

- Moreno-Casasola, P. y Infante-Mata., D. (2010). Veracruz tierra de ciénagas y pantanos. Comisión Organizadora del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave para la Conmemoración del Bicent, Veracruz, México.
- Moreno-Casasola, P. (2005). Servicios ambientales que proporcionan los humedales. Instituto de Ecología A.C, Veracruz, México.
- Naciones Unidas (2019). Naciones Unidas, Climate Change. <https://www.un.org/es/site-search?query=climate+change>
- Olán-Pérez, S., Camero-Martínez, L., Gallegos-Alamilla, S., Benavides-Martínez, L.D. y García-Hernández, L. (2021). Políticas públicas ambientales: zona costera de Tabasco. Universidad Popular de la Chontalpa, México.
- Páez-Osuna, F. (2005). Retos y perspectivas de la camaronicultura en la zona costera. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 1, 21-31.
- Peñuelas, J., Sardans, J., Filella, I., Estiarte, M., Llusià, J., Ogaya, R., Carnicer, J., Bartrons, M., Rivas-Ubach, A., Grau, O., Peguero, G., Margalef, O., Pla-Rabés, S., Stefanescu, C., Asensio, D., Preece, C., Liu, L., Verger, A., Rico, L., Barbeta, A., Liu, L., Verger, A., Rico, L., Barbeta, A., Achotegui-Castells, A., Gargallo-Garriga, A., Sperlich, D., Farré-Armengol, G., Fernández-Martínez, M., Liu, D., Zhang, C., Urbina, I., Camino, M., Vives, M., Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Gracia, C. y Terradas, J. (2018). Assessment of the impacts of climate change on Mediterranean terrestrial ecosystems based on data from field experiments and long-term monitored field gradients in Catalonia. *Environmental and Experimental Botany*, 52, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.05.012>
- Pérez-Munguía, R., Pineda López, R. y Medina-Nava, M. 2007. Integridad biótica de ambientes acuáticos, En Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E. y Zambrano, L. (eds.), Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 71-111.
- Perrow, M.R. y Davy, A.J. (2002). Handbook of ecological restoration. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511549984>
- Pueyo-Ros, J., Garcia, X., Ribas, A. y Fraguell, R.M. (2018). Ecological restoration of a coastal wetland at a mass tourism destination. Will the recreational value increase or

decrease? *Ecological Economics*, 148, 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.02.002>

Ramsar CREHO (2010). Tipos de humedales, <https://creho.org/humedales/tipos-de-humedales/>

Ramsar (2002). Servicios de los ecosistemas de humedales. Convención Ramsar, Gland, Suiza.

Ramsar (2006). Manual de la Convención de Ramsar: guía a la convención sobre los humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a ed. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Ramsar (2010a). Inventario, evaluación y monitoreo: marco integrado para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª ed. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Ramsar (2010b). Uso racional de los humedales: conceptos y enfoques para el uso racional de los humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª ed. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Ramsar (2014a). La Convención de Ramsar y su misión. <https://www.ramsar.org/>

Ramsar (2014b). Uso racional de los humedales. <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/uso-racional-de-los-humedales>

Ramsar (2016). The 4th strategic plan 2016-2024, in: adopted by the 12th Meeting of the Conference of the Parties, 1-9 June 2015, through Resolution XII.2, Punta del Este, Uruguay.

Ramsar (2017). Historia de la convención de Ramsar. <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/historia-de-la-convencion-de-ramsar>

Ramsar (2019). Ramsar sites information Service. <https://rsis.ramsar.org/?language=en>

Ramsar (2023). Partes contratantes en la Convención de Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.

Ramsar (2024). The list of wetlands of international importance. <https://www.ramsar.org/document/list-wetlands-international-importance-ramsar-list>

Rivera-Arriaga, E. (2017). La vulnerabilidad costera: elementos para la construcción de su resiliencia, En Botello, A.V., Villanueva, S., Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J.L. (eds.), Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático. Universidad

Juárez Autónoma de Tabasco, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Campeche, México, pp. 1-27.

Rubec, C. (2018). The canadian wetland classification system, En Finlayson, C.M., Everard, M., Irvine, K., McInnes, R.J., Middleton, B.A., van Dam, A.A. y Davidson, N.C. (eds.), The wetland book. I: structure and function, management, and methods. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 1577-1581. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9659-3_340

Sánchez, O. (2005). Restauración ecológica: algunos conceptos, postulados y debates al inicio del siglo XXI, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), Temas sobre restauración ecológica. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 15-29.

Scott, D.B., Frail-Gauthier, J. y Mudie, P.J. (2014). Coastal wetlands of the world: geology, ecology, distribution and applications. Cambridge University Press, North Carolina, USA.

SER (2004). Principios de SER International sobre la Restauración Ecológica. Society for Ecological Restoration International, Tucson, www.ser.org

11 Suding, K.N. (2011). Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 465-487. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115>

Tan, Y., Lv, D., Cheng, J., Wang, D., Mo, W. y Xiang, Y. (2018). Valuation of environmental improvements in coastal wetland restoration: a choice experiment approach. *Global Ecology and Conservation*, 15, e00440. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00440>

Teal, J. (2020). Succession in coastal wetlands, En Finlayson, C.M., Everard, M., Irvine, K., McInnes, R.J., Middleton, B.A., van Dam, A.A. y Davidson, N.C. (eds.), The wetland book. I: structure and function, management, and methods. Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 73-75. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6172-8>

Teutli-Hernández, C. y Herrera-Silveira, J.A. (2016). Estrategias de restauración de manglares de México: el caso de Yucatán, En Ceccon, E. y Martínez-Garza, C. (eds.), Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias,

- UNEP (2014). The importance of mangroves to people: a call to action. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Cambridge.
- Valiela, I., Kinney, E., Culbertson, J., Peacock, E. y Smith, S. (2009). Global losses of mangroves and salt marshes, En Duarte, C.M. (ed.), Global loss of coastal habitats rates, causes and consequences. Fundación BBVA, España, pp. 109-140.
- Vega-Peña, E.V. (2005). Algunos conceptos de ecología y sus vínculos con la restauración, En Sánchez, O., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdez, M. y Azuara, D. (eds.), Temas sobre restauración ecológica. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, pp. 147-158.
- Vidal, L., Vallarino, A., Benítez, I. y Correa, J. (2015). Implementation of the Ramsar strategic plan in coastal wetlands of the Península de Yucatán: regulations and normativity. *Latin America Journal Aquatic Research*, 43(5), 873-887.
<http://dx.doi.org/10.3856/vol43-issue5-fulltext-7>
- Vitousek, P.M., D'Antonio, C.M., Loope, L.L., Rejmanek, M. y Westbrooks, R.G. (1997). Introduced species: a significant component of human-caused global change. *New Zealand Journal of Ecology*, 21(1), 1-16.
- Williams, P. y Faber, P. (2001). Salt marsh restoration experience in San Francisco Bay. *Journal of Coastal Research*, 27, 203-211.
- Williams, K., MacDonald, M. y da Silveira Lobo Sternberg, L. (2003). Interactions of storm, drought, and sea-level rise on coastal forest: a case study. *Journal of Coastal Research*, 19(194), 1116-1121.
- Zedler, J.B. (2000). Progress in wetland restoration ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 15(10), 402-407. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01959-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01959-5)
- Zhang, Y., Li, W., Sun, G. y King, J.S. (2019). Coastal wetland resilience to climate variability: a hydrologic perspective. *Journal of Hydrology*, 568, 275-284.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.048>
- Zhao, Q., Bai, J., Huang, L., Gu, B., Lu, Q. y Gao, Z. (2016). A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, 60, 442-452.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.003>

Capítulo 15. Análisis transdisciplinario de los efectos del cambio climático en los socio-ecosistemas costeros de Campeche

Evelia Rivera-Arriaga³¹

Angelina del Carmen Peña Puch³²

Beatriz Edith Vega Serratos³³

Gregorio Posada Vanegas³⁴

Yassir Edén Torres Rojas³⁵

Resumen

Las costas tienen un gran valor social, económico y ambiental en México y particularmente en Campeche. Los sistemas costeros son complejos y son impactados de manera significativa por el aumento de población y por cambios en los ecosistemas. Los sistemas socio-ecológicos costeros son particularmente vulnerables al cambio climático debido al impacto ocasionado por el aumento en las temperaturas del aire y del mar, la acidificación del océano, el aumento del nivel del mar, cambios en la precipitación, condiciones de vientos y oleaje y la subsecuente erosión costera. En un sistema socio-ecológico (SES) hay una interacción entre elementos biofísicos y sociales, que generan dinámicas que pueden ser observadas, procesos adaptativos y con capacidad de organización propia o gobernanza que permite enfrentar la incertidumbre de los cambios por el clima y construir una resiliencia para poder sobrevivir. El concepto de resiliencia soporta un enfoque de manejo holístico, integrando no-linearidades y complejidad, lo cual puede apoyar una gobernanza costera que responda a problemas urgentes de frente a la incertidumbre por el cambio. La única forma de analizar

³¹ Doctora en Política Marina, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, <https://orcid.org/0000-0001-8467-7307>

³² Doctora en Ecología y Desarrollo Sustentable, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, <https://orcid.org/0000-0003-3860-7345>

³³ Doctora en Ingeniería, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, <https://orcid.org/0000-0002-7709-1807>

³⁴ Doctor en Ingeniería, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, <https://orcid.org/0000-0002-0795-7759>

³⁵ Doctor en Ciencias Marinas, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche, <https://orcid.org/0000-0002-9452-5224>

los efectos del cambio climático en los SES costeros es a través de un enfoque transdisciplinario que permita comprender desde múltiples puntos de vista, qué es lo que sucede y cómo puede adaptarse un SES.

Palabras clave: *socio-ecosistemas costeros, cambio climático, análisis transdisciplinario.*

Introducción

De acuerdo con el SROCC/IPCC (2019) más del 50% de la población mundial vive a lo largo de las costas marinas y producen más del 70% del total de la producción mundial de bienes y servicios. Muchas de las ciudades más grandes del mundo están ubicadas sobre o cerca de las costas donde las actividades económicas son intensas. De alguna manera, las zonas costeras están vinculadas con las regiones tierra adentro. De forma que los impactos en las costas afectan seriamente la economía y condiciones de vida, aun en lugares que están lejos de ellas (Glavovic *et al.*, 2022).

Las zonas costeras son altamente vulnerables a los efectos del cambio climático. El mayor peligro que afrontan es la elevación del nivel medio del mar, tormentas más intensas que generan mayores inundaciones y erosión litoral e incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos (Sandifer y Scott, 2021). La elevación del nivel medio del mar ha estado ocurriendo de manera continua durante los últimos 100 años. Ha aumentado 17 cm en el transcurso del siglo XX. Esto representa un peligro para las costas bajas o para aquellas por debajo del nivel del mar (IPCC/AR5, 2014; IPCC/SROCC, 2022).

El SROCC/IPCC (2019) plantea que el aumento en el nivel del mar en el mundo desde la mitad del siglo XIX ha sido más rápido que el promedio en los 2000 años anteriores. En los últimos 100 años, los niveles alcanzaron 1.7 mm por año entre 1901 y 2010. El incremento entre 1971 y 2010 fue de 2.0 mm por año, y entre 1993 y 2010 fue de 3.2 mm. En la Quinta Evaluación del IPCC se presentaron varios escenarios en los que el nivel del mar se elevará entre 17 y 38 cm en el periodo desde el 2050 y entre 26 y 82 cm para el año 2100. Este mismo reporte establece que en promedio el aumento del nivel del mar para finales del siglo XXI será de entre 40 y 63 cm, lo cual representa un serio peligro para las zonas costeras, en especial para las islas del Pacífico y Caribe Mexicanos.

Es importante reconocer que el aumento del nivel del mar será desigual y se espera que sea mucho mayor en los trópicos, donde en el siglo XXII puede haber elevaciones de 1 a 3 m, seguidos por un incremento de 5 a 10 m de los niveles de corrientes en el próximo siglo. Un océano que se eleva puede inundar asentamientos humanos e infraestructura costera e islas por lo que sus habitantes serán forzados a emigrar y buscar refugio en otros países (IPCC/AR5, 2014).

De acuerdo con el capítulo 6 del SROCC/IPCC (2019) los eventos extremos como las tormentas en las costas se han vuelto más frecuentes e intensas. Los vientos de las tormentas extremas pueden ocasionar surgencias, que es una elevación súbita en el nivel del mar. Éstas están acompañadas frecuentemente por precipitaciones extremas e inundaciones, poniendo en peligro el movimiento de embarcaciones, el trabajo en plataformas marinas de hidrocarburos y el turismo de playa, así como ocasionar erosión costera (CNE, s/f).

La erosión es un problema muy serio en la línea de costa en las zonas bajas. Afecta los asentamientos humanos, la infraestructura costera, los puertos, las tuberías de conducción de gas y petróleo, al turismo de playa y a los ecosistemas y recursos costeros (Paice y Chambers, s/f). De acuerdo con Cooley et al. (2022) los ecosistemas de zonas costeras bajas son particularmente vulnerables a la elevación del nivel del mar y a la erosión. Muchas especies de plantas y animales que viven en las zonas someras tienen un papel importante en la acumulación de nutrientes, por ejemplo, los manglares, humedales salinos y salobres que sostienen las cadenas alimentarias. Los ecosistemas costeros responden de manera diferente a los estresores relacionados con el cambio climático, dependiendo del ecosistema, la composición e interacción de especies y de cómo los estresores locales interactúan acumulativamente con las presiones que ejercen los efectos del cambio climático (Trégarot *et al.*, 2024).

La acidificación del agua marina afecta a los arrecifes de coral y a todos los organismos con caparazón ya que se vuelven más débiles y pequeños de tamaño, afectando la cadena alimentaria del mar. La acidificación marina pone en riesgo los servicios ecosistémicos valiosos que el mar provee a las comunidades costeras, tales como pesquerías, acuicultura y protección de la línea de costa (Doney *et al.*, 2020). El aumento de la temperatura atmosférica y del mar afecta la reproducción de los peces dificultando la restauración de poblaciones, y provocando enfermedades en los corales además del blanqueamiento, cubriéndose de algas.

Los peces emigran a latitudes donde la temperatura del agua es más baja afectando a las pesquerías. La pérdida de hábitats costeros y marinos como los corales, manglares, humedales y pastos marinos es otro peligro para la productividad de los peces (Huang *et al.*, 2021).

Sistemas socioecológicos

La relación entre ambiente y sociedad es dinámica y compleja y se le ha estudiado desde diversas perspectivas, algunos estudios son teóricos con un enfoque de los sistemas complejos adaptativos (Buckley 1968; Holland 1992, 2006; Gell-Mann 1994; Gunderson y Holling 2002; citados por Urquiza y Cadenas, 2015), y otra visión son los sistemas socio-ecológicos (Holling 2002; Norbert y Cumming 2008; Ostrom 2009; Rappaport 1977; citados por Urquiza y Cadenas, 2015). Los sistemas socioecológicos se explican como una red de relaciones de los recursos naturales que prestan bienes y servicios a los seres humanos, con variables sociales y económicas (Ostrom 2009; citado por Urquiza y Cadenas, 2015), es por esto que se trata de sistemas sociales humanos que interactúan entre sí en diferentes niveles, con diferentes grados de organización y autonomía dentro de un territorio dado y sus recursos.

En un sistema socio-ecológico (SES) hay una interacción entre elementos biofísicos y sociales, que generan dinámicas que pueden ser observadas, procesos adaptativos y con capacidad de organización propia (Norberg y Cumming 2008; Folke *et al.*, 2005; citados por Urquiza y Cadenas, 2015). De acuerdo con Urquiza y Cadenas (2015) para estudiar un SES es necesario determinar la relación entre el sistema social y el ambiente con el que se relaciona. Estos autores mencionan que los SES se mantienen gracias a un flujo bidireccional de materia, energía e información con el ambiente, por lo que la relación es muy estrecha entre ambos. Este constante intercambio y los procesos asociados pueden resultar en modificaciones ya sea en el funcionamiento o bien en la estructura del sistema social debido a cambios en el ambiente y viceversa (Gallopin 2006; citado por Urquiza y Cadenas, 2015). Esto es, la información del sistema social se produce en acoplamiento con el sistema ambiental, pero es un producto de las operaciones del sistema social.

Urquiza y Cadenas (2015) consideran que el SES se encuentra en un “acoplamiento estructural”, lo cual permite que se disparen mutuamente cambios estructurales. De acuerdo

con estos autores, la estructura de un sistema es su aspecto variable, y su organización es su estado constante. Ambos son propiedades de cualquier sistema acoplado a su entorno (Maturana y Varela 1984; citados por Urquiza y Cadenas, 2015). Ahora, para que un sistema sea viable debe ser capaz de mantener su organización haciendo cambios en su estructura. Un sistema socio-ecológico es una unidad de orden mayor que está delimitada espacialmente a raíz de estas interacciones recurrentes (Urquiza y Cadenas, 2015).

Refulio-Coronado *et al.* (2021) establecen que las zonas costeras han sostenido comunidades humanas por siglos y la salud del ambiente costero y marino depende de las interconexiones entre los sistemas sociales y los sistemas ecológicos. Sin embargo, en los últimos 60 años los ambientes costeros han sido sujetos a cambios dramáticos asociados con actividades humanas. El rápido crecimiento de la población ha tenido consecuencias negativas para los litorales en muchas partes del mundo (Li *et al.*, 2018). El daño que resulta del exceso de nutrientes vertidos por fuentes terrestres resulta en hypoxia que provoca la muerte de fauna y flora además del cierre de las playas. Otros daños incluyen sobrepesca histórica en muchas partes del mundo con el colapso de las poblaciones de numerosas especies (Myers y Worm, 2003; Perry *et al.*, 2010). Los plásticos y microplásticos que afectan desde al plancton hasta las ballenas que ingieren basura (Jambeck *et al.*, 2015). Hasta los derrames de sustancias tóxicas como hidrocarburos de las plataformas marinas y las estaciones de carga en el Golfo de México.

Cuando los gobiernos, las comunidades costeras y los individuos reaccionan a estos cambios ambientales y adaptan sus comportamientos, hay efectos de retroalimentación de los ecosistemas costeros y marinos, y es necesario estudiarlos (Refulio-Coronado *et al.*, 2021).

Un elemento importante dentro de los SES costeros es la ubicación de sus elementos y el ambiente, la proximidad geográfica a la línea de costa e infraestructura, la conectividad espacial, lo que permite identificar las relaciones existentes entre elementos y a partir de ellas establecer las propiedades del sistema social y ecológico (Cumming 2011; Norberg y Cumming 2008; citados por Urquiza y Cadenas, 2015).

Cerón-Hernández *et al.* (2019) consideran que los sistemas socio-ecológicos incluyen a los diferentes elementos de interacción como entes físico-químicos, sino también entes biofísicos que siguen sus procesos evolutivos, con lo cual se pueden comprender cómo las reglas, las normas, las instituciones y las culturas evolucionan y cambian siguiendo procesos

y dinámicas (Axelrod y Cohen, 1999; Costanza, 2014). Por lo tanto, un estudio con este enfoque implica la investigación ecológica, así como las prácticas sociales, la gobernabilidad, las estructuras institucionales, la tecnología (Rincón-Ruiz *et al.*, 2014), al igual que los valores y creencias de las personas hacia el ambiente (Burkhard y Maes, 2017) y las dimensiones que en una relación armónica mantienen la estabilidad del sistema.

Vidal-Hernández *et al.* (2020) modificaron un esquema de Liehr *et al.* (2017) donde se aprecia en la Figura 15.1 el círculo del centro que representa al socioecosistema como una esfera híbrida emergente que surge anidada de la interacción entre un sistema social y un sistema natural, y que contiene interacciones altamente conectadas en el espacio y en el tiempo que no pueden atribuirse a la mera esfera natural o social o a un área de superposición entre ambas. Esta esfera incluye a los componentes y los procesos de cada sistema. Los componentes que interactúan y se retroalimentan, pueden ser: sociales, económicos, culturales y políticos, así como biológicos, geológicos, químicos y físicos; por ejemplo, playas, poblaciones pesqueras, acuicultores, turismo. Los procesos pueden ser: dispersión de semillas, irrigación, cosecha, extracción de agua, inmigración, aprovechamiento de recursos forestales. Además de otros factores relevantes que definen el tipo de las interrelaciones del socioecosistema como: el conocimiento local (científico o tradicional); las prácticas sociales definidas por los patrones de uso y comportamiento sobre materiales o bienes del socioecosistema; las instituciones (económicas, políticas culturales o legales) que asignan reglas de acción o de control al uso de los socioecosistemas; y las tecnológicas que se refieren a las estructuras o desarrollos elaborados por los habitantes o usuarios para interferir con las funciones ecológicas normales, a fin de hacer algunos servicios específicos disponibles para su uso.

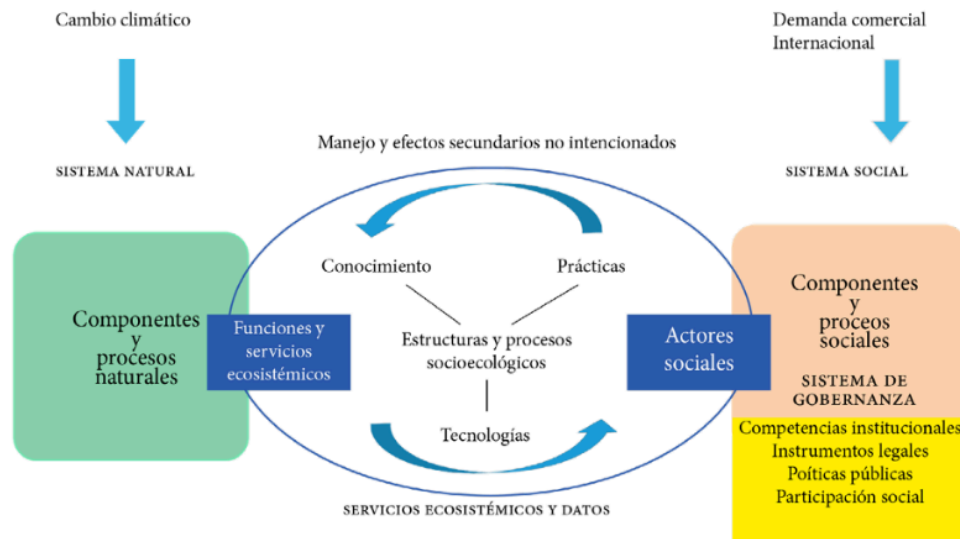


Figura 15.1. Esquema conceptual del Sistema socio-ecológico. Fuente: Ávila-Foucault y Espejel (2020).

Resiliencia en SES

Resiliencia, vulnerabilidad y capacidad adaptativa son tres conceptos clave aplicados para comprender cómo los SES responden al cambio (Gallopín, 2006; Kaplan-Hallam *et al.*, 2017). Estos conceptos se originan de campos diferentes, pero han sido ampliamente usados como indicadores a través de los cuales analizar los vínculos dentro y entre sistemas sociales y ecológicos. Para SES costero-marinos, la resiliencia se refiere a una propiedad interna de un sistema y específicamente su capacidad para mantener el *statu quo* ante un cambio, disturbio o impacto (Refugio-Coronado *et al.*, 2021). Un disturbio incluye factores biofísicos, sociales, económicos, institucionales y políticos que afectan a las comunidades humanas y su ambiente (Lozoya *et al.*, 2015). Un sistema resiliente no cruza un umbral, se mantiene a sí mismo en el mismo estado estable y retiene sus funciones esenciales, estructura, identidad y retroalimentación mientras el sistema se recupera (Walker *et al.*, 2004; Lozoya *et al.*, 2015). Holling (1973; citado por Urquiza y Cadenas, 2015) plantea que la resiliencia es la mantención de un sistema, su capacidad para absorber las perturbaciones de su entorno, incluyendo su capacidad de cambio, pero también la mantención de las relaciones entre sus

componentes. La capacidad del sistema para reorganizarse manteniendo sus características esenciales se relaciona con la mantención de la función y estructura del sistema.

Urquiza y Cadenas (2015) consideran que es necesario identificar la resiliencia de un SES a través de los siguientes elementos: “1. *La magnitud del cambio que es soportado por un sistema manteniendo su estado, el que refiere al ancho de su cuenca de atracción (latitud), o dicho de otro modo, su capacidad de cambio estructural con mantenimiento de su organización*; 2. *La capacidad del sistema para modificar su auto-organización (resistencia)*; 3. *La capacidad del sistema de aprender y mejorar sus posibilidades de respuesta*; 4. *El límite o umbral del sistema que al ser cruzado impide la recuperación (precariedad), es decir, cuando se alcanza un punto de no-retorno* y 5. *La posibilidad de influenciar los estados deseados por la dinámica del sistema en sus diferentes niveles (panarquía)*”.

Todos estos elementos tienen que ver con mantener la organización del sistema, con sus componentes y relaciones en el tiempo y su capacidad de adaptación. Así se pueden seleccionar criterios de observación para la resiliencia. Varios autores citados por Urquiza y Cadenas (2015) como Ostrom (1990); Rappaport (1977); Tompkins y Adger (2004); Olsson et al. (2004); Norberg y Cumming (2008) y Cumming (2011), identifican cuatro características centrales para mantener la resiliencia del sistema:

1. La diversidad, redundancia y flexibilidad, tanto en el ámbito social como en el ecológico.

Cuando los SES se enfrentan a situaciones inciertas, la variedad de los elementos mejora las posibilidades de enfrentarlas con éxito. Las variedades pueden ser institucionales, tecnológicas, productivas, biológicas, etc. Cuando un SES es diverso e incluso tiene redundancia de elementos, posee una mayor flexibilidad y por lo tanto una mejor posibilidad de reacción frente a los cambios del entorno, ya que dicha diversidad le entrega más herramientas ante la incertidumbre.

2. El alto grado de conectividad entre sus elementos y con sus entornos; junto con la capacidad de las organizaciones y comunidades para colaborar vertical y horizontalmente.

En los SES se ha identificado que tanto la fragmentación ecológica como la fragmentación social disminuyen las posibilidades de reacción del sistema, ya que el aislamiento hace que no haya conectividad disminuyendo el acceso a diversidad social y ecológica. La conexión

entre actores sociales y la creación de redes estables en el tiempo, permite que surjan nuevas oportunidades de interacciones y con mayor acceso a la diversidad de recursos sociales y ecológicos. Esto es fundamental para combatir la incertidumbre.

3. *La memoria del sistema está vinculada a su capacidad para procesar información y aprender.* La capacidad para aprender en un SES acerca de su relación con el entorno y la sociedad se llama la “memoria socio-ecológica” (Folke *et al.*, 2005; Olsson *et al.*, 2006; citados por Urquiza y Cadenas, 2015). Esto representa el acervo de conocimientos y aprendizajes de un sistema social acerca del ambiente con el que se relaciona, cómo este ha sido afectado por cambios y las diversas estrategias de adaptación que se han desarrollado.

4. *La capacidad para modificar las estructuras y condiciones del sistema a partir de su auto-organización.* Esta capacidad es la de ¹⁹mantener la identidad original del SES cuando su estado es deseable o, también se refiere a la posibilidad de generar los cambios necesarios para llegar a estados más deseables, esto sucede cuando se enfrenta una amenaza o cuando las condiciones originales del sistema no son las esperadas (Folke 2006; Engle 2011; citados por Urquiza y Cadenas, 2015).

Para poder abordar sistemas complejos como los SES costeros es necesario aplicar investigación transdisciplinaria que busca: (a) comprender una parte relevante de la complejidad del problema, (b) tomando en cuenta la diversidad de percepciones experienciales y científicas y (c) conectando conocimiento abstracto y de casos específicos, (d) para desarrollar conocimientos y prácticas que promuevan lo que es percibido como el bien común (Hoffmann-Riem *et al.*, 2008; citado por Merçon, 2022).

De acuerdo con Refulio-Coronado *et al.* (2021) el concepto de vulnerabilidad es una propiedad compuesta del sistema que consiste en tres elementos: exposición al disturbio, sensibilidad a esos disturbios y capacidad para adaptarse a los disturbios. Para estos autores la resiliencia es una propiedad de la fuerza interna del sistema, mientras que la vulnerabilidad recae parte en factores externos tales como la exposición al disturbio. De esta forma para estos autores la evaluación de la vulnerabilidad es un indicador del impacto de uno o más disturbios en los sistemas sociales y/o ecológicos y hacen una sinergia potencial en los impactos de múltiples disturbios (Murphy, 2015). Tanto en sistemas sociales como ecológicos, la exposición a los disturbios puede variar en número, severidad o duración (Refulio-Coronado *et al.*, 2021).

La capacidad adaptativa denota las características que determinan si un sistema se puede ajustar para sobrevivir y el grado de ese ajuste (Manuel-Navarrete *et al.*, 2007). En los sistemas ecológicos, la capacidad adaptativa se refiere a la capacidad de las especies a persistir a pesar de las condiciones cambiantes y es fortalecido por su diversidad genética, biológica o de paisaje. En los sistemas sociales, la adaptación se refiere a las características que permite el sistema para responder efectivamente a los cambios en los sistemas ecológicos y mantener la calidad existente de vida, así como sus estructuras organizativas, y políticas que pueden promulgar proyectos de infraestructura o estrategias de manejo de riesgos formales o informales (Refulio-Coronado *et al.*, 2021).

El objetivo de este capítulo es aplicar un enfoque transdisciplinario al análisis de riesgos costeros para disminuir la vulnerabilidad, favorecer el empoderamiento y la gobernanza y mejorar su adaptación a amenazas naturales y antrópicas en comunidades costeras precarias. Se va a tomar en cuenta el marco de la Política Nacional de Cambio Climático, su Ley y todos sus instrumentos para la gestión del riesgo. Se incluirán estudios de procesos oceanográficos, de sistemas socio-ambientales, y de manejo de recursos pesqueros de forma sostenible. En la perspectiva transdisciplinar, el manejo costero de riesgos centrados en la población afectada se debe contar con la información necesaria social, económica, ambiental, oceanográfica y de cambio climático para actuar sobre situaciones específicas. De esta forma, se facilita la implementación de estrategias y medidas a corto plazo considerando la construcción de resiliencia en el largo plazo.

2. Descripción física, geológica, ambiental y social de los SES costeros

Descripción Física y geológica de los SES costeros

La descripción física, geológica y ambiental de los SES Costeros analizados, Isla del Carmen, Sabancuy, Champotón, Seybaplaya e Isla Arena (Figura 15.2), en el presente trabajo se llevó a cabo a partir de la información publicada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) en el compendio geográfico de los municipios del Carmen, Champotón, Campeche y Calkiní, (INEGI, 2011). Para cada SES se obtuvo la información relacionada con la fisiografía, tipo de roca, suelo dominante, relieve, clima, región hidrológica, precipitación y temperatura media, así como uso de suelo y vegetación (Tabla 15.1), en donde

las localidades se presentan en función de su ubicación, comenzando por Isla del Carmen que se encuentra en la parte sur oeste del estado de Campeche y terminando en Isla Aguada que se encuentra al norte, en el límite con el Estado de Yucatán.



Figura 15.2. Ubicación de los SES Isla del Carmen, Sabancuy, Champotón, Seybaplaya e Isla Arena, Estado de Campeche.

Tabla 15.1. Descripción general de los Sistemas Socioecológicos Costeros en estudio

Sistemas Socioecológicos Costeros						
Características		Isla del Carmen	Sabancuy	Champotón	Seybaplaya	Isla Aguada
Fisiografía	Provincia	XIII Llanura Costera del Golfo Sur				
	Subprovincia	Llanuras y Pantanos de Tabasqueños				
		Carso y Lomeríos de Carso Yucateco				

	Topoformas	Llanura de barreras inundable y salina con dunas y playa o salina	Lomerío bajo con llanuras, Llanura aluvial costera salina	Lomerío bajo con llanuras, Playa o barra inundable y salina	Playa o barra inundable y salina
Geología	Roca	Caliza y suelo litoral	Suelo y Sedimentaria	Sedimentaria	Suelo
	Suelo Dominante	Arenosol, Solonchak y Zona Urbana	Arenosol, Zona Urbana y Leptosol	Phaeozem y Vertisol	Arenosol
	Relieve	Playa o Barra	Llanura	Llanura	Lomerío
Clima		Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y Cálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad	Cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media	Cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad	Playa o Barra Semiseco muy cálido y cálido
Hidrografía	Región Hidrológica	No. 30 Usumacinta	Grijalva-Yucatán (Campeche)	Oeste Yucatán	Yucatán Norte (Yucatán)
	Cuenca	Laguna de Términos	R. Champotón y Otros	Yucatán	

Subcuenca	Laguna de Términos	R. Champotón	Toop	N.A.
Precipitación	1,300 a 2000 mm	1,000 a 1,500 mm	1,000 a 1,200 mm	700 a 1,100 mm
Temperatura media	26 a 28 °C			
Uso de suelo y vegetación	Zona Urbana, Selva y Manglar	Selva y Manglar	Zona Urbana, Agricultura y Manglar	Selva y Pastizal y Manglar y Cuerpo de agua

Descripción ambiental de los SES costeros

La costa norte de Campeche se caracteriza por su provincia carbonatada. Por otro lado, la zona sur se distingue por su provincia deltaica, marcada por la influencia estuarina (Flores-Hernández *et al.*, 2010). Esta diversidad de condiciones marinas contribuye a la riqueza biológica y a la complejidad de los SSE en la región. Entre los SSE que podemos encontrar en la zona norte, se encuentran Seybaplaya que no presenta sitios RAMSAR o Áreas Naturales Protegidas (ANP) y Champotón que presenta un sitio RAMSAR desde 2004 y una ANP a partir de 2024. La zona sur está influenciada por la Laguna de Términos y abarca los SSE Sabancuy, Isla Aguada, Ciudad del Carmen, en esta región el ANP se declaró en 1994 y el Sitio RAMSAR en 2004 (Tabla 15.2).

Tabla 15.2. Descripción de la conservación en la zona costera

Seybaplaya	Chapotón	Sabancuy	Isla Aguada	Ciudad del Carmen
------------	----------	----------	-------------	-------------------

Contexto biofísico	Su composición es kárstica, con línea costera que carece de playas.	Amplia plataforma con profundidades bajas y pendiente suave y prolongada. Pequeños bajos que forman barras cerca de la costa. Presencia del río Champotón.	Presencia del sistema fluvio-lagunar estero de Sabancuy, formado por barreras de arena y manglar. Presencia de playas.	Ubicación de la Boca de Puerto Real, que es entrada a la Laguna de Términos. En su porción oriental, y cuenta con una amplia plataforma.	Presencia de la Laguna de Términos, con aporte de sedimentos y el desarrollo de llanuras aluviales de los ríos.
Sitio Ramsar	N/A	Es un hábitat crucial para la anidación de especies en peligro de extinción como la tortuga carey (<i>Eretmochelys imbricata</i>) y la tortuga verde (<i>Chelonia mydas</i>). Las playas arenosas de la zona ofrecen el ambiente perfecto para que estas tortugas marinas puedan anidar. Además, Playa Chenkan es hogar de otras especies protegidas como el	La Laguna de Términos es una vasta región de importante biodiversidad. Con una extensión de 705,016 hectáreas, abarca los municipios de El Carmen, Palizada, Escárcega y Champotón. Cuenta con tres sistemas fluvio-lagunares y una cobertura de manglares que se extiende por más de 127,000 hectáreas, proporcionando un hábitat vital para una diversidad de vida silvestre. Entre las especies destacadas que habitan esta región, se encuentran las colonias de aves acuáticas de gran tamaño, como el majestuoso Jabirú (<i>Jabiru mycteria</i>) y la Cigüeña Americana (<i>Mycteria americana</i>), ambas de gran importancia ecológica y cultural.		

		loro de frente blanca (<i>Amazona albifrons</i>) y el tamandúa mexicano (<i>Tamandua mexicana</i>).
ANP	N/A	Playa Chenkan, La Laguna de Términos fue declarada como ubicada en el Área de Protección de Flora y Fauna en municipio de 1994, esta área es esencial para la conservación de ecosistemas únicos y santuario natural que especies endémicas. se extiende sobre 39.55 hectáreas. Este lugar, designado como santuario en el año 2024.

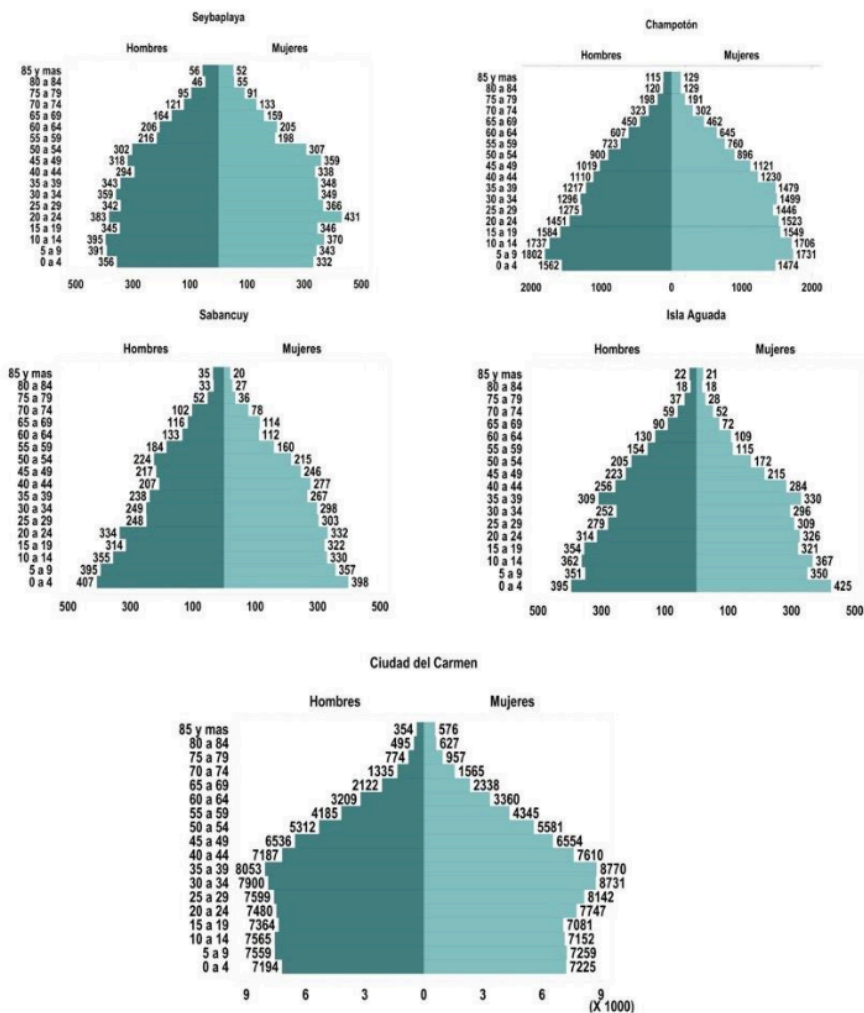
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Peña-Puch *et al.* (2020); Vidal *et al.* (2015).

La conservación de los humedales enfrenta desafíos significativos. Los sitios Ramsar, designados por su importancia internacional, han sido cuestionados en su efectividad debido a amenazas como la pérdida de manglares y el riesgo para ciertas especies de aves marinas. Los incendios, la contaminación, los cambios en el uso de la tierra y la disminución de los caudales de agua han alterado los hábitats costeros, exacerbando la pérdida de manglares (Vidal *et al.*, 2015). Las ANP han jugado un papel crucial en la prevención de la pérdida total del patrimonio natural, aunque no están exentas de problemas socioambientales (Neger y Crespo-Guerrero 2021). Sin embargo, han surgido conflictos socio políticos que surgen por la falta de consulta con las comunidades locales y la limitación del desarrollo económico. En el sector pesquero, los conflictos por el acceso a las zonas de pesca y la regulación de la pesca artesanal se han intensificado, especialmente en torno a la sobrepesca de pulpo (*Octopus maya*) y la captura de especies prohibidas, como el pepino de mar (Géneros *Isostichopus*, *Holothuria*) y los juveniles de camarón rosado (*Farfantepenaeus duorarum*)

(Villalobos-Zapata y Mendoza 2010; Peña-Puch *et al.*, 2020; Peña-Puch, 2023). Además, los impactos antropogénicos como la urbanización, el desarrollo de infraestructura, la introducción de especies invasoras, la erosión costera (CONANP, 2024), y la explotación petrolera han agravado la situación, con derrames de petróleo que representan una amenaza adicional para la biodiversidad.

Descripción social de los SES costeros

La distribución de la población en la región se concentra principalmente a lo largo de la línea de costa, como en Cd. del Carmen, que cuenta con 191,238 habitantes. Le sigue Champotón con una población de 35,799, Seybaplaya con 9,515, y en menor medida, Sabancuy e Isla Aguada con 7,744 y 7,620 habitantes, respectivamente. En cuanto a la composición de género, Champotón presenta una mayoría femenina con el 51.1% de mujeres, similar a Cd. del Carmen con el 50.9%, Seybaplaya y Sabancuy con un 50.3%. En contraste, Isla Aguada muestra un equilibrio perfecto entre géneros, con un 50% de mujeres y un 50% de hombres (INEGI, 2020). Sin embargo, la distribución de la población por rango de edad varía entre localidades, Sabancuy e Isla Aguada tiene la mayor población en el rango de 0 a 4 años y en Champotón destaca entre 5 y 9 años, es decir, se requiere priorizar las necesidades básicas de los infantes, por otra parte, en Seybaplaya la mayor población se encuentra entre 20 y 24 años y Cd. del Carmen en el rango de 35 a 39 años, por lo que, se debe fomentar emprendimientos que generen que promuevan la salud y el empleo digno (Gráfica 15.1).



Gráfica 15.1. Pirámides de población. Elaboración propia a partir de datos de INEGI (2020).

Respecto al total de la población, el mayor porcentaje de habitantes con acceso a servicios de salud es en Seybaplaya (81.7%), seguido de Ciudad del Carmen (75.7%), Sabancuy (72.8%), Champotón (72.2%) y en menor medida Isla Aguada (71.1%). El nivel educativo en diversas localidades de Campeche muestra una variabilidad reflejando distintos retos y realidades socioeconómicas. En Sabancuy, el promedio de años de estudio es de 7.84, lo que

sugiere que una parte considerable de la población no ha completado la educación secundaria. Isla Aguada presenta una situación similar, con un promedio de 8.14 años de escolaridad. Estas cifras contrastan con las de Seybaplaya y Champotón, donde los promedios son de 9.56 y 9.19 años respectivamente, y especialmente con Ciudad del Carmen, que destaca con un promedio de 11 años de estudio (INEGI, 2020).

La población Económicamente Activa (PEA) de Ciudad del Carmen es de 97,515 personas, pero la Tasa de desempleo es la mayor de las localidades con de 2.4%. Champotón tiene una PEA de 16,983 personas y tiene una tasa de desempleo de 1.1%. Para Seybaplaya la PEA es de 4,351, pero la tasa de desempleo es de 1.5%. Sabancuy e Isla Aguada tienen una PEA similar de 3,664 y 97,515 personas respectivamente, esta región tiene la menor tasa de desempleo de 0.5% y 0.6% (INEGI, 2020). La pobreza, medida por el rango en el que se encuentra la población de estas localidades, también varía considerablemente. Sabancuy e Isla Aguada tienen los rangos más altos de pobreza, con un 60% a 80% de su población dentro de esta categoría, respectivamente. Champotón sigue con un rango de pobreza del 40% al 60%, mientras que Ciudad del Carmen tiene el rango más bajo, con un 20% al 40% de su población en situación de pobreza. Para Seybaplaya, no se dispone de datos (CONEVAL, 2020).

En las localidades de Sabancuy e Isla Aguada, a pesar de contar con el menor número de viviendas, con 2,880 y 2,889 respectivamente, se observa la mayor tasa de desocupación, alcanzando el 23.9% y el 24.6%. Por otro lado, Champotón, con un total de 12,384 viviendas, presenta un 19.1% de ellas sin ocupar. En contraste, Seybaplaya (con 3,256 viviendas) y Ciudad del Carmen (con 66,661 viviendas) muestran una situación más favorable en cuanto a la ocupación de viviendas, con tasas de desocupación del 16.3% y 16.6% respectivamente, siendo estas las más bajas de las localidades mencionadas. En Champotón y Seybaplaya, casi todas las viviendas cuentan con acceso a agua entubada, destacando con un 98.8% y 98.5% respectivamente. Por otro lado, Isla Aguada muestra un menor porcentaje, con el 92.5%, indicando áreas de oportunidad para mejorar el acceso al agua potable. A pesar de la alta distribución de agua entubada en Seybaplaya, esta localidad presenta el porcentaje más bajo en cuanto a viviendas con drenaje, con un 94%, lo que podría señalar desafíos en la gestión de aguas residuales. La electricidad es un servicio con una distribución bastante uniforme

entre las localidades, manteniendo un promedio del 98.3%, lo que sugiere una cobertura amplia de este servicio (Tabla 15.3).

Sin embargo, el acceso a las comunicaciones muestra gran variabilidad. Sabancuy e Isla Aguada tienen los porcentajes más bajos en cuanto a la posesión de PC, con un 15.6% y 15.7% respectivamente, así como en acceso a Internet, con un 14.6% y 18.8%, y en teléfono fijo, con un 9.8% y 3.6%. Estas cifras podrían reflejar una brecha digital que afecta a estas comunidades, limitando el acceso a la información y a oportunidades educativas y de empleo. Por el contrario, Ciudad del Carmen sobresale con la mayor distribución de tecnologías de la información y comunicación, con un 50% de las viviendas equipadas con PC, un 67.2% con acceso a Internet, un 47.4% con teléfono fijo y un impresionante 93.2% con teléfono celular (Tabla 15.3). Estos datos no solo indican una infraestructura de comunicaciones más desarrollada, sino también una relación con un mayor nivel de ingresos y desarrollo económico. Estas cifras reflejan una disparidad significativa en la distribución y ocupación de vivienda en la región, lo que podría indicar diferencias en el desarrollo económico y social entre estas localidades. Es importante considerar estos datos para la planificación urbana y el desarrollo regional, buscando estrategias que promuevan una ocupación más equitativa y mejoren la calidad de vida de los habitantes de estas áreas.

Tabla 15.3. Descripción del acceso a servicios públicos y medios de comunicación de la zona costera de Campeche.

	Seybaplay a	Champotón n	Sabancuy	Isla Aguada	Ciudad del Carmen
Viviendas	3256	12384	2880	2889	66661
Totales					
V habitadas	2725	10015	2192	2177	55582
V. con agua entubada al interior	2684	9890	2070	2013	52613
V. con drenaje	2561	9764	2137	2123	54310

V. con electricidad	2688	9894	2152	2132	54342
V. con PC	827	2830	343	342	27788
V. con Internet	736	4624	321	409	37362
V. con teléfono fijo	475	2010	215	79	26367
V. con teléfono celular	2302	8975	1813	1841	51818

Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2020).

3. Análisis transdisciplinario de planeación ambiental y gobernanza, pesquero y económico

De acuerdo con Pérez-Matos y Setién-Quezada (2008) la transdisciplinariedad: Es un "proceso según el cual los límites de las disciplinas individuales se trascienden para tratar problemas desde perspectivas múltiples con vistas a generar conocimiento emergente" (Nicolescu, 1998). Según Pérez-Matos (2007), se considera "la transformación e integración del conocimiento desde todas las perspectivas interesadas para definir y tratar problemas complejos". Pérez-Matos y Setién-Quezada (2008) consideran que es difícil trabajar con la transdisciplinariedad. Nicolescu (1998) postula los fundamentos científicos transdisciplinarios al proponer tres principios básicos, estos son: *la existencia de varios niveles de realidad, la lógica del tercero incluido y la complejidad*.

En la carta de la transdisciplinariedad, elaborada en 1994 en el primer congreso internacional sobre el tema (Pérez-Matos y Setién-Quezada, 2008), plantea en el artículo 2: *"El reconocimiento de la existencia de diferentes niveles de la realidad, regidos por diferentes lógicas, es inherente a la actitud transdisciplinaria. Toda tentativa de reducir la realidad a un solo nivel, regido por una única lógica, no se sitúa en el campo de la transdisciplinariedad"* (Carta de Transdisciplinariedad, 1994).

El objetivo de la transdisciplinariedad en las zonas costeras de Campeche es reflexionar sobre formas específicas para promover el fortalecimiento de la territorialidad, entendida como la construcción y expresión cultural e intersubjetiva de los sistemas socio-ecológicos en los territorios de las costas campechanas, desde entidades que proponen la integralidad de las acciones sustantivas que propone el manejo costero integrado.

De acuerdo con Hernández-López (2023) está creciendo la necesidad del diálogo entre las ciencias sociales y las ciencias naturales para comprender y solucionar de manera adecuada los problemas de las costas, tanto para las entidades gubernamentales, académicos y organizaciones de la sociedad civil que hacen extensión, docencia o investigación científica, y que requieren enfoques transdisciplinares para los actores que practican la política pública. Esto porque en México los temas de pobreza o modelos de desarrollo no sólo son sociales o económicos, sino que los conflictos ambientales y culturales, implican también interacciones geográficas, disciplinares, políticas, ya que movilizan a nuevos actores en las agendas y movimientos sociales, tanto a nivel local, nacional como internacional. Los nuevos temas de agenda piden de la participación pública sobre modelos de desarrollo, acciones y programas que aborden sus necesidades y requerimientos, integrando un nuevo orden con participación ciudadana activa y apropiada de las agendas, que pide una nueva integralidad ambiental, política, económica y social, frente a los tradicionales modelos de desarrollo sectorial.

Las zonas costeras son consideradas como sistemas complejos que involucran redes interactivas y vínculos a través de múltiples niveles, con andamiajes verticales y horizontales con las instituciones que son responsables de los cambios en el sistema socioambiental en el tiempo y son sensibles al contexto local, crean nuevas oportunidades para la toma de decisiones y fomentan la colaboración que cataliza las transformaciones. Aquí entran algunos casos donde se identifican los elementos críticos que caracterizan la transformación hacia un manejo comunitario de los recursos: 1) reglas y prácticas; 2) normas, valores y creencias, y 3) distribución del poder, autoridad y recursos.

De acuerdo con Cerón-Hernández *et al.* (2019) para tratar los problemas complejos se requiere una perspectiva transdisciplinar (Dooley, 2003; Barboza, 2013; Sauvé *et al.*, 2016; Holzer *et al.*, 2018; citados por Hernández *et al.*, 2019). Esto es, se requiere de una propuesta científica reflexiva, integradora, basada en el método científico, dirigido a solucionar

problemas sociales, ambientales, económicos, políticos y culturales relacionados, diferenciando e integrando el conocimiento de diversas líneas de investigación científicas y de base social (Burkhard y Maes, 2017; Berrouet *et al.*, 2018; citados por Cerón-Hernández *et al.*, 2019), tomando en cuenta el conocimiento local, el entendimiento y uso espacio-temporal de la comunidad, para tener una idea aproximada más clara de la realidad. La transdisciplinariedad representa, entonces, la coordinación general de la ciencia (Zscheischler y Rogga, 2015: citados por Cerón-Hernández *et al.*, 2019), la educación y la innovación hacia un propósito social-ambiental específico (Pohl, 2008; Zscheischler y Rogga, 2015; citados por Cerón-Hernández *et al.*, 2019).

Para Cerón-Hernández *et al.* (2019) las ciencias ambientales integran el pensamiento complejo con una mayor comprensión de la evaluación de los servicios ecosistémicos prestados dentro de un marco conceptual como los sistemas socioecológicos (Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005; Wang y Ho, 2011; citados por estos autores) y así comprender la interacción entre los activos socioeconómicos y las bases biofísicas del funcionamiento del ecosistema, la representación temporal y espacial de la provisión de servicios ecosistémicos para los sistemas socioecológicos y distinguir entre los tipos de beneficiarios y su poder de influir en las decisiones relacionadas con el manejo, flujo y uso de los servicios prestados por los ecosistemas costeros de cada componente (Cerón-Hernández *et al.*, 2019).

Análisis Transdisciplinario de planeación ambiental y gobernanza

Para Camacho-Valdez *et al.* (2020) Los socioecosistemas costeros son dinámicos y complejos y están en constante adaptación; ⁵ involucran interacciones entre actores, instituciones, aspectos ecológicos y recursos limitados y coevolucionan como un todo integrado a diferentes escalas espacio temporales.

A su vez, Glaser y Glaser (2014) establecen que los efectos del cambio climático actuales y previstos requieren ⁵ llevar a cabo investigaciones que consideren de manera explícita las interacciones entre niveles y escalas referidas a los socio-ecosistemas costeros. De acuerdo con Gibson *et al.* (2000), las escalas se refieren a las dimensiones, espaciales o temporales,

cuantitativas o analíticas utilizadas para medir o estudiar un fenómeno. Los niveles son las unidades de análisis localizadas en diferentes posiciones de una escala.

Dentro de la planeación costera, es importante implementar el manejo integrado de las zonas costeras (MIZC) que incluya la gobernanza socio-ecológica para la toma de decisiones referida a estos sistemas. Esto conlleva el desafío vigente de formular estudios que contemplen distintas escalas, niveles y sus interrelaciones. El MIZC aborda los retos que imponen el desfase entre las escalas biofísicas y las jurisdiccionales, la discrepancia entre las escalas de valoración y gestión y la falta de vínculos entre escalas y niveles.

De acuerdo con Camacho-Valdez *et al.* (2020) la relación de escala espacio-tiempo de la mayoría de los procesos biofísicos en los sistemas costeros socio-ecológicos puede alterarse de manera drástica por actividades humanas, y éstos a su vez pueden manifestarse en ámbitos globales y locales simultáneamente (Figura 15.3). Estos autores establecen que el entendimiento y las soluciones a los problemas ambientales en los socio-ecosistemas requieren de los procesos biofísicos y de la integración con procesos económicos, políticos e institucionales que también tienen su propia escala espacial y temporal.

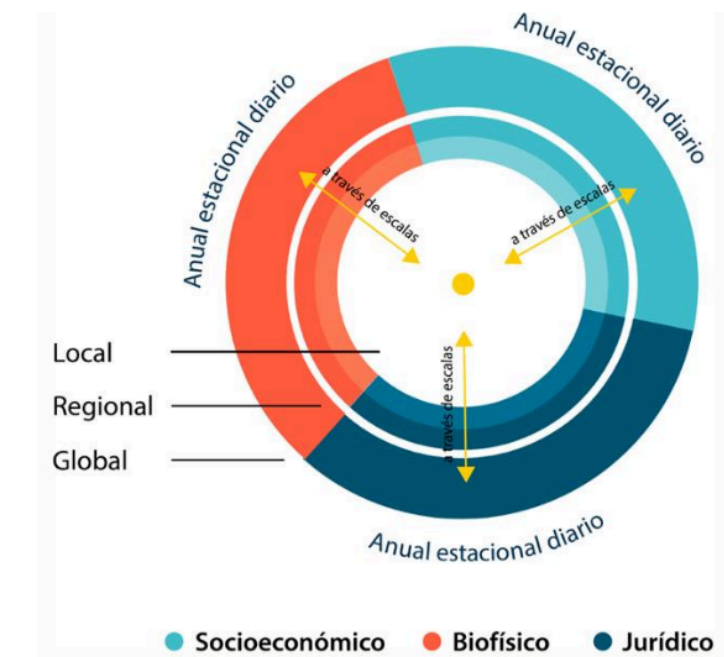


Figura 15.3. Interacciones entre las diferentes escalas y niveles en un socio-ecosistema.

Fuente: Camacho-Valdez *et al.* (2020) modificado de Niiranen *et al.* (2018).

Para poder implementar el MIZC y por consiguiente la planeación y gobernanza costeras en los socio-ecosistemas se deben considerar: ⁵ 1) un territorio biogeofísico, 2) un asunto o problema identificado y 3) los agentes sociales e instituciones asociadas, construidas con una visión del sistema desde abajo y desde arriba (Glaser y Glaeser, 2014).

Para Eger *et al.* (2021) el concepto de MIZC ha sido ampliamente utilizado para alcanzar el desarrollo sostenible de las costas desde principios de los 1980s, cuya meta es el mantener o restaurar la integridad ecológica y fomentar la calidad de vida a la par que se desarrolla la economía en los socio-ecosistemas costeros (Cicin-Sain y Belfiore, 2005; Ngoran y Xue, 2017; Rodríguez, 2017). El MIZC ofrece una alternativa para el manejo intersectorial de los SES costero-marinos. Sin embargo, estudios recientes concuerdan que la gobernanza permanece como un reto mayor para el avance del MIZC (Cortner *et al.*, 1998; Ehler, 2003; Stojanovic y Ballinger, 2009; Nobre *et al.*, 2017) ya que los usuarios y actores luchan con varios retos fundamentales de la gobernanza. Estos incluyen debates concernientes al papel del control centralizado versus la devolución de responsabilidades, como asegurar la estabilidad y funcionamiento del sistema de gobernanza mientras que también se provee de suficiente flexibilidad para adaptarse a cambios en las condiciones sociales y ecológicas y cómo se balancean los objetivos de corto y largo plazos (Stojanovic *et al.*, 2004; Taljaard *et al.*, 2012).

De acuerdo con Eger *et al.* (2021) la gobernanza se refiere a una serie de procesos e instituciones regulatorias a través de las cuales los usuarios influyen en las acciones y resultados ambientales. Los sistemas de gobernanza incluyen un rango de procesos de gobierno, mercado y sociales que en conjunto influyen en la forma en que los usuarios interactúan con el ambiente y con ellos mismos (Pittman y Armitage, 2016). El MIZC como gobernanza difiere del manejo tradicional sectorial facilitando la integración de esfuerzos, objetivos, actores y procesos, a través y entre redes sociales y ecológicas (i.e. horizontales, verticales, transdisciplinarias y tierra-mar) de forma que se alcanzan los resultados sostenibles socio-ecológicos. El MIZC como un proceso político involucra varios pasos, incluyendo la planeación y el desarrollo, implementación, monitoreo, evaluación y adaptación (Benham y Daniell, 2016). El MIZC es un término paraguas para otros procesos,

herramientas y conceptos relacionados, tales como el manejo basado en ecosistemas, redes de áreas marinas protegidas, planificación espacial marina, entre otras.

El sistema de gobernanza socio-ambiental está constituido por un grupo de actores localizado en territorios costeros determinados, con objetivos distintos pero con una visión unificada de mejorar el nivel de vida de la población en armonía con los recursos naturales y el ambiente (Rivera-Arriaga y Escofet, 2019).

Para RefulioCoronado *et al.* (2021) la gobernanza costera se enfrenta siempre a la incertidumbre profunda y a la evolución de vulnerabilidades de los impactos a través de escalas, multidimensionales e inter-temporales del cambio climático en el uso del territorio, biodiversidad, tecnología, condiciones socioeconómicas y políticas de las SES costeras. Es por esto que la gobernanza costera de las SES debe evolucionar para incluir estrategias más adaptativas para la toma de decisiones con el objetivo de fortalecer la resiliencia del sistema ante eventos súbitos (Berkes, 2017; Gladstone-Gallagher *et al.*, 2019; Elsawah *et al.*, 2020). Los cambios tienen que ver con los umbrales o puntos de inflexión, denotan esos puntos en los cuales los cambios “empujan” al sistema de un estado a otro, frecuentemente de manera irreversible (Broderstad y Eythórsson, 2014; Hossain y Szabo, 2017). Los umbrales biofísicos o ecológicos son definidos por características físicas, químicas y biológicas del sistema ecológico; mientras que los umbrales sociales están definidos por los límites de las habilidades de un individuo o sociedad para aprender y adaptarse (Renaud *et al.*, 2010; Kaplan-Hallam *et al.*, 2017). Los umbrales son tratados usualmente como fronteras estables y/o como niveles máximos de tolerancia a disturbios por el sistema mientras éste es capaz de mantener su configuración original. Cuando la pérdida de la función de un sistema es muy grande, la configuración del sistema cambia. El proceso de los umbrales en los SES ha sido caracterizado por Hossain y Szabo (2017) como el comienzo con un cambio en una característica del sistema que excede el umbral del sistema mismo y transita hacia otro estado por medio de una retroalimentación positiva y falta de respuesta temprana de gobernanza al cambio.

Análisis transdisciplinario pesquero

La profunda interconexión entre el entorno natural y el ámbito social de la pesca de pequeña escala indica que el conocimiento y la comprensión de esta actividad deben trascender los confines de las disciplinas académicas tradicionales (Said et al. 2018). Es cada vez más evidente que las pesquerías son sistemas complejos que requieren una visión holística que integre las dimensiones sociales y ambientales interconectadas para lograr su sostenibilidad. Si bien el manejo tradicional de los recursos pesqueros se enfoca en las especies objetivo y asociadas (Peña-Puch, 2020). Limitar la evaluación y el manejo de las pesquerías a una escala espacial definida y enfocarse únicamente en las materias primas básicas (FAO, 2015), resulta insuficiente para evitar el deterioro de las pesquerías. El enfoque tradicional descuida otros aspectos que son cruciales como los factores sociales, institucionales y ecológicos, los cuales son indispensables para una gestión pesquera integral y efectiva (Ostrom, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2011; Leslie *et al.*, 2015).

Para responder a los desafíos socioambientales que enfrentan las pesquerías debe asumir una perspectiva socio-ecológica que integre las dimensiones sociales y ecológicas (Hilborn *et al.*, 2015). Es decir, se debe reconocer que el manejo de los sistemas pesqueros no solo involucra la biología de los recursos marinos, sino también la dinámica institucional, económica y cultural de los usuarios (Espinoza-Tenorio *et al.*, 2011). La simplificación de la compleja relación entre sociedad y el ambiente, junto con la aplicación de medidas de manejo pesquero uniformes en contextos locales diversos, generó omisiones en la gestión, llevando al deterioro de muchas pesquerías (Wyborn y Bixler, 2013). Un enfoque transdisciplinario en la investigación, la capacitación y el aprendizaje sobre la pesca en pequeña escala puede ser una herramienta poderosa para enfrentar los desafíos del mundo real en este sector, abriendo camino hacia soluciones prácticas y efectivas. Este enfoque, que integra conocimientos y perspectivas de diversas disciplinas, como la biología, la ecología, la sociología, la economía y la antropología, permite obtener una comprensión más completa de la complejidad de la pesca de pequeña escala y los desafíos que enfrentan las comunidades pesqueras (Said *et al.*, 2018).

La investigación transdisciplinaria, un enfoque que busca desentrañar la complejidad de los problemas en la pesca en pequeña escala, nos brinda herramientas y métodos valiosos para analizar estas problemáticas desde una perspectiva más holística. En su máximo potencial, la transdisciplinariedad puede impulsar transformaciones en las instituciones y sus funciones,

dando lugar a innovaciones en la gobernanza de los sistemas pesqueros (Said et al., 2018). El enfoque holístico busca un equilibrio entre la información ambiental, socioeconómica y el conocimiento tradicional de los usuarios (Berkes et al., 2001; Christie *et al.*, 2007) para promover el desarrollo sostenible (Manson y Die, 2001; Essington y Punt, 2011; Hilborn, 2011). Este marco metodológico holístico implica comprender un sistema complejo y adquirir un conocimiento más profundo para fomentar mejores acuerdos de gobernanza (Basurto *et al.*, 2013; Partelow, 2014).

Un enfoque transdisciplinario permite que pescadores locales, científicos y formuladores de políticas, compartan y adquieran habilidades entre sí, y comparten información para generar nuevos conocimientos que no se limitan a una sola disciplina (Figura 15.4). De esta manera, el grupo construye un conjunto de conocimientos sobre un sistema pesquero específico, observando los sistemas sociales, naturales y de gobernanza, sus relaciones e interacciones, y cómo se conectan con los procesos e instituciones que operan en diferentes escalas temporales, geográficas y organizativas (Said *et al.*, 2018).

A pesar de que se han desarrollado marcos metodológicos de enfoque socio-ecológico, la implementación de este manejo puede ser difícil, ya que, cada sistema socio-ecológico pesquero tiene un comportamiento único no solo con los polígonos de pesca, sino también por los usuarios que radican en las localidades pesqueras (Peña-Puch, 2020). Las pesquerías de Campeche necesitan nuevos enfoques de evaluación y manejo que impliquen la corresponsabilidad entre el sector pesquero y los tomadores de decisiones, tomando en cuenta los aspectos ecológicos, sociales y económicos de la actividad pesquera (Villalobos-Zapata y Mendoza, 2010). El principal desafío es implementar estos métodos y enfoques de manejo en pesquerías con poca evaluación y escasa aplicación de medidas de gestión (Anderson *et al.*, 2018; Hilborn *et al.*, 2019).

Adicionalmente, Los desafíos en la investigación transdisciplinaria pueden ocurrir en las diferentes etapas, por ejemplo, pueden ocurrir dificultades durante el proceso de identificación y formulación del problema, estos conflictos de interés pueden afectar el nivel de confianza entre los miembros del equipo transdisciplinario, lo que afectaría la de integración de los diferentes tipos de conocimiento y las oportunidades de financiación, que podrían obstaculizar el desarrollo de una completa investigación transdisciplinaria (Said *et al.*, 2018).

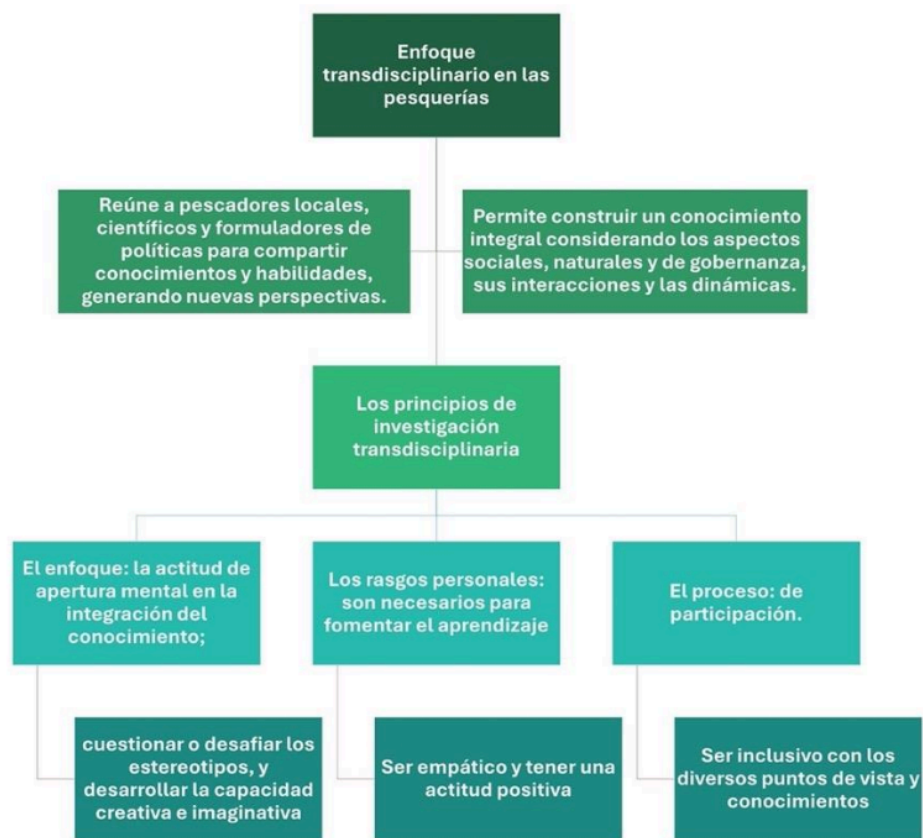


Figura 15.4. Enfoque transdisciplinario en las pesquerías. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Said *et al.* (2018).

Análisis Transdisciplinario Económico de los SES Costeros

Hay un creciente interés en las ciencias marinas y costeras en desarrollar ciencia transdisciplinar sobre las estrategias adaptativas de las comunidades costeras para abordar los cambios que afectan a los sistemas socio-ecológicos. Cualesquiera que sean los factores apuntalando las consecuencias de detrimento del cambio en las comunidades costeras (i.e. patógenos, tormentas, inundaciones, florecimientos algales nocivos, sobrepoblación, migración, sobre pesca, etc.) las respuestas sociales necesitan ser rápidas y proporcionadas en magnitud. Las sociedades deben estar preparadas para sorpresas y disturbios inesperados,

aceptando seguir algunos principios básicos para adaptarse ellos mismos y para incrementar su nivel de resiliencia. Entre otros principios se tiene la gobernanza policéntrica o colaborativa y la participación de usuarios y actores que es clave para tener éxito (Guillotreau *et al.*, 2020).

Por su parte Cortés-Gómez *et al.* (2023) consideran que, ante el deterioro de los recursos costeros y marinos, la economía ambiental se presenta como parte de la economía neoclásica y trata de incorporar las problemáticas ambientales derivadas de los patrones de crecimiento económico y asigna un valor monetario al ambiente. En este escenario, los recursos naturales y ecosistemas son insumos reproducibles e ilimitados que no consideran la óptica social. Considerando esto, nace la economía ecológica que es transdisciplinar y propone que los ecosistemas y sus recursos son finitos, este enfoque integra el bienestar social y cultural de las comunidades costeras. Para estos autores, la economía ecológica identifica el valor (natural, junto con el valor de uso y el valor de cambio) de los servicios ecosistémicos para incorporarlos en la toma de decisiones.

Además, Cortés-Gómez *et al.* (2023) proponen que la valoración de no mercado de los ecosistemas es aquella basada en el valor que le dan los habitantes costeros que dependen de ellos para su subsistencia, esta valoración es importante para el uso sostenible del capital natural y para mantener una buena calidad de vida en las comunidades locales (Infante-Ramírez *et al.*, 2014). Para estos autores, la valoración sociocultural permite identificar acciones consensuadas para la toma de decisiones en estrategias de conservación (Reyes-Arroyo *et al.*, 2021). Para Cortés-Gómez *et al.* (2023), la colaboración institucional y comunitaria para llevar a cabo proyectos de valoración y recuperación de los ecosistemas en la costa significa una oportunidad de desarrollo que contemple las necesidades de su población y la conservación de la zona costera.

Los valores de uso de los recursos naturales y ecosistemas costeros y marinos pueden ser directos o indirectos y su estimación se expresa en términos económicos dirigidos a conservar los SES. De la misma forma, favorecen la valoración del monto económico sobre posibles daños al ecosistema. Por otro lado, los valores de no uso se asignan independientemente de su utilidad, esto es, se les otorga un valor de existencia, dado para la conservación ambiental; mientras que el valor de opción se refiere al valor otorgado por sus usos futuros posibles (Cortés-Gómez *et al.*, 2023).

De acuerdo con Cortés-Gómez et al. (2023) es muy importante obtener valores diferentes a través de la evaluación sociocultural, ya que de esta manera se puede comprender la complejidad de los SES y tomar decisiones más informadas y equitativas. Considerando a Infante Ramírez *et al.* (2014), cuando se consideran los valores locales, las necesidades sociales, económicas y ambientales de una comunidad pueden ser mejor identificadas y adaptadas al diseño de políticas públicas. Para Reyes-Arroyo *et al.* (2021) se debe escuchar a los habitantes locales para incluir su visión y sus necesidades y con esto que los pobladores se “apropien” de su costa y mar y apoyen al éxito de proyectos de conservación y manejo. Cortés-Gómez *et al.* (2023) diseñaron la Figura 15.5 con la interrelación de los conceptos clave del valor y las percepciones socioculturales hacia un manejo sostenible en zonas costeras.

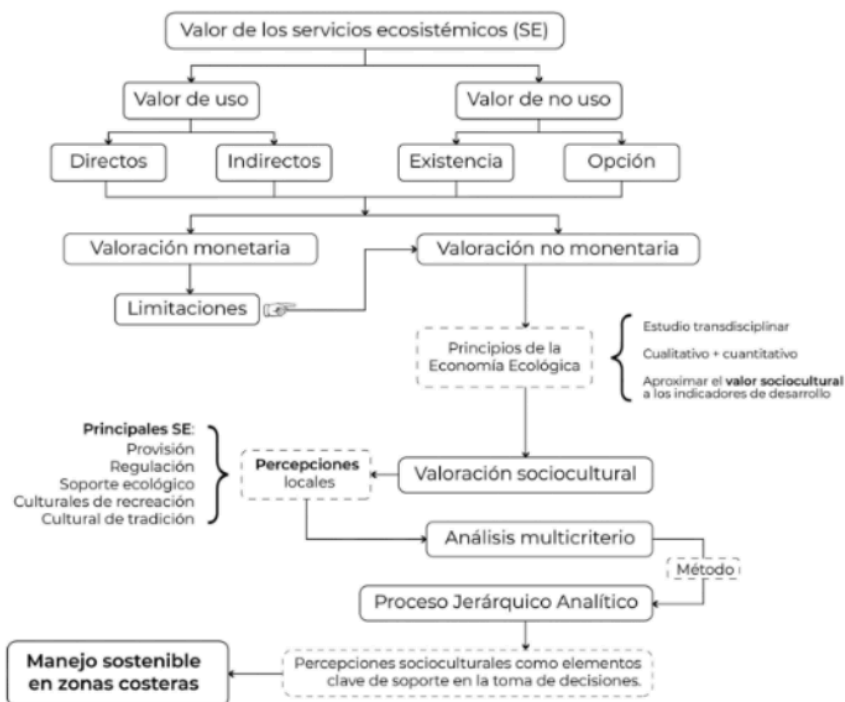


Figura 15.5. La interrelación del valor, las percepciones socioculturales y el manejo sostenible en zonas costeras. Fuente: Cortés-Gómez *et al.* (2023).

Análisis Transdisciplinario de los SES

De acuerdo con Baumann *et al.* (2023) los sistemas costeros están menos claramente delineados, con una interfaz tanto con ambientes marinos y terrestres, son inherentemente dinámicos, son más propensos a experimentar impactos del cambio climático y de las presiones antropogénicas y frecuentemente tienen sobrelapamientos en sus fronteras y conflictos legales y políticos. Es por esto que estos autores consideran que las costas deben ser estudiadas desde la transdisciplinariedad. Por ejemplo el “Marco Transformador” desarrollado por Wiek y Lang (2016) que consiste en cuatro fases y actúa como una guía metodológica para la investigación de la sostenibilidad transformativa. Puede ser utilizado para desarrollar respuestas a retos de sostenibilidad así como para transformar el sistema actual en la dirección de la sostenibilidad. El marco está diseñado para la investigación de la sostenibilidad transformativa utilizando métodos transdisciplinarios y por eso difiere de la investigación descriptiva-analítica, la cual analiza y describe problemas de sostenibilidad. Por su parte, Muiderman *et al.* (2020) desarrolló un marco que representa cuatro enfoques típicos/ideales para la gobernanza anticipatoria. Este marco puede ayudar a clasificar enfoques anticipatorios de acuerdo con su “conceptualización del futuro”, “implicaciones para el presente” y “objetivos últimos a ser realizados”. En el primer enfoque la investigación quiere evaluar los futuros probables e improbables con un enfoque en la planeación estratégica en el presente para reducir riesgos futuros. En el Segundo enfoque, múltiples futuros plausibles se visualizan, apuntando al mejoramiento de la preparación y el fortalecimiento de capacidades para navegar una variedad de futuros (incierto). El tercer enfoque se concentra en futuros diversos y pluralistas y a movilizar actores sociales para co-crear esos futuros deseables. En este enfoque, los futuros son construidos socialmente y comprendiendo la plausibilidad son entonces subjetivos como diferentes personas puedan percibir futuros diferentes para ser más o menos creíbles. El cuarto enfoque conceptualiza los futuros performativos interrogando el poder performativo y las políticas de compromiso con los futuros imaginarios para subrayar cómo estos efectos performativos tienen implicaciones políticas en las decisiones del presente y en las trayectorias de la gobernanza en general.

Efectos del cambio climático en los SES pesqueros

Definido como “*Aquello que sigue por virtud de una causa*”, el efecto de un evento como el cambio climático en las SES pesqueros capta el interés a nivel internacional sobre los impactos que se generan en los diferentes sectores de la sociedad, incluyendo aquellas comunidades dependientes de la pesca (Colburn *et al.* 2016). En términos de SES pesqueros, autores como Bennett *et al.* (2016) sugieren la necesidad de explorar múltiples exposiciones, un marco conceptual claro con la finalidad de facilitar el análisis de vulnerabilidad y adaptación a múltiples interacciones socioeconómicas y biofísicas. Previamente hemos señalado que la resiliencia, vulnerabilidad y capacidad adaptativa son tres conceptos clave aplicados para comprender cómo los SES responden al cambio (Gallopín, 2006; Kaplan-Hallam *et al.*, 2017), lo cual ha sido abordado en diferentes estudios en cuanto a los impactos que se generarán de manera directa e indirecta.

De manera *directa*, las tormentas, el clima y el aumento del nivel del mar son considerados los impactos más críticos para SES pesqueros (Field *et al.*, 2014). Sin embargo, los impactos indirectos (e.g. cambios en la temperatura del océano y la acidificación) y como estos se vinculan a los cambios en la disponibilidad de poblaciones de recursos marinos siguen siendo en muchos casos una incógnita (Pinsky *et al.*, 2014). Dicho lo anterior, uno de los objetivos al comprender los factores *indirectos* de cambio climático, es el desarrollo de estrategias de gestión adaptativa que mejoren la resiliencia de las comunidades pesqueras costeras (Morzaria *et al.*, 2014).

La relevancia de la generación de estrategias de gestión adaptativa en SES pesquero está directamente relacionado con la importancia de la actividad que se desarrolla como es la pesca. Ejemplo de lo anterior es México, donde se tiene registrado aproximadamente 74 mil embarcaciones (85% de los pescadores nacionales) operando cerca de la costa, siendo el 65% de la captura destinada para el consumo humano directo (Fernández *et al.*, 2011; EDF, 2019). Considerada como una actividad crucial, al aportar servicios y bienes en los países en desarrollo y desarrollados (Ramos-Miranda *et al.*, 2021), debido a la generación de empleos directos e indirectos y, por aportar seguridad alimentaria del país (FAO, 2016; 2018). Sin embargo, al igual que en otras regiones, los registros de captura señalan un descenso en la abundancia de ciertos recursos marinos y entre los factores que se señala está el cambio climático (Crespo *et al.*, 2019; Salas *et al.*, 2022; Peña *et al.*, 2021).

Las consecuencias de los *efectos* (específicamente indirectos) del cambio climático en SES pesqueros son y serán considerables, pero, en ocasiones pueden ser negativos y en otras positivos. Evidencia de lo anterior son los cambios en la temperatura superficial registrados en las costas del sureste del Golfo de México (Torres-Rojas *et al.*, 2017), donde la temperatura presentó una tendencia creciente durante los veinte últimos años (Tabla 15.4). De igual manera, en el caso de la salinidad se registró una mayor variación respecto de los valores mínimos y máximos registrados, lo cual indicaría cambios en los aportes de agua marina y de ríos en SES costeros, tal y como lo plantean Fichez *et al.* (2017), donde dos factores que se plantean como responsables son el cambio climático e impactos antrópicos.

Tabla 15.4. Análisis comparativo de temperatura y salinidad superficial en el periodo 2006-2016 en las tres épocas del año en Laguna de Términos de acuerdo con Torres-Rojas *et al.* (2017).

Estudio	Secas		Lluvias		Nortes	
	Temperatura	Salinidad	Temperatura	Salinidad	Temperatura	Salinidad
Torres-Rojas <i>et al.</i> (2016)	28-30	25-35	30-32	25-35	27-30	25-35
Ramos-Miranda <i>et al.</i> (2006)	27-28	24-33	28-29	28-33	25-28	19-22

(secas = febrero a mayo; lluvias = junio a septiembre; nortes = octubre a enero)

Lo anterior tuvo repercusión en el número de especies registradas en la región, ya que al ser especies marinas móviles con afinidad a ciertas ventanas ambientales su distribución dependerá de las condiciones favorables abandonando hábitats ahora desfavorables, pero también colonizando nuevos hábitats, tal y como se registró en el estudio de Torres-Rojas *et al.* (2017) donde en tan solo diez años se registró una disminución de 107 a 91 especies, pero

que además algunas de las especies de importancia comercial se desplazaron a otras zonas dentro de una misma microrregión (Irola-Sansores *et al.*, 2021).

Este comportamiento de desplazamiento ha sido registrado en otras especies de importancia pesquera presentes en el Océano Pacífico (Torres-Rojas *et al.*, 2014), donde se asocian sus desplazamientos con la ocurrencia de eventos de El Niño (aguas cálidas) (Lluch-Belda *et al.*, 2005). Hubbs (1948) y Wooster (1980) informaron la presencia de especies de peces tropicales (p. ej., Caballa del Pacífico, *Scomber japonicus*) frente a las costas de California en relación con un evento Niño, dejando en evidencia que los cambios latitudinales de fauna aparentemente están relacionados a eventos de calentamiento.

Algunas especies sufrirán con eventos de calentamiento reflejándose en pérdida de tamaño de ejemplares (Tabla 15.5), pero otras encontrarán su momento ideal para crecer. En el primer caso, la pesquería del calamar gigante (*Dosidicus gigas*) en el centro del Golfo de California colapsó en 1998 (Actualización de la Carta Nacional Pesquera 2010) después de la crisis de El Niño 1997–1998 (Markaida *et al.*, 2008), presentando otra tendencia decreciente entre 2003 y 2006 también relacionado con otro evento Niño. Nevarez-Martínez *et al.* (2010) identificaron un patrón en la variabilidad del reclutamiento del calamar gigante en relación con la variabilidad ambiental: aguas más cálidas causadas por las condiciones de El Niño en la Corriente de California coincidieron con “reclutamiento bajo”, mientras que aguas más frías (identificadas como mar negativo anomalías de la temperatura de la superficie) causadas por las condiciones de La Niña estaban relacionados con un “alto reclutamiento”, por lo que la producción pesquera del calamar gigante se verá afectada ante fenómenos cálidos.

Tabla 15.5. Efectos del aumento de temperatura en las tallas mínimas y máximas de algunas especies de peces marinos.

Especie	Talla (cm)		Referencia
	Mínima	Máxima	
<i>Bairdiella chrysoura</i>	2.8	18.0	Torres-Rojas <i>et al.</i> (2016)
	1.8	27.0	
<i>Stellifer lanceolatus</i>	2.0	8.0	Ramos-Miranda <i>et al.</i> (2006)
	2.9	19.0	
<i>Eugerres plumieri</i>	18.1	20.9	

En el segundo caso, existen algunos recursos pesqueros que se verán favorecidos, como son los euri térmico. Uno de ellos reconocido como un recurso potencial es la langostilla (*Pleuroncodes planipes*), la cual es un crustáceo con una alta tolerancia a cambios en la temperatura del agua, y actualmente en la región han realizado todo un sistema de mercado para su utilización y aprovechamiento, sin embargo, cuando consideramos que podemos avanzar surge el otro impacto indirecto como es la acidificación del océano, considerado como un fenómeno químico consecuencia de la absorción de dióxido de carbono, teniendo una afectación en la fisiología de los organismos, sobre todo aquellos que producen esqueletos calcáreos, como pueden ser los crustáceos, sin embargo, los recursos marinos han demostrado tener una capacidad de adaptación ante los cambios, pero que es innegable que a la vez pueden ser afectados de forma diferente.

Al respecto, la fisiología de los organismos responde a los cambios ambientales donde algunos presentarán una mayor capacidad de adaptabilidad en el medio (Carrillo-Birkhahn *et al.*, 2023) presentando un crecimiento exponencial en sus poblaciones, mientras otros se desplazarán a otras regiones buscando sus ventanas ambientales óptimas. En este contexto, todo dependerá del enfoque y aprovechamiento que queramos de los efectos del cambio climático en las SES pesqueros, es decir, los océanos cambiarán y las consecuencias de estos cambios son múltiples donde las instituciones de gestión, los mecanismos y los actores del sector pesquero necesitarán adaptarse. Aquellos recursos que antes estaban a disposición, si se desea obtenerlos se tendrá que viajar más a consecuencia del desplazamiento, mientras otros que antes no eran de interés comercial pero que actualmente presentan una alta abundancia es indudable que tenemos que buscar resiliencia y capacidad adaptativa ante la generación de nuevos mercados para comercializarlos ya que el impacto del cambio que hemos generado en los océanos durará decenas de años.

Discusión y conclusiones

Cuando estudiamos las interacciones entre los humanos-ambiente desde el pasado remoto de la historia de la humanidad que sobrepasan la duración de vida de un individuo, se puede

comprender del todo los procesos e implicaciones involucradas. La comprensión de esas interacciones también es requerida para predecir de manera acertada el cambio del ambiente a futuro, lo cual es vital para conformar políticas ambientales e intervenciones de manejo (Hegmon, 2017). El estudio de las interacciones humano-ambiente por escalas de tiempo largas provee una serie de oportunidades para las investigaciones sobre el Antropoceno y conceptos relacionados como los sociobiomas (Waters *et al.*, 2016; Ellis *et al.*, 2018; Edgeworth, 2021; Boivin y Crowther, 2021) que han provisto de mayor interés para reexaminar las dinámicas socio-ecológicas de largo plazo (Silva *et al.*, 2022).

El estudio de los SES no debería limitarse únicamente a comprender por qué, ante el cambio ambiental una sociedad colapsa mientras que otra sociedad sobrevive. Sino que se debería también identificar y comprender las dinámicas subyacentes de largo plazo que pueden estar escondidas en estudios de corta duración. Para Silva *et al.* (2022), la meta eventual de este enfoque es el comprender qué combinaciones e interacciones de factores sociales y ambientales llevan a la adaptación, resiliencia, al cambio o a la extinción en las comunidades humanas y los ecosistemas con los que están asociados. Esto nos permite realmente comprender las dinámicas que se llevan a cabo en el presente y entonces utilizar este conocimiento para diseñar herramientas apropiadas para enfrentar el futuro, éstas también con una visión de largo plazo.

Para estos autores el desarrollo de esta comprensión general requiere la integración y síntesis de datos de casos de estudio que provengan de fuentes y disciplinas múltiples. Ciertamente, diferentes elementos del mundo (plantas, animales, procesos ecosistémicos, etc.) son reconocidos por tener diferentes características y tratos y por eso juegan papeles diferentes en la dinámica general de los ecosistemas. De manera sobreestimada los humanos han sido vistos como íntimamente ligados al ambiente (Bird y Nimmo, 2018; Crabtree *et al.*, 2019). Por esto, es que Silva *et al.* (2022) sugieren que esta perspectiva es fundamental para desarrollar el trabajo con los SES. Para poder estudiarlos se necesita un enfoque transdisciplinario que permita la integración de tendencias teóricas clave a través del espectro de las ciencias sociales y ambientales (Crumley *et al.*, 2015).

Sin embargo, para Silva *et al.* (2022) provee datos valiosos sobre cómo las organizaciones sociales humanas se relacionan con los impactos antropogénicos en los ecosistemas y cómo las instancias de gobierno deben ser integradas en el SES. Por ejemplo, diferentes estructuras

familiares, estrategias reproductivas y sistemas económicos y culturales afectarán el modo y escala de los impactos en el ambiente y potencialmente la resiliencia de la sociedad a las perturbaciones en un sistema amplio (Hammel, 2015).

De forma tradicional los diferentes componentes del SES han sido estudiados por distintas disciplinas. Sin embargo, la creciente crisis climática y de biodiversidad han provisto las bases para tener una visión más holística, de forma que se puedan entender las preguntas críticas como por ejemplo: a) cómo las perturbaciones a un elemento del sistema afecta otros elementos, b) cómo el sistema como un todo, así como los elementos individuales han cambiado en el tiempo y c) qué clase de cambios pueden llegar a ocurrir en el futuro. Es claro que no es posible comprender completamente un SES sin la cooperación transdisciplinaria (Silva *et al.*, 2022).

La investigación transdisciplinar implica también comprender la naturaleza y calidad de los datos de cada disciplina. Esto es verdaderamente difícil y por esto se necesita colaboración. También se deben formalizar y compartir protocolos para la manipulación de datos, de forma que se tenga en consideración las incertidumbres inherentes de los diferentes grupos de datos y sus límites y potenciales efectivos, de manera que se prevenga el reproducir y amplificar el “ruido” (Zurell *et al.*, 2020).

El hacer investigación transdisciplinar establece retos particularmente en la colaboración entre las ciencias ambientales y las humanísticas o entre enfoques cualitativos y cuantitativos. Frecuentemente una discordancia en las expectativas y la falta de comprensión o asunción de las perspectivas teóricas y metodológicas de cada uno puede evitar intentos de colaboración (Silva *et al.*, 2022).

Bails *et al.* (2020) hacen una revisión sobre los riesgos y amenazas que estarán sufriendo las zonas costeras en los años por venir debido a efectos del cambio climático. Las medidas de adaptación pretenden limitar los impactos negativos del cambio climático sobre las comunidades humanas; sin embargo, hay un reconocimiento cada vez más grande de que la adaptación al cambio climático y la reducción al riesgo de desastres son convergentes para la mayoría de los riesgos y que están incrementalmente interrelacionados (Solecki *et al.*, 2011). Por su parte, Birkman y von Teichman (2010) consideran que es necesaria la cooperación sistemática entre proyectos para la adaptación al cambio climático y la disminución del riesgo a desastres, pero los dos campos no trabajan juntos fácilmente.

A pesar del gran número de planes de adaptación diseñados, todavía hay muy poca implementación en las costas (Bails *et al.*, 2020). La reducción del riesgo a desastres y las medidas de adaptación son para aplicarse a las sociedades. La adaptación puede aplicarse en dos diferentes niveles: para reducir la vulnerabilidad de los bienes y personas y/o para reducir los niveles de peligrosidad (Allen *et al.*, 2018). Las incertidumbres en las proyecciones de todas las variables del clima (i.e. temperatura, precipitación y aumento del nivel del mar) no deben esperar a que decrezcan significativamente en los próximos años. Muchas preguntas permanecen acerca de cómo la adaptación debe ser entendida y puesta en práctica en este contexto de alta incertidumbre (Bails *et al.*, 2020).

Por otra parte, Jones *et al.* (2014) muestra que los estudios sobre adaptación al cambio climático y las evaluaciones de impactos necesitan ser conducidas juntas. Las evaluaciones de las medidas para la adaptación costera al cambio climático involucran siete pasos principales (Bails *et al.*, 2020): El primero es producir un inventario de medidas para la adaptación costera al cambio climático enfocándose en los peligros costeros. El segundo es clasificar esas medidas en dos tipologías combinando las categorías principales (familias) de medidas de adaptación y los enfoques de manejo existentes. Estas dos tipologías se usan entonces para clasificar las medidas de adaptación identificadas (paso 3). El paso cuatro es la evaluación relevante de criterios que son identificados y seleccionados de forma separada. Cada medida de adaptación es evaluada contra los criterios diferentes (paso 5). Los últimos pasos involucran un análisis de resultados obtenido para cada medida de adaptación con respecto al criterio anterior (paso 6), y la identificación de las medidas de adaptación más eficientes usando un análisis multi-criterio (paso 7).

Bails *et al.* (2020) revisaron 51 medidas de adaptación que se han implementado en alguna costa. Y en todas, además de las incertidumbres, se tienen preocupaciones sobre las respuestas del sistema climático, debido a su complejidad y a sus efectos de retroalimentación que son todavía difíciles de modelar. Estos autores consideran que se deben llevar a cabo estudios prospectivos socio-económicos ya que cambios simultáneos ocurren cambios sociales que están entre los componentes principales de la adaptación. Un estudio prospectivo de este tipo en un SES es crucial para explorar futuros posibles al construir diferentes escenarios cuantitativos y cualitativos para anticipar los cambios futuros en áreas de vulnerabilidad y poder tomar decisiones informadas.

Por último, Rölfer *et al.* (2022) propone alcanzar la resiliencia socio-ecológica a través de la gobernanza costera. Estos autores postulan que la transdisciplina es necesaria para analizar un SES y que se requiere conocimiento de los actores y de los sistemas de gobernanza, así como la facilitación para el intercambio de conocimientos entre actores. Esto apunta a varios tipos de conocimientos que deben ser considerados en los debates de resiliencia en las comunidades costeras. Estos autores proponen el uso de tres tipos de conocimiento como una tipología. Ésta incluye el “conocimiento de sistemas” (¿qué es?), el “conocimiento objetivo” (¿hacia dónde?), el “conocimiento transformativo” (¿cómo llegó allí?). Este último involucra aspectos como la visión de futuro y las metas a alcanzar, así como las rutas y trayectorias para lograr esas visiones y metas (Figura 15.6).

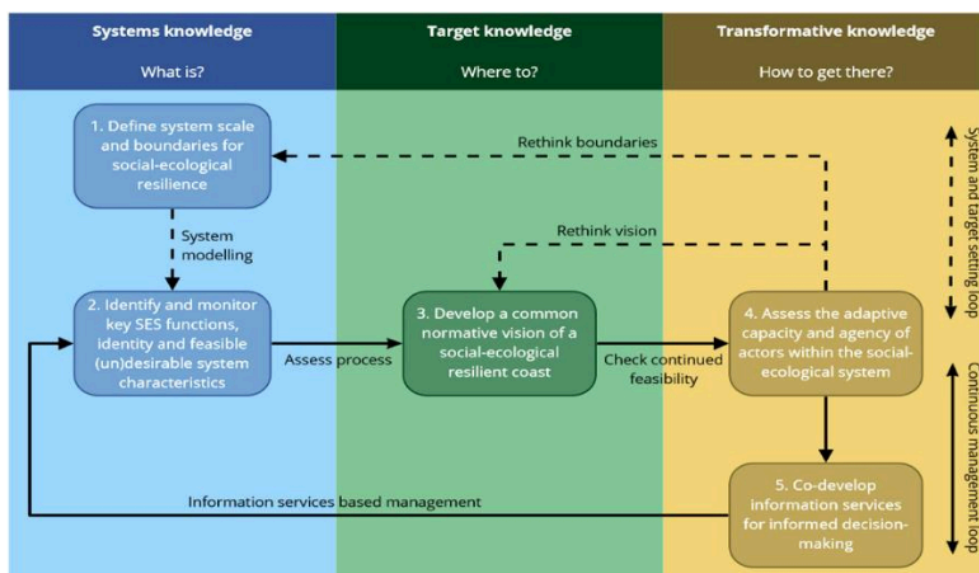


Figura 15.6. Resiliencia socio-ecológica en SES costeros basados en conocimiento de sistemas, metas y transformativo. El orden de los pasos está indicado por números y ciclos iterativos de aprendizaje están indicados por líneas continuas y punteadas. Fuente: Rölfer *et al.* (2022).

Los pasos 1 y 2 contribuyen al sistema de conocimiento, mientras que el paso 3 al de conocimiento objetivo. Para implementar y fortalecer el conocimiento transformativo en los SES costeros, se deben considerar dos mecanismos clave incluyendo la capacidad adaptativa

y el gobierno local (paso 4), además de la información científica para la toma de decisiones informada (paso 5). Consecuentemente, los actores locales y los servicios de información deben ser integrados dentro de todos los pasos para promover el intercambio en ambas vías entre ciencia y sociedad y diseñar soluciones que aborden las necesidades de los actores locales (Figura 15.7; Rölfer *et al.*, 2022).



Figura 15.7. Identificación de escalas clave y fronteras en sistemas socio-ecológicos costeros a través de los cuales la resiliencia ha sido manejada. La escala espacial incluye tanto la interfaz tierra-oceano, como las conexiones entre los SES a lo largo de diferentes escalas espaciales. Se presentan diferentes enfoques de manejo del área costera como La Planeación Espacial Marina (MSP) Manejo Integrado de la Zona Costera (ICZM), y las Áreas Marinas Protegidas (MPA) son aplicadas dentro de diferentes extensiones espaciales y en diferentes niveles administrativos (local, nacional, supranacional). Adicionalmente, la Planeación para la Adaptación al Clima (CAP) es de relevancia para la gobernanza costera a nivel local. La escala temporal es dependiente de las características del sistema y metas y puede variar entre planeaciones de corto y largo plazos. Vinculado a la escala temporal está la escala de cambio,

la cual es caracterizada por una navegación entre la estabilización y la transformación.
Fuente: Rölfer *et al.* (2022).

El cambio climático y otros estresores ambientales imponen peligros serios a los ecosistemas y comunidades costeras y marinas que dependen de ellos. El concepto de resiliencia facilita un enfoque holístico para el manejo costero flexible y adaptativo, pero la operacionalización a nivel local permanece como un reto. Los investigadores todavía necesitamos desarrollar un mejor entendimiento de lo que constituye la resiliencia de un SES en un contexto en particular. El enfoque transdisciplinar provee de un marco apropiado para integrar la dimensión humana y su instancia de gobierno local para manejar el sistema socio-ecológico hacia un estado de sistema que sea deseable tanto para humanos como para las costas.

Referencias

- Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Arag' on-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kaiinuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M. y Zickfeld, K. (2018). Framing and context. En Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Portner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Pean, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T. (eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*.
- Anderson, C.M., Krigbaum, M., Arostegui, M., Feddern, M., y Zachary, J. (2018). How commercial fishing effort is managed. *Fish and Fisheries*, 25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12339>
- Axelrod, R. y Cohen M.D. (1999). *Harnessing complexity: Organizational implications of a scientific frontier*. Nueva York, EE. UU.: The Free Press.
- Baills, A., Garcin, M. y Bulteau, T. (2020). Assessment of selected climate change adaptation measures for coastal areas. *Ocean and Coastal Management*, 185, 105059, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105059>

- Baumanna, L., Riechers, M., Celliers, L. y Ferse, S.C.A. (2023). Anticipating and transforming futures: a literature review on transdisciplinary coastal research in the Global South. *Ecosystems and People*, 19(1), 2288957, <https://doi.org/10.1080/26395916.2023.2288957>
- Basurto, X., Gelcich, S., y Ostrom, E. (2013). The social-ecological system framework as a knowledge classificatory system for benthic small-scale fisheries. *Global Environmental Change*, 23(6), 1366–1380. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.08.001>
- Benham, C.F., y Daniell, K.A. (2016). Putting transdisciplinary research into practice: A participatory approach to understanding change in coastal social-ecological systems. *Ocean Coast. Manag.*, 128, 29-39, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.04.005>
- Bennett N.J., Blythe J., Tyler S., y Ban N.C. (2016). Communities and change in the anthropocene: understanding social-ecological vulnerability and planning adaptations to multiple interacting exposures. *Regional Environmental Change*, 16, 907–926. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0839-5>
- Berkes, F. (2017). Environmental governance for the anthropocene? social-ecological systems, resilience, and collaborative learning. *Sustainability*, 9(7), 1232. <https://doi.org/10.3390/su9071232>
- Berkes, F., Mahon, R., McConney, P., Pollnac, R., y Pomeroy, R. (2001). *Managing Small-scale Fisheries: Alternative directions and methods*. International Development Research Centre.
- Bird, R.B., y Nimmo, D. (2018). Restore the lost ecological functions of people. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1050–1052. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0576-5>
- Birkmann, J., y von Teichman, K. (2010). Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: key challenges-scales, knowledge, and norms. *Sustainability Science*, 5, 171–184. <https://doi.org/10.1007/s11625-010-0108-y>
- Boivin, N., y Crowther, A. (2021). Mobilizing the past to shape a better anthropocene. *Nature Ecology & Evolution*, 5, 273–284. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01361-4>
- Bojórquez-Tapia L.A, Ecurra E., y García, O. (1998). Appraisal of environmental impacts and mitigation measures through mathematical matrices. *Journal of Environmental Management*, 53(1), 91-99. <https://doi.org/10.1006/jema.1998.0191>

- Bojórquez-Tapia, L.A. (1989). Methodology for prediction of ecological impacts under real conditions in Mexico. *Environmental Management*, 13(5):545-551. <https://doi.org/10.1007/BF01874960>
- Broderstad, E. G., y Eythórsson, E. (2014). Resilient communities? Collapse and recovery of a social-ecological system in Arctic Norway. *Ecology and Society*, 19(3), 1. <https://doi.org/10.5751/ES-06533-190301>
- Burden, A., Smeaton, C., Angus, S., Garbutt, A., Jones, L., Lewis H.D. y Rees, S.M. (2020). Impacts of climate change on coastal habitats relevant to the coastal and marine environment around the UK. *Marine Climate Change Impacts Partnership Science Review*, 228-255. <https://doi.org/10.14465/2020.arc11.chb>
- Burkhard, B. y Maes, J. (2017). *Mapping ecosystem services*. Bulgaria: Pensoft Publishers.
- Camacho-Valdez, V., Morales-Barragán, F. Torres-Irineo, E., y Sáenz-Arroyo, A. (2020). Interacciones a diferentes escalas espaciotemporales en socioecosistemas costeros. En: V.S. Ávila Foucat e I. Espejel (coord.), *Resiliencia de socioecosistemas costeros* (pp. 119-133). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carta de la transdisciplinariedad (1994). *Convento de Arrábida; carta de la transdisciplinariedad; noviembre 1994*. <http://www.filosofia.org/cod/c1994tra.htm>
- Carrillo-Birkhahn J.A., Torres-Rojas Y.E., Aguiñiga-García S. y Sánchez-González A. (2023). Cambios ambientales en una laguna costera tropical: un enfoque de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en una especie residente. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94, e944201. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.4201>
- Cerón-Hernández, V.A., Fernández-Vargas, G., Figueroa A., y Restrepo, I. (2019). El enfoque de sistemas socioecológicos en las ciencias ambientales. *Investigación y Desarrollo*, 27(2), 85-109.
- Christie, P., Fluharty, D.L., White, A.T., Eisma-Osorio, L., y Jatulan, W. (2007). Assessing the feasibility of ecosystem-based fisheries management in tropical contexts. *Marine Policy*, 31(3), 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2006.08.001>
- Cicin-Sain, B. y Belfiore, S. (2005). Linking marine protected areas to integrated coastal and ocean management: a review of theory and practice. *Ocean & Coastal Management*, 48(11-12), 847-868, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2006.01.001>

- Colburn, L.L., Jepson M., Weng, Ch., Seara, T., Weiss, J. y Hare, J.A. (2016). Indicators of climate change and social vulnerability in fishing dependent communities along the Eastern and Gulf Coasts of the United States. *Marine Policy*, 74, 323-333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2016.04.030>
- Collins M., Sutherland, M., Bouwer, L., Cheong, S.M., Frölicher, T., Jacot Des Combes, H., Koll Roxy, M., Losada, I., McInnes, K. Ratter, B., Rivera-Arriaga, E., Susanto, R.D., Swingedouw, D. y Tibig, L. (2019), Extremes, abrupt changes and managing risk. En H.O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N.M. Weyer (eds.). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* (pp. 589-655). UK and New York, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.008>.
- Comisión Nacional de Emergencias (CNE). (s/f). *Cap. III. Fenómenos atmosféricos y cambio climático, Gob. Costa Rica, CEDO-CRID*. <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc231/doc231-3.pdf>
- CONANP (2024). *¿Qué hacemos? CONANP*. <https://www.gob.mx/conanp/que-hacemos>
- Cooley, S., Schoeman, D., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Ghebrehwet, D.Y., Ito, S.I., Kiessling, W., Martinetto, P., Ojea, E., Racault, M.F., Rost, B., y Skern-Mauritzen, M. (2022). Oceans and coastal ecosystems and their services. En [H.O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds.), *Climate change: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 379-550). UK and New York, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.005>
- Cortés-Gómez, C., Cervantes-Martínez, A., y Arce-Ibarra, A.M. (2023). Valoración sociocultural de los servicios ecosistémicos de la zona costera del Caribe mexicano, *Economía, Sociedad y Territorio*, 23(73), 961-990. <http://dx.doi.org/10.22136/est20231956>
- Cortner, H.J., Wallace, M.G., Burke, S., y Moote M.A. (1998). Institutions matter: the need to address the institutional challenges of ecosystem management. *Landscape and Urban Planning*, 40(1-3), 159-166. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(97\)00108-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)00108-4)

- Costanza, R. (2014). A theory of socioecological system change. *Journal of Bioeconomics*, 16(1), 39-44. <https://doi.org/10.1007/s10818-013-9165-5>
- Crabtree, S.A., Bird, D.W., Bird, R.B. (2019). Subsistence transitions and the simplification of ecological networks in the western desert of Australia. *Human Ecology*, 47, 165-177. <https://doi.org/10.1007/s10745-019-0053-z>
- Crespo, J. M., Jiménez, A., y Nava, J. D. (2019). Tensiones y conflictos territoriales en la pesca ribereña del Estado de Campeche, México (2013–2018). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 82, 2764. <https://doi.org/10.21138/bage.2764>
- Crumley, C., Laparidou, S., Ramsey, M., y Rosen, A.M. (2015). A view from the past to the future: Concluding remarks on the ‘The Anthropocene in the Longue Durée’. *Holocene*, 25(10), 1721-1723. <https://doi.org/10.1177/095968361559447>
- Diario oficial de la Federación (2 de diciembre de 2010). Actualización de la Carta Nacional Pesquera [Revision of the National Fisheries Chart]. México.
- Doney, S.C., Busch, D.S., Cooley, S.R., y Kroeker, K.J. (2020). The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 83-112. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>
- EDF-Inteligencia Pública de México (2019). Impacto Social de la Pesca Ribereña en México: Propuestas para impulsar el bienestar social en el sector pesquero. Ciudad de México: EDF de México.
- Edgeworth, M. (2021). Transgressing time: archaeological evidence in/of the anthropocene. *Annual Review Anthropology*, 50, 93-108. <https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-101819-110118>
- Eger, S.L., de Loë, R.C., Pittman, J., Epstein, G., y Courtenay S.C. (2021). A systematic review of integrated coastal and marine management progress reveals core governance characteristics for successful implementation. *Marine Policy*, 132, 104688, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104688>
- Ehler, C.N. (2003). Indicators to measure governance performance in integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management*, 46(3-4), 335-345, [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(03\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(03)00020-6)

- Ellis, E.C., Magliocca, N.R., Stevens, C.J., y Fuller, D.Q. (2018). Evolving the anthropocene: Linking multi-level selection with long-term social–ecological change. *Sustainability Science*, 13(1), 119-128. <https://doi.org/10.1007/s11625-017-0513-6>
- Elsawah, S., Filatova, T., Jakeman, A.J., Kettner, A.J., Zellner, M.L., Athanasiadis, I.N., Hamilton, S.H., Axtell, R.L., Brown, D.G., Gilligan, J.M., Janssen, M.A., Robinson, D. T., Rozenberg, J., Ullah, I.I.T., y Lade, S.J. (2020). Eight grand challenges in socio-environmental systems modeling. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2, 16226. <https://doi.org/10.18174/sesmo.2020a16226>
- Espinoza-Tenorio, A., Espejel, I., Wolff, M., y Zepeda-Domínguez, J.A. (2011). Contextual factors influencing sustainable fisheries in Mexico. *Marine Policy*, 35(3), 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.10.014>
- Espinoza-Tenorio, A., Wolff, M., Espejel, I., y Montaña-Moctezuma, G. (2013). Using traditional ecological knowledge to improve holistic fisheries management: transdisciplinary modeling of a lagoon ecosystem of Southern Mexico. *Ecology & Society*, 18(2), 6. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05369-180206>
- Essington, T.E. y Punt, A.E. (2011). Implementing ecosystem-based fisheries management: Advances, challenges and emerging tools. *Fish and Fisheries*, 12, 123–124. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00407.x>
- FAO (2015). *Enfoque ecosistémico pesquero. Conceptos fundamentales y su aplicación en pesquerías de pequeña escala de América Latina, por Omar Defeo. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 592.*
- FAO (2016). *Contribución de la pesca artesanal a la seguridad alimentaria, el empleo rural y el ingreso familiar en países de América del Sur.* Santiago de Chile: Oficial Superior de Pesca y Acuicultura de la Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- FAO (2018). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernández J.I., Álvarez P., Arreguín. F., López, L.G., Ponce G., Díaz de León A., Arcos E., y del Monte P. (2011). Coastal fisheries of Mexico. En S. Salas, R. Chuenpagdee, A.

- Charles y J.C. Seijo (eds.). *Coastal fisheries of Latin America and the Caribbean* (pp. 231-284). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fichez, R., Archundia, D., Grenz, C., Douillet, P., Gutiérrez, F., Origel-Moreno, M., Denis, L., Contreras Ruiz-Esparza, A. y Zavala-Hidalgo, J. (2016). Global climate change and local watershed management as potential drivers of salinity variation in a tropical coastal lagoon (Laguna de Terminos, Mexico). *Aquatic Sciences*, 79, 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00027-016-0492-1>
- Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. y White, L.L. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability part A: global and sectoral aspects working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. New York, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Flores-Hernández, D., Markaida, U., Pérez-Jiménez, J.C. y Ramos-Miranda, J. (2010). Las pesquerías. En G. Villalobos-Zapata y J. Mendoza-Vega. (Eds.), *La biodiversidad en Campeche: estudio de estado* (pp. 520-535). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México.
- Gallopin, G.C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Glob. Environ. Change*, 16, 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>
- Gibson, C.C., Ostrom E., y Ahn T.K. (2000). The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. *Ecological Economics*, 32(2), 217-239. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00092-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00092-0)
- Glaser, M., y Gleaser B. (2014). Towards a framework for cross-scale and multi-level analysis of coastal and marine social-ecological systems dynamics. *Regional Environmental Change*, 14, 2039-2052. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0637-5>
- Gladstone-Gallagher, R.V., Hope, J.A., Bulmer, R.H., Clark, D.E., Stephenson, F., Mangan, S., Rullens, V., Siwicki, E., Thomas, S.F., Pilditch, C.A., Savage, C., y Thrush, S.F. (2019). Old tools, new ways of using them: harnessing expert opinions to plan for

- surprise in marine socio-ecological systems. *Frontiers in Marine Science*, 6, 696. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00696>
- Glavovic, B.C., Dawson, R., Chow, W., Garschagen, M., Haasnoot, M., Singh, C., y Thomas, A. (2022). Cross-chapter paper 2: cities and settlements by the sea. En H.O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem y B. Rama (eds.), *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 2163-2194). New York, USA: Cambridge University Press, Cambridge, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.019>
- Guillotreau, P., Trouillet, B., Mahévas, S., y Pardo S. (2020). Addressing transdisciplinary and participation issues to cope with rapid changes shifting marine social ecological systems. *Marine Policy*, 117, 103929. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103929>
- Gutiérrez, N.L., Hilborn, R., y Defeo, O. (2011). Leadership, social capital and incentives promote successful fisheries. *Nature*, 470, 386-389. <https://doi.org/10.1038/nature09689>
- Hammel, E.A. (2015). Chayanov revisited: a model for the economics of complex kin units. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(19), 7043-7046. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501987102>
- Hegmon, M. (2017) *The give and take of sustainability: archaeological and anthropological perspectives on tradeoffs*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hernández-López, M.G. (2023). Enfoques interdisciplinarios y transdisciplinarios para el fortalecimiento de las territorialidades costeras en Centroamérica. *Revista de Extensión Universidad en Diálogo*, 13(1), 215-248. <https://doi.org/10.15359/udre.13-1.8>
- Hilborn, R. (2011). Future directions in ecosystem based fisheries management: a personal perspective. *Fisheries Research*, 108, 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.12.030>
- Hilborn, R., Amoroso, R.O., Anderson, C.M., Baum, J.K., Branch, T.A., Costello, C., de Moor, C.L., Faraj, A., Hively, D., Jensen, O.P., Kurota, H., Little, L.R., Mace, P., McClanahan, T., Melnychuk, M.C., Minto, C., Osio, G.C., Parma, A.M., Pons, M., Segurado, S., Szuwalski, C.S., Wilson, J.R. y Ye, Y. (2019). Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America*, 117(4), 2218-2224.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1909726116>
- Hilborn, R., Fulton, E.A., Green, B.S., Hartmann, K., Tracey, S.R., y Watson, R.A. (2015). When is a fishery sustainable? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72, 1433–1441. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0062>
- Hossain, M. S., y Szabo S. (2017). Understanding the social-ecological system of wetlands. En Prusty, B. Anjan Kumar, C. Rachna, y P.A. Azeez (eds.), *Wetland science: perspectives from south Asia* (pp. 285-301). New Delhi: Springer India.
- Huang, M., Ding, L., Wang, J., Ding, C., y Tao, J. (2021). The impacts of climate change on fish growth: a summary of conducted studies and current knowledge. *Ecological Indicators*, 121, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106976>
- Hubbs, C.L. (1948). Changes in the fish fauna of western North America correlated with changes in ocean temperature. *Journal of Marine Research*, 7, 459-482.
- Infante-Ramírez, K., Arce-Ibarra, A., y Bello-Baltazar, E. (2014). Valoración no monetaria de unidades de paisaje en la zona maya de Quintana Roo, México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 14(45), 309-357. <https://doi.org/10.22136/est002014378>
- INEGI (2011). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Carmen, Campeche*. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000040003#collapse-Resumen>
- INEGI (2011). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Champotón, Campeche*. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000040004#collapse-Resumen>
- INEGI (2011). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Campeche, Campeche*. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000040002#collapse-Resumen>
- INEGI (2011). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Calkiní, Campeche*. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=070000040001#collapse-Resumen>
- INEGI (2024). *Indicadores sociodemográficos y económicos por área geográfica*. <https://www.inegi.org.mx/default.html>
- IPCC/AR5 (2014). *Chapter 7, coastal systems and low-lying areas*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/coastal-systems-and-low-lying-areas/>

- IPCC/Summary for Policy Makers (2022). *Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-4-sea-level-rise-and-implications-for-low-lying-islands-coasts-and-communities/>
- IPCC, AR6 Synthesis Report: Climate Change (2023). *Working group II: impacts, adaptation and vulnerability, chapter 6 coastal zones and marine ecosystems*. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=289>
- Irola-Sansores, B.N., Torres-Rojas, Y.E., y Cuevas-Jiménez, A. (2021). Spatial temporal behavior of benthic communities in the Terminos Lagoon, Mexico: Possible areas of protection and conservation. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático*, 3(1): 55-76. <https://doi.org/10.26359/52462.0421>
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan R., y Law K.L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jones, R.N., Patwardhan, A., Cohen, S.J., Dessai, S., Lammel, A., Lempert, R.J., Mirza, M. M.Q., von Storch, H. (2014). Foundations for decision making. En Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. y White, L.L. (2014), *Climate change: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 195-228). New York, USA: Cambridge University Press.
- Kaplan-Hallam, M., Bennett, N. J., y Satterfield, T. (2017). Catching sea cucumber fever in coastal communities: conceptualizing the impacts of shocks versus trends on social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 45, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.05.003>
- Leslie, H.M., Basurto, X., Nenadovic, M., Sievanen, L., Cavanaugh, K.C., Cota-Nieto, J.J., Erisman, B.E., Finkbeiner, E., Hinojosa-Arango, G., Moreno-Báez, M., Nagavarapu, S., Reddy, S.M.W., Sánchez-Rodríguez, A., Siegel, K., Ulibarria-Valenzuela, J.J., Weaver, A.H. y Aburto-Oropeza, O. (2015). Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

- the United States of America*, 112(19), 5979–5984.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1414640112>
- Li, Y., Kappas, M., y Li, Y. (2018). Exploring the coastal urban resilience and transformation of coupled human-environment systems. *J. Clean. Prod.* 195, 1505–1511. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.227
- Lozoya, J. P., Conde, D., Asmus, M., Polette, M., Píriz, C., Martins, F., de Álava, D., Marenzi, R., Nin, M., Anello, L., Moraes, A., Zaguini, M., Marrero, L., Verrastro, N., Lagos, X., Chreties, C., y Rodriguez, L. (2015). “Linking social perception and risk analysis to assess vulnerability of coastal socio-ecological systems to climate change in Atlantic South America,” in *Handbook of Climate Change Adaptation*, ed. W. Leal Filho (Berlin, Heidelberg: Springer), 373–399.
- Lluch-Belda D., Lluch-Cota, D. B., y Lluch-Cota, S. E. (2005). Changes in marine faunal distributions and ENSO events in the California Current. *Fisheries Oceanography* 14: 458–467.
- Manson, F. J., y Die, D. J. (2001). Incorporating commercial fishery information into the design of marine protected areas. *Ocean & Coastal Management*, 44, 517–530. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00063-1](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00063-1)
- Manuel-Navarrete, D., Gómez, J. J., y Gallopín, G. (2007). Syndromes of sustainability of development for assessing the vulnerability of coupled human-environmental systems. The case of hydrometeorological disasters in Central America and the Caribbean. *Glob. Environ. Change* 17, 207–217. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.07.002
- Markaida, U., Gilly, W., Salinas-Zavala, C. A., Rosas-Luis, R., y Booth, J. T. A. (2008). Food and feeding of jumbo squid *Dosidicus gigas* in the central Gulf of California during 2005–2007. *CalCOFI Reports* 49:90–103.
- Merçon, J. (2022). Investigación transdisciplinaria e investigación-acción participativa en clave decolonial. *Utopía y Praxis Latinoamericana*, vol. 27, núm. 98, e6614174, Universidad del Zulia, DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6614174>
- Morzaria-Luna H.N., Turk-Boyer P., Moreno-Baez M. (2014). Social indicators of vulnerability for fishing communities in the Northern Gulf of California, Mexico: Implications for climate change, *Mar. Policy* 45 182–193.

- Muiderman, K., Gupta, A., Vervoort, J., y Biermann, F. (2020). Four approaches to anticipatory climate governance: different conceptions of the future and implications for the present. *Wiley Interdiscip. Rev Clim Change*. 11(6):11. doi: 10.1002/wcc.673.
- Murphy, D. W. A. (2015). Theorizing climate change, (im)mobility and socio-ecological systems resilience in low-elevation coastal zones. *Clim. Dev.* 7, 380–397. doi: 10.1080/17565529.2014.953904
- Myers, R. A., y Worm, B. (2003). Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280–283. doi: 10.1038/nature01610
- Neger, C., y Crespo Guerrero, J.M. (2021). Problemática de la gestión de las Áreas Naturales Protegidas de México: un análisis en las Reservas de la Biósfera de Los Tuxtlas y Los Petenes. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. 41(2):463–481. doi:10.5209/AGUC.79345.
- Nevarez-Martinez, M. O., Morales-Bojorquez E., Cervantes-Valle C., Santos-Molina J. P., and Lopez-Martinez J. (2010). Population dynamics of the jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in the 2002–2008 fishing seasons off Guaymas, Mexico. *Fisheries Research* 106:132–140.
- Ngoran, S.D. y Xue X. (2017). Public sector governance in Cameroon: a valuable opportunity or fatal aberration from the Kribi Campo integrated coastal management? *Ocean Coast. Manag.* Volume 138, Pages 83-92, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.006>
- Nicolescu B. (1998). *La transdisciplinariedad, una nueva visión del mundo*. Manifiesto. Paris: Ediciones Du Rocher.
- Niiranen, S., Richter, A., Blenckner, T., Stige, L.C., Valman, M., y Eikeset, A.M. (2018). “Global connectivity and cross-scale interactions create uncertainty for Blue Growth of Arctic fisheries”, *Marine Policy*, núm. 87, pp. 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.024>
- Nobre, D.M., Trigueirinho Alarcon, D., Cinti, A. y Schiavetti A. (2017). Governance of the cassurubd extractive reserve, Bahia State, Brazil: an analysis of strengths and weaknesses to inform policy. *Mar. Policy*, Volume 77, Pages 44-55, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.12.008>
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325, 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>

- Paice, R. J. Chambers, s/f. Climate change impacts on coastal ecosystems, Coastal Adapt
- Paramita, R., Subodh, Chandra P., Rabin, C., Indrajit, C., Asish, S., y Manisa S. (2023). Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations, Jour. Environ. Management, vol. 330, 117187, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117187>
- Partelow, S. (2014). *Assessing sustainability in lobster fisheries as social-ecological systems: A framework and research protocol* [LUCSUS]. <http://www.lunduniversity.lu.se/o.o.i.s?id=24923&postid=4463961>
- Peña-Puch, A. del C. (2020). Evaluación de la sustentabilidad de los sistemas socio-ecológicos pesqueros de Campeche. En *El Colegio de la Frontera Sur*.
- Peña-Puch, A. (2023). La perspectiva de sistemas socio-ecológicos (SSE) en los instrumentos de manejo pesquero de México: riesgos y oportunidades de los permisos de pesca a largo plazo. In: Zamora Saenz I, editor. El Marco Jurídico de la Pesca en México a debate. Áreas de oportunidad para la mejora y la innovación. primera. Ciudad de México: Senado de la República, Instituto Belisario Domínguez.
- Peña-Puch, A.C., Pérez-Jiménez, J.C., Espinoza-Tenorio, A. (2020). Advances in the study of Mexican fisheries with the social-ecological system (SES) perspective and its inclusion in fishery management policy. *Ocean Coast Manag.* 185:1–6. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.105065.
- Pérez Matos, N.E. (2007). El fenómeno informativo en Cuba. Reflexión en el marco de los períodos constitucionales de la nación y de su literatura profesional del siglo XX [Tesina doctoral]. La Habana: Facultad de Comunicación. Universidad de La Habana.
- Pérez Matos, N.E., y Setién Quesada, E. (2008). La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias: una mirada a la teoría bibliológico-informativa, ACIMED v.18 n.4 Ciudad de La Habana
- Perry, R. I., Ommer, R. E., Barange, M., y Werner, F. (2010). The challenge of adapting marine social-ecological systems to the additional stress of climate change. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 356–363. doi: 10.1016/j.cosust.2010.10.004
- Pinsky M.L., y Mantua N.J. (2014). Emerging adaptation approaches for climate-ready fisheries management, *Oceanography*, vol. 27(4) 146–159.

- Pittman, J., y Armitage, D. (2016). Governance across the land-sea interface: a systematic review. *Environ. Sci. Policy*, Volume 64, Pages 9-17, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.022>
- Ramos-Miranda, J., Cabrera, M. A., Salas, S., López, J. A., y Flores, D. (2021). Especies comerciales de la pesca artesanal en la península de Yucatán. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida. Universidad Nacional Autónoma de México. México, 204 p.
- Refugio-Coronado, S., Lacasse, K., Dalton, T., Humphries, A., Basu, S., Uchida, H., y Uchida, E. (2021). Coastal and marine socio-ecological systems: A systematic review of the literature. *Frontiers in Marine Science*, doi:<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.648006>
- Renaud, F. G., Birkmann, J., Damm, M., y Gallopín, G. C. (2010). Understanding multiple thresholds of coupled social-ecological systems exposed to natural hazards as external shocks. *Nat. Hazards* 55, 749–763. doi: 10.1007/s11069-010-9505-x
- Reyes-Arroyo, N., Camacho-Valdez, V., Saenz-Arroyo, A., y Infante-Mata, D. (2021). “Socio-cultural analysis of ecosystem services provided by mangroves in La Encrucijada Biosphere Reserve, southeastern Mexico”, *Local Environment*, 26 (1), London, Taylor & Francis, pp. 86-109.
- Rincón-Ruiz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A. M., Tapia, C. H., David, A., Arias-Arévalo, P. y Zuluaga, P. A. (2014). Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: aspectos conceptuales y metodológicos. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt .
- Rivera-Arriaga, E. y Escofet, A. (2019). Gobernanza socio-ambiental de las zonas costeras y marinas, 471-498 pp. In: Botello A.V., S. Villanueva F. y J. Gutiérrez (Coord.) *Costas y Mares Mexicanos, Contaminación, Impactos, vulnerabilidad y cambio climático*, UNAM, UAC, 652 p.
- Rodriguez, N.J.I. (2017). A comparative analysis of holistic marine management regimes and ecosystem approach in marine spatial planning in developed countries. *Ocean Coast. Manag.* Volume 137, Pages 185-197, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.12.023>

- Rölfer, L., L. Celliers y Abson D.J. (2022). Resilience and coastal governance: knowledge and navigation between stability and transformation. *Ecology and Society* 27(2):40. <https://doi.org/10.5751/ES-13244-270240>
- Said, A., Chuenpagdee, R., Aguilar-Perera, A., Arce-Ibarra, M., Bahadur Gurung, T., Bishop, B., Léopold, M., Marquez, A.-I., Mattos, S., Pierce, G. J., Kumar Nayak, P., y Jentoft, S. (2018). The Principles of Transdisciplinary Research in Small-Scale Fisheries: Analysis and Practice. En *Transdisciplinarity for Small-Scale Fisheries Governance* (Vol. 21, pp. 411–431). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94938-3>
- Salas, S., Núñez, A., Cepeda-González, F., Ramos-Miranda, J., Cabrera, M. A., Coronado, E., López-Rocha, J. A., Torres, E. (2022). Pesquerías artesanales en la Península de Yucatán contexto-socio-económico y bienestar comunitario. CINVESTAV-UNAM-EPOMEX-UAC. Mérida, Yucatán, México. 25 p
- Sandifer, P.A., y Scott, G. I. (2021). Coastlines, Coastal Cities, and Climate Change: A Perspective on Urgent Research Needs in the United States, PERSPECTIVE article *Front. Mar. Sci.*, 15 March 2021, Sec. Global Change and the Future Ocean, Volume 8 <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.631986>
- Silva, F., Coward, F., Davies, K., Elliott, S., Jenkins, E., Newton, A.C., Riris, P., Vander Linden, M., Bates, J., Cantarello, E., Contreras, D. A., Crabtree, S.A., Crema, E. R., Edwards, M., Filatova, T., Fitzhugh, B., Fluck, H., Freeman, J., Klein Goldewijk, K., Krzyzanska, M., Lawrence, D., Mackay, H., Madell, M., Yoshi Maezumi, S., Marchant, R., Saqalli, M., Monsarrat, S., Morriso, K. D., Rabett, R., Robert, P., Stafford, R., Svenning, J.C., Whithouse N. J., y Williams A. (2022). Developing Transdisciplinary Approaches to Sustainability Challenges: The Need to Model Socio-Environmental Systems in the Longue Durée. *Sustainability* vol. 14, 10234. <https://doi.org/10.3390/su141610234>
- Solecki, W., Leichenko, R., O'Brien, K., (2011). Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities: connections, contentions, and synergies. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2011.03.001>.
- Stojanovic, T.A., y Ballinger R.C. (2009). Integrated coastal management: a comparative analysis of four UK initiatives. *Appl. Geogr.* Volume 29, Issue 1, Pages 49-62, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.07.005>

- Stojanovic, T., Ballinger, R. C. y Lalwani C. S.(2004). Successful integrated coastal management: measuring it with research and contributing to wise practice. *Ocean Coast. Manag.* Volume 47, Issues 5–6, Pages 273-298, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.08.001>
- Taljaard, S., Slinger, J. H., Morant, P. D., Theron, A. K., van Niekerk, L., van der Merwe J. (2012). Implementing integrated coastal management in a sector-based governance system. *Ocean Coast. Manag.* Volume 67, Pages 39-53, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.06.003>
- Torres-Rojas Y. E., Hernández-Herrera A., Ortega-García S. y Soto-Jiménez M. F. (2014). Feeding Habits Variability and Trophic Position of Dolphinfinch in Waters South of the Baja California Peninsula, Mexico, *Transactions of the American Fisheries Society*, 143:2, 528-542, DOI: 10.1080/00028487.2013.866981
- Torres-Rojas Y.E., Flores Hernández D.C., Gómez Criollo F., Concepción Pérez C.J., Rosas Arévalo M.A., Aguiñiga García S., Sánchez González A., y Dorantes Hernández J.M. (2017). Isótopos estables y diversidad de peces en Laguna de Términos: indicadores del cambio climático Fondo Sectorial de Investigación Ambiental Semarnat-Conacyt | 1 y 2 de junio de 2017
- Trégarot, E., D'Olivo, J.P., Botello, A. Z., Cabrito, A., Cardoso, G. O., Casal, G., Cornet, C. C., Cragg, S. M., Degia, A. K., Fredriksen, S., Furlan, E., Heiss, G., Kersting, D. K., Maréchal, J.P., Meesters, E., O'Leary, B. C., Pérez, G., Seijo-Núñez, C., Simide, R., van der Geest, M. y de Juan, S. (2024). Effects of climate change on marine coastal ecosystems – A review to guide research and management, *Biological Conservation*, vol. 289, 110394, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110394>
- UN/CEPAL, (2015). The effects of climate change in the coastal areas of Latin America and the Caribbean. Impacts.
- Urquiza Gómez A. y Cadenas, H. (2023). Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *ORDA Revue, Eau et Vulnérabilité dans les Amériques*, doi.org/10.4000/orda.1774
- Vidal, L., Vallarino, A., Benítez, I., Correa, J. (2015). Implementación del plan estratégico Ramsar en humedales costeros de la Península de Yucatán: Normativas y regulación. *Lat Am J Aquat Res.* 43(5):873–887. doi:10.3856/vol43-issue5-fulltext-7.

- Vidal Hernández, L.E., Ávila Foucat, V.S., Arce Ibarra, A.M., Tovilla Hernández, C. y Carmona Escalante, A. (2020). Construcción de socioecosistemas costeros y retos para medir su resiliencia, Cap. 1: 21-50 p. En: V.S. Ávila Foucat e I. Espejel (coord.) Resiliencia de socioecosistemas costeros, UNAM, 175 p.
- Villalobos-Zapata, G., y Mendoza, J. (2010). *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., y Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecol. Soc.* 9:5. doi: 10.5751/ES-00650-090205
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Gałuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., et al. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351, aad2622.
- Wiek A, DJ Lang. (2016). Transformational sustainability research methodology. In: Heinrichs H, Martens P, Michelsen G Wiek A, editors. *Sustainability science*. Dordrecht: Springer Netherlands; p. 31–41. doi: 10.1007/978-94-017-7242-6_3.
- Wooster, W. S. (1980). Early observations and investigations of El Nino: the event of 1925. Pages 629–641 in M. Sears and D. Merriman, editors. *Oceanography: the past*. Springer-Verlag, New York.
- Wyborn, C., y Bixler, R. P. (2013). Collaboration and nested environmental governance: Scale dependency, scale framing, and cross-scale interactions in collaborative conservation. *Journal of Environmental Management*, 123, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.014>
- Zurell, D., Franklin, J., König, C., Bouchet, P.J., Dormann, C.F., Elith, J., Fandos, G., Feng, X., Guillera-Arroita, G., Guisan, A., et al. (2020). A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography*, 1, 93.

Capítulo 16. Perspectiva transdisciplinaria y bases ecológicas hacia el uso sostenible de los sistemas costeros frente al cambio global: observatorio para la resiliencia en Tabasco, México

Gema Hidalgo Rodríguez^{36*}

José G. Chan Quijano^{**}

Resumen

La mitigación de los impactos humanos en sistemas costeros conlleva el considerar localmente la confluencia en éstos de múltiples estresores. Este capítulo tiene por objetivo hacer una recopilación de los esfuerzos de investigación durante el desarrollo del proyecto del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC), para la creación de un Observatorio Costero (OC) en el Estado de Tabasco, México, con una proyección de transdisciplina. De igual modo, se propone identificar aquellos vacíos de conocimiento, retos y oportunidades en la comprensión de los procesos complejos que ocurren en estos socioecosistemas. Para ello, se integró la información y se agrupó por orden cronológico, grupos temáticos, y acciones de comunicación y colaboración. Las bases ecológicas y elementos socioculturales y económicos analizados presuponen el reto de ahondar en los umbrales, interacciones a diferentes escalas y trayectorias del OC.

Palabras clave: *resiliencia, transdisciplina, sistemas costeros, cambio global.*

Introducción

El conocimiento de los fenómenos y procesos dinámicos que concurren en los geosistemas, de la problemática ambiental, y de las capacidades de carga ecosistémicas a escala local, son factores cruciales para considerar ante la perspectiva de un desarrollo sostenible (Areces *et*

*Doctora en Ciencias en Ecología y Pesquerías. Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C.

**Doctor en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C.

et al., 2011). Modelos conceptuales de manejo ampliamente utilizados, como el DPSIR (por sus siglas en inglés; Driving Forces-Pressures-State-Impacts-Responses) es un marco que se utiliza para analizar y gestionar los problemas ambientales. Sin embargo, carecen de especificidad y cuantificación (Patricio *et al.*, 2016). La comprensión del funcionamiento de los ecosistemas se torna aún más compleja al considerar los efectos del cambio climático, como el calentamiento y acidificación de los océanos, el aumento del nivel del mar y el incremento e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos.

El calentamiento del océano provoca cambios en las tramas tróficas marinas, por ejemplo, al producirse alteraciones en los productores primarios, que usualmente se observan en forma de floraciones algales con especies de dinoflagelados y cianobacterias potencialmente nocivas (Poot-Delgado *et al.*, 2014). Este fenómeno puede traer consigo la eutrofización e hipoxia en zonas costeras (Muciño-Márquez *et al.*, 2017). Además, las modificaciones en las tramas alimenticias afectan la diversidad de especies, la productividad pesquera, y, con ello las condiciones de vida de las poblaciones humanas que dependen de estos recursos. Las tormentas y huracanes provocan inundaciones, procesos erosivos en las costas y alteraciones estructurales en los hábitats.

Las playas y dunas costeras son los ecosistemas mejor representados a lo largo del litoral del Golfo de México (Escobar-Briones, 2004). Estas proporcionan servicios como provisión de recursos y materias primas, protección costera y control de la erosión, captación y purificación de agua, secuestro de carbono, regeneración de nutrientes, mantenimiento de vida silvestre, espacios para la recreación, educación e investigación.

Los ecosistemas de manglar y lagunas costeras también proveen importantes bienes y servicios ambientales, relacionados con el mantenimiento de las pesquerías, filtrado de aguas residuales, amortiguamiento de tormentas, fijación de nitrógeno, captura de carbono, almacén de recursos genéticos, así como valores culturales y éticos (Sanjurjo, 2005). Algunas estimaciones del valor recreativo de los humedales costeros ascienden a los 114 dólares americanos por hectárea (Sanjurjo, 2004), y hasta 900 dls. ha⁻¹ por el servicio de protección de pesquerías (Yáñez-Arancibia, 1995).

Los estudios a escala macroecológica en México se han concentrado notoriamente en el medio terrestre (90%) y sólo el 10% en los tipos de hábitat marino y dulceacuícola, según Rodríguez *et al.* (2017), a diferencia de la tendencia encontrada a nivel mundial, donde el

35% y el 9% se han dedicado a los medios marino y dulceacuícola, respectivamente. Asimismo, el porcentaje del total de artículos científicos para México sobre invertebrados y peces es menos del 50% que a nivel mundial, a diferencia de otros grupos taxonómicos sobre los que se produjo mayores porcentajes, como mamíferos, anfibios y reptiles.

Entre los principios rectores del “Plan de reestructuración estratégica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT (2018-2024)” se encontró el desarrollo de proyectos de investigación interdisciplinarios de alto nivel académico sobre prevención de desastres naturales y respuesta ante ellos. De igual modo, se consideran los temas de restauración ambiental, cuidado del agua y evaluación de los impactos de acciones extractivas y de industrias diversas. Todo ello, toma especial relevancia en zonas costeras.

Los impactos del cambio global en la costa de Tabasco

El funcionamiento del sistema ecológico de la costa está sincronizado con los ciclos climáticos que, a su vez, están regulados por procesos de escala planetaria (Chiappa-Carrara, 2012). La modificación del sistema climático global por efecto de la actividad humana implica, por tanto, que se alteren también los ciclos de los seres vivos. En el trópico, la fenología o relación entre los factores climáticos y los ciclos biológicos, tiene una componente importante dada por la precipitación. En la región sureste de México, el período de secas entre marzo y mayo se debe a la condición anticiclónica dominante en el Atlántico Norte. En verano, la influencia de los vientos alisios y la formación de fenómenos de baja presión provocan lluvias a partir de junio, cuya frecuencia se intensifica hacia el mes de septiembre. De noviembre a febrero inciden mayormente sistemas frontales fríos, con vientos del norte que se saturan de humedad cuando cruzan el Golfo de México.

Los ecosistemas costeros en la región son afectados, además, por la dinámica de las corrientes, mareas y el balance o relación entre sedimentación y erosión de la línea de costa, que favorecen la formación natural de cordones de playa o barras litorales, sistemas estuarinos deltaicos y fluvio-lagunares (de la Lanza-Espino, 2013). En los estuarios, zonas transicionales entre el medio fluvial terrestre y el océano, se producen gradientes de densidad a diferentes profundidades y temperaturas, que provocan gradientes de presión que, a su vez, generan procesos de turbulencia e inducen la circulación. Estas condiciones los convierten

en áreas importantes por su diversidad, producción biológica y como fuente o sumidero de sustancias y partículas que circulan a lo largo de los ecosistemas costeros.

El cambio global alude al incremento de algunos estresores y shocks provocados por la actividad humana, que influyen en los patrones de vida y conducta (Ashton *et al.*, 2022), amenazando y afectando los múltiples servicios ecosistémicos costeros de regulación (control de inundaciones y consolidación del sustrato, captura y almacén de carbono [carbono azul], depuración de agua, retención de sedimentos, reducción de la salinidad), de provisión (alimentos y medicinas), de cultura (recreación, educación, arte, investigación) y de soporte (hábitats para alimentación, refugio, descanso y zonas de cría de especies importantes para la conservación; Meave *et al.*, 2021). Actividades económicas claves como la pesca, el turismo y la portuaria; estas dependen de las condiciones geomorfológicas de las costas e integridad ecológica de sus sistemas de manglares y humedales, lagunas, playas y dunas.

Por otro lado, las cuencas del Grijalva-Usumacinta, el segundo mayor sistema fluvial de Norteamérica y más caudaloso de Mesoamérica, escurren en su porción noroccidental hacia el Estado de Tabasco. Esta zona contiene la mayor extensión de seis tipos de humedales costeros del país, con funciones claves ecológica, económica y social, proporcionando complejidad estructural, heterogeneidad de hábitats y soporte para el mantenimiento de la productividad regional y de las pesquerías comerciales (Toledo-Ocampo y Soto, 2014).

Los manglares, como parte de bosques inundados, los pastos marinos, y otros humedales como herbazales inundados pueden almacenar más carbono por unidad de área denominado carbono azul que los bosques tropicales, además de proveer servicios claves de protección de la infraestructura costera, filtración y remoción de contaminantes del agua, zonas de cría de especies de importancia ecológica y económica como el cangrejo azul y ecoturismo. De ahí, que su conservación y restauración ecológica sean soluciones costo-efectivas de mitigación y adaptación al cambio climático, que deben integrarse en las estrategias nacionales y estatales de cambio climático y de biodiversidad. Su implementación constituye una necesidad inminente y una oportunidad de incidencia en política pública y de acceso a financiamiento innovador de conservación (FMCN 2016).

Asimismo, la existencia de petróleo en el territorio tabasqueño provocó el surgimiento del Pacto Ribereño durante la primera mitad de la década de 1970; movimiento campesino contra la explotación y la contaminación de las aguas, los sedimentos y los organismos con altos

niveles de hidrocarburos, además, las actividades económicas principales como la pesca y la producción de ostión son vulnerables a la bioacumulación de contaminantes. Con el transcurso de los años, los contaminantes que se generan en la cuenca alta y media, el uso de plaguicidas en la agricultura, así como de solventes, grasas, aceites, fenoles, compuestos azufrados, nitrógeno, mercurio y plomo, derivados de las acciones de la industria petroquímica, han provocado daños ecológicos irreversibles en diferentes humedales.

Hoy, ante el escenario de la construcción de una refinería, como activo estratégico de prioridad nacional, junto al Puerto Dos Bocas y el incremento correspondiente de la actividad industrial y portuaria en el área, el crecimiento demográfico y de infraestructura costera en un contexto de rezago educativo de las comunidades, no debe perderse de vista, la resiliencia de los sistemas costeros de Tabasco para afrontar los cambios pasados, presentes y futuros. Es importante considerar, asimismo, la vulnerabilidad de esta zona a las inundaciones y retroceso de la costa por su relieve bajo, teniendo en cuenta que en la misma confluyen e interactúan cuantiosos recursos naturales y económicos (Chan-Quijano y Alejandro-Izquierdo, 2024).

El cambio de uso del suelo, por ejemplo, para establecer plantaciones de coco, cacao, o palma de aceite y, en general, para la agricultura y la ganadería, así como la práctica tradicional de extracción de madera como fuente de tinte natural o de leña, han contribuido a la deforestación y fragmentación de los hábitats, tanto en la cuenca como en la zona costera, provocando mayor acarreo de sedimentos, sedimentación, azolvamiento y efectos negativos sobre la biodiversidad en las lagunas costeras. Aunado a los procesos de contaminación, provenientes de la agricultura, la urbanización y la actividad industrial, la canalización y represamiento de cauces de agua han provocado fuertes impactos en la calidad del agua.

Las pesquerías en la zona ribereña y en mar abierto enfrentan problemas severos para su subsistencia (Tovilla *et al.*, 2010). Por otra parte, el turismo no planificado y la construcción de infraestructura costera, en particular de parques industriales, muelles, carreteras y canales, implican otras presiones constantes, causando impacto ambiental por modificación de las costas y cambio de uso del suelo, alteraciones del régimen hídrico y diferencias socioeconómicas marcadas, que no favorecen a las comunidades locales.

5 El crecimiento poblacional desordenado, a su vez, causa aculturación, violencia y crimen en las ciudades costeras (Pelling, 2012). A esto se añade la extracción ilegal de fauna silvestre,

a menudo provocando incendios que destruyen extensiones amplias de terreno de humedales, la proliferación de especies invasoras como el pez diablo, cuya acción contribuye al deterioro y erosión de las márgenes de los sistemas acuáticos, el incremento de organismos productores de sustancias potencialmente tóxicas y nocivas, todo lo anterior unido a los efectos del cambio climático como estresores de las zonas costeras (Mendoza-Carranza, 2008; Barba-Macías *et al.*, 2017). Por ejemplo, ocurren procesos de salinización que alcanzan hasta varios kilómetros de las costas por la pérdida del estrato vegetal, intensificación de la evapotranspiración, reducción de la infiltración y retroceso de la costa, provocando que la concentración salina sea mayor. Estos cambios en la salinidad influyen tanto en las comunidades acuáticas como en las poblaciones humanas.

Al modelo de gestión de los ecosistemas en un espacio geográfico se puede aplicar la perspectiva de enfoque ecosistémico, como marco conceptual y metodológico para el manejo de los ecosistemas hacia su desarrollo sostenible, en el contexto de la política pública (Andrade *et al.*, 2011). Es crucial llevar a cabo modelos de planeación participativa, basados en el diagnóstico de la problemática en cada localidad o comunidad particular, que se traduzcan en programas integrales sustentables a partir del consenso y actuación corresponsable civil e institucional (Toledo y Bartra, 2000). Estos Programas de Desarrollo Comunitario incluyen un ordenamiento ecológico y la definición de los recursos necesarios para ejecutar los proyectos y acciones acordados, con base en objetivos y metas concretas, lo que permite evaluar su desempeño y cumplimiento.

Con base en instrumentos políticos, jurídicos, de planificación y de gestión, el proceso de Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) es un proceso dinámico que reúne gobiernos y sociedades, científicos y administradores, intereses públicos y privados en pro de la protección y del desarrollo de sistemas y recursos costeros, utilizándolos razonablemente (Figura 16.1). Las guías para el MIZC proveen orientaciones valiosas para aplicar estrategias basadas en un enfoque ecosistémico, que permitan la planificación y gestión territorial de los espacios litorales y deriven en prácticas sustentables (Muniz *et al.*, 2013).

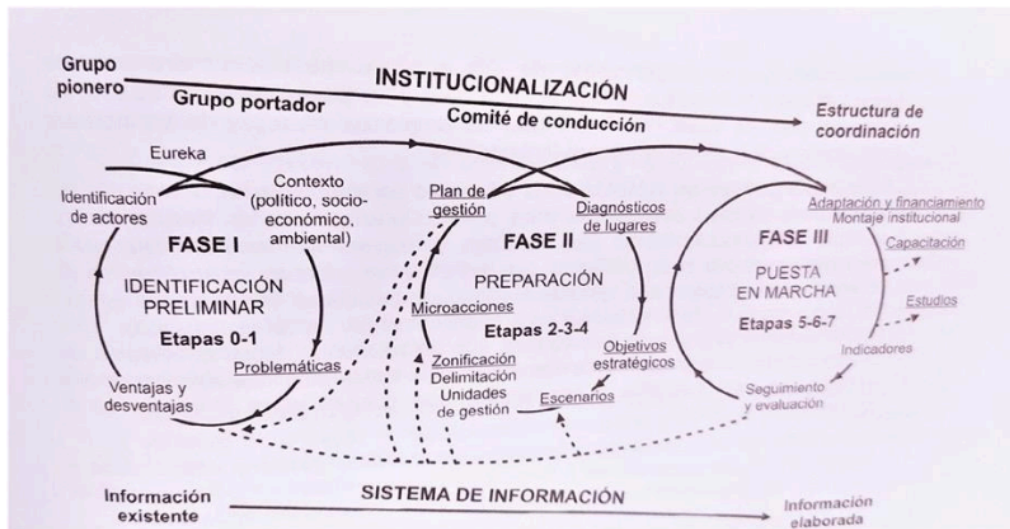


Figura 16.1. Proceso de ciclo del Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP) de Manejo Integrado de zonas costeras. Fuente: Muniz *et al.*, (2013).

El Observatorio Costero para la Resiliencia (OCR-LANRESC) en el Estado de Tabasco

Desde el año 2015, el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC), viene avanzando en el estudio de los sistemas costeros de México, y entre sus líneas estratégicas se encuentra la creación de siete Observatorios Costeros para la Resiliencia (OCR), como un proyecto para el monitoreo y evaluación de la resiliencia de distintos socio-ecosistemas costeros. Uno de estos observatorios, [el OCR-DBP](#), se ubica en la costa central del Estado de Tabasco. El mismo comprende las zonas del puerto y la refinería de Dos Bocas, así como dos áreas naturales protegidas en el municipio costero de Paraíso, entre éstas, la laguna costera de Mecoacán.

Entre las principales actividades realizadas en el socioecosistema del OCR-DBP, organizadas por el LANRESC, se incluyen en orden cronológico, diferenciados por cuatro grupos temáticos y acciones, de comunicación de la ciencia y de colaboración:

Clima

- Un estudio del estado del clima y sus proyecciones bajo cambio climático (2019).

- Un proyecto sobre indicadores climáticos (2023).

Socioeconomía

- Un estudio de percepción social ante el cambio climático (2019).
- Un análisis socioeconómico, de accesibilidad espacial a servicios de hospitalización para los habitantes del municipio de Paraíso y de caracterización socioeconómica de este municipio (2019).
- Un estudio de la gobernanza y percepción social de cooperativas pesqueras de escama (2022).

Análisis geoespacial

- Un análisis geo-ecológico del paisaje (2019).
- Generación de geoportal con delimitación, hexagonalización, etc. por parte de la Coordinación geoespacial (2022).

Ecosistemas

- Estudio de parámetros físico-químicos del agua, y fitoplancton con énfasis en especies potencialmente tóxicas y nocivas, en laguna y costa adyacente (2019).
- Estudio prospectivo de macrofauna bentónica en laguna y costa adyacente (2019).
- Estudio ictiológico histórico y reciente de la laguna y su zona costera adyacente (2019).
- Estudio microbiológico en laguna y costa adyacente (2021).
- Estudio de macrofauna e hidrocarburos en sedimentos, en playas arenosas (2021).
- Cuatro campañas anuales consecutivas simultáneas de estudio de la calidad del agua en los OCRs, con mediciones de parámetros físicoquímicos, muestreos de nutrientes, de cafeína y de fitoplancton, en laguna y costa adyacente (2021-2024).
- Tres estudios de macrofauna e hidrocarburos en sedimentos de laguna y costa adyacente (2021-2023-2024).

Comunicación de la ciencia (con la Coordinación Operativa del LANRESC)

- Un capítulo para una serie documental sobre los OCRs (2021). <https://youtu.be/rYDmCvSx7zU>
- Aportes al proyecto del OCR a la plataforma iNaturalist de ciencia ciudadana (a partir de 2021). <https://mexico.inaturalist.org/projects/dos-bocas-observatorio-costero>
- Una Mesa de Análisis y Debate sobre la problemática del OCR, con expertos de diferentes sectores (2021). https://www.youtube.com/watch?v=_VboSX0TjEo
- Desarrollo del acervo bibliográfico del OCR (2024).

Colaboración

- Con otros laboratorios y grupos de investigación nacionales y extranjeros, para el diseño y desarrollo de proyectos de ciencia aplicada a la resiliencia costera y políticas públicas (2019-2024).
- Talleres participativos y generación de la primera [Tarjeta de Reporte socioambiental del OCR](#) (2022).
- Participación en Redes científicas nacionales e internacionales.

Vacíos de conocimiento, retos y oportunidades en la implementación del OCR_DBP

El desarrollo industrial, crecimiento urbano, conflictos sociales y convergencia espacial de las actividades humanas y recursos naturales claves en el socioecosistema del OCR-DBP, expuesto a los estresores y shocks relacionados con el cambio climático, nos alerta ante la degradación potencial de los ecosistemas naturales. Por tal motivo, es crucial seguir ahondando en indicadores, índices y modelos más precisos, con protocolos estandarizados y replicables, que nos permitan realizar comparaciones a diferentes escalas espaciotemporales y determinar la redundancia estructural y funcional en ecosistemas naturales que permitan sostener la biodiversidad, sus procesos e interacciones asociados, y con ello, garantizar la sostenibilidad de los servicios o valores que estos aportan al humano. Asimismo, definir umbrales, posibles impactos sinérgicos y trayectorias del OC, con base en análisis inter y transdisciplinarios.

Posibles estrategias de manejo ambiental

Se ha destacado en diferentes foros la pertinencia, como estrategia de gobernanza, de conciliar los planes de desarrollo regional federal, estatal y municipal, en particular para el polígono que comprende el OCR-DBP; en este caso, el Programa de Ordenamiento Ecológico Estatal alineado con el de Ordenamiento Territorial del Ayuntamiento de Paraíso, con participación y consulta ciudadana para la búsqueda de soluciones de manejo adaptativas, basadas en la naturaleza y de beneficio común, impulsando los sectores productivos que equilibren los ingresos locales versus los del sector petrolero.

Tener en cuenta un manejo de residuos adecuado, así como el funcionamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales, para prevenir y mitigar los riesgos de contaminación, ante el inminente crecimiento y de la mancha urbana. Continuar estudios hacia la modelación más precisa de escenarios posibles al 2030 y 2050, basados en criterios de cambio climático.

Incidir en la adopción de medidas para la reducción de emisiones de gases tóxicos y contaminantes de efecto invernadero al ambiente, así como de derrames de hidrocarburos. Por ejemplo, mediante programas de compensación económica de impactos ambientales, manteniendo los estudios antes, durante y después de los posibles impactos, y considerando los costos sociales, ambiental y de remediación.

Continuar propiciando espacios de planeación, con participación de actores clave del territorio, que tengan responsabilidades en diferentes actividades y proyectos, así como la colaboración y coordinación entre instancias de gobierno y academia, e interinstitucional de cooperativas, empresas y asociaciones civiles.

Dar prioridad a la reforestación de manglares y a la conservación de humedales de pastizales. Velar por el cumplimiento de las leyes en materia ambiental, fortaleciendo los mecanismos de vigilancia para que esto se cumpla y propiciar programas educativos sobre la importancia del ambiente y de los ecosistemas.

Referencias

Andrade, A., Arguedas, S. y Vides, R. (2011). *Guía para la aplicación y monitoreo del enfoque ecosistémico*. Bolivia: Editorial FCBC.

- Areces, A.J., Machín, J.L., López-Kramer, J.M., Martínez-Bayón, J.C., Martínez-Iglesias, J.C., Piñeiro, R., Quintana-Orovio, M. y Salinas, E. (2011). Las claves de la sustentabilidad ecológica. *Serie Oceanológica*, 9, 73-95.
- Ashton, G.V., Freestone, A.L., Duffy, J.E., Torchin, M.E., Sewall, B.J., Tracy, B., ... y Ruiz, G.M. (2022). Predator control of marine communities increases with temperature across 115 degrees of latitude. *Science*, 376(6598), 1215-1219. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abc4916>
- Barba-Macías, E., Mendoza-Carranza, M., Trinidad-Ocaña, C., Juárez-Flores, J. y Martínez-Gutiérrez, M.L. (2017). *Contrastes en el manejo del cangrejo azul y el pez diablo: perspectivas de los pobladores de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco*. México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Chan-Quijano, J.G. y Alejandro-Izquierdo, C.M. (2024). Cambios sociales y ambientales en Paraíso, Tabasco, por la Refinería Olmeca en Dos Bocas. En E.A. García-Rivera, D. Matías-Sánchez y D.E. Ramos-Muñoz (coords.), *Vivir y trabajar en ciudades con hidrocarburos* (pp. 109-132). México: Universidad Autónoma de Tamaulipas, Editorial Fontamara.
- Chiappa-Carrera, J. (2012). Sur del Golfo de México: alcances y retos. En: A.J. Sánchez, j. Chiappa-Carrera y R. Brito-Pérez (eds.), *Recursos acuáticos costeros del sureste. Vol. 2* (pp. 21-27). Mérida, Yucatán: Fondo Mixto de CONAHCyT-Gobierno del Estado de Yucatán, Red para el Conocimiento de los Recursos Costeros del Sureste, Universidad Nacional Autónoma de México.
- De la Lanza-Espino, G. (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas*, 81, 33-50.
- Escobar-Briones, E. (2004). Estado del conocimiento de las comunidades bénticas en el Golfo de México. En M. Caso, I. Pisanty y E. Ezcurra (eds.), *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología, Harte Research Institute for Golfo of Mexico Studies.
- FMCN (Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, 2016). *Informe anual 2016*. México: Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, A.C.

- Initiative 20x20 (2011). Mexico: restoration approach. <https://initiative20x20.org/regions-countries/mexico>
- Meave, J.A., Gallardo-Cruz, J.A., Méndez-Hernández, C.A., Martínez-Camilo, R., Véliz-Pérez, M.E., Carabias, J. (coords.) (2021). *Tipos de vegetación de la cuenca del río Usumacinta*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana.
- Mendoza-Carranza, M. (2008). El manejo de productos pesqueros en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco. En W. Arévalo-Frías, C.C. Hernández-Lazo y M. Mendoza-Carranza (eds.), *Manejo, procesamiento y transformación de los productos pesqueros con énfasis en los recursos de la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla* (pp. 13-25). México: El Colegio de la Frontera.
- Muciño-Márquez R.E., Aguirre-León, A., Figueroa-Torres, M.G. (2017). Evaluación del estado trófico en los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta y Palizada del Este, Campeche, México. *Hidrobiológica*, 27 (3), 281-291. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2017v27n3/Mucino>
- Muniz, P., Lana, P., Venturini, N., Elias, R., Vallarino, E., Bremec, C., Martins, C. y Sandrini-Neto, L. (2013). *Un manual de protocolos para evaluar la contaminación marina por efluentes domésticos*. Uruguay: Universidad de la República, Montevideo.
- Patricio, J., Elliot, M., Mazik, K., Papadopolou, K.N, Smith, C.J. (2016). DPSIR-Two decades of trying to develop a unifying framework for marine environmental management? *Frontiers in Marine Sciences*, 3, 177. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00177>
- Pelling, M. y Blackburn, S. (2013). *Megacities and the coast: risk, resilience and transformation*. UK: Routledge.
- Poot-Delgado, C.A., Rosado-García, P.I. y Guzmán-Noz, Y.A. (2014). Fitoplancton marino potencialmente nocivo en las aguas costeras de Campeche. En A.V. Botello, J. Rendón von Osten, J. A. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.), *Golfo de México: contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias* (pp. 117-132). Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.

- Rodríguez, P., Villalobos, F., Sánchez-Barradas, A., Correa-Cano, M. E. (2017). La macroecología en México: historia, avances y perspectivas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 1, 52-64.
- Sanjurjo, E. (2004). Estimación de la demanda por los servicios recreativos del manglar en Marismas Nacionales: una aplicación de la metodología de valoración contingente en La Tobará. Segundo Congreso Anual de la Asociación Latinoamericana de Economistas Ambientales (ALEAR). Oaxaca, México.
- Sanjurjo-Rivera, E. y Welsh-Casas, S. (2005). Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares. *Gaceta Ecológica*, 74, 55-68.
- Toledo, C. y Bartra, A. (2000). *Del círculo vicioso al círculo virtuoso: cinco miradas al desarrollo sustentable de las regiones marginadas*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Plaza y Valdés.
- Toledo-Ocampo, A. y Soto, L.A. (2014). El gran ecosistema del Golfo de México: marco conceptual. 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* (pp. 1-36). Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados.
- Tovilla, C., Pérez, J.C. y Arce, A.M. (2010). Gestión litoral y política pública en México: un diagnóstico. En J.M. Barragán-Muñoz (coord.), *Manejo costero integrado y política pública en Iberoamérica: un diagnóstico, necesidad de cambio* (pp. 15-40). España: Red Red Iberoamericana de Manejo Costero Integrado.
- Yáñez-Arancibia, A., Seijo, J.C., Lara-Domínguez, A.L., Villalobos, G.J., Rivera, E., Rojas, J.L., Cabrera, M.A., Euán, J. y Pérez-Espinosa, E. (1995). *Valoración económica de los ecosistemas: el caso de los manglares*. Campeche, México: Programa de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México.

Capítulo 17. Estructura de *Demospongiae* sugiere calidad del área bentónica en la línea de costa oeste de Cozumel, México

Gregorio De la Cruz Uc*

Martha Angélica Gutiérrez Aguirre**

Adrián Cervantes Martínez***

Resumen

Este estudio expone la estructura de esponjas marinas en profundidades de 1 a 3 m, en algunas costas rocosas del oeste de Cozumel, Quintana Roo. La colecta de datos se efectuó por medio de fototransectos para los análisis de cobertura por especie, a través de buceo autónomo libre, sobre cuadrantes de 1 m². Se prestó atención a las costas rocosas debido a su importancia como hábitats para el crecimiento de las comunidades de esponjas marinas, así como para explorar el potencial del Filo Porifera, como uso de indicadores ambientales en las áreas costeras del trópico. La clasificación de especies se realizó por medio del análisis macroscópico de los organismos, análisis microscópico de espículas de muestras permanentes y se complementó con la secuenciación de ADN del gen de la subunidad 1 del citocromo c oxidasa mitocondrial (COI), de algunos especímenes. La diversidad y dominancia se evaluaron por medio de los índices de Shannon y Simpson. Se determinó que contar con una buena cantidad de información sistematizada, referente a la estructura básica de estas comunidades en la línea de costa (o los cambios que sufriría detectados a través de monitoreos) es fundamental en áreas con influencia urbana, debido al rol de las *Demospongiae* en la comunidad arrecifal.

Palabras clave: *caribe mexicano, ecología, esponjas, estructura, marino.*

* Lic. en Manejo de Recursos Naturales. Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo, México. ORCID:

** Doctora en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. Universidad Autónoma del estado de Quintana Roo, Cozumel, México. ORCID: 0000-0002-9329-820X, autora para correspondencia (margutierrez@uqroo.edu.mx)

*** Doctor en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable. El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8947-8558>

Introducción

2

En el Caribe mexicano, gran parte de las costas rocosas son resultado de antiguos arrecifes coralinos, esqueletos de algas calcáreas y otros organismos microscópicos que con el tiempo se han cementado y ha tenido como consecuencia una piedra caliza altamente soluble destacando el afloramiento de líneas de costas calizo-rocosas, que se han ido erosionando por la energía del oleaje dejando una pendiente resistente y suave de tal modo que sirve de hábitat a un gran número de especies de invertebrados. Por lo tanto, estas playas suelen ser consideradas como costas secundarias, que poseen distintos orígenes de las cuales se encuentran compuestas de arena, pedazos de coral y gran cantidad de restos animales (González-Solís y Torruco, 2015; González-Solís *et al.* 2017).

La distribución de organismos en costa rocosas de grupos faunísticos y florísticos está restringida por ser una zona sujeta a la exposición directa de las olas y el movimiento vertical de las mareas así también esta propensa a diversos cambios por la influencia de factores como viento, temperatura, desecación, salinidad, oxígeno, luz, pH, superficie de fijación, competencia y depredación, pudiendo verse como un sistema con estabilidad temporal, ya que el sustrato rocoso puede persistir por largo tiempo (Vassallo *et al.* 2014; González-Solís *et al.* 2017).

2

Los organismos que habitan los sistemas rocosos pueden clasificarse como criptofauna o epifauna. La criptofauna, está representada por organismos animales que se mimetizan o esconden en el sustrato por medio de la coloración, aspecto o comportamiento. Dentro del grupo de la criptofauna se encuentran los horadadores que son aquellos organismos que generan oquedades en la roca o que dejan un espacio hueco en un espacio sólido (Vassallo *et al.* 2014).

La criptofauna es de utilidad como un indicador de la calidad ambiental, siendo de especial énfasis la intensidad de la sedimentación o de la resuspensión de sedimento, debido a que el incremento de partículas en la columna de agua puede generar cambios en la composición de los grupos ahí presentes. Por lo tanto, se podría considerar que cuando se tenga poca alteración de partículas en la columna de agua se tendrá una cierta proporción de suspensívoros y sedimentívoros y en cuanto se obtenga un incremento de las partículas en la columna de agua se cree que podría haber cambios en las porciones de los grupos tróficos.

Fomentando la proliferación de algunos grupos tolerantes o que se reduzca la abundancia de grupos sensibles (Campos-Vázquez *et al.* 1999).

Los organismos filtradores, mejor conocidos como suspensívoros; son todas aquellas comunidades que tróficamente dependen del alimento que se pueda hallar suspendido en la columna de agua y que dependen de la renovación de la cantidad de alimento se encuentra estrechamente ligado a las corrientes marinas. No obstante, se sabe que la sedimentación desmesurada, puede dañar negativamente las funciones y la estructura de procesos físicos y biológicos en los sistemas marinos, que afectaría la supervivencia y fijación de larvas de organismos arrecifales; pero también los sedimentos suspendidos en la columna de agua presentes en sitios con corrientes intensas causarían menores problemáticas a las comunidades bénticas (Carmona-Islas *et al.* 2019). Por lo tanto, estos grupos pueden llegar a ser más susceptibles a las variaciones temporales de sedimentos (Gili, 1998). Entre algunos ejemplos que se pueden mencionar de organismos suspensívoros asociados a las líneas de costa, están los Cnidarios, los Briozoos, Crinoideos y el Filo Porifera (Gili, 1998; Carmona-Islas *et al.* 2019). Las esponjas son organismos que pueden adherirse a distintos tipos de superficies ya sean estas duras o blandas, encontrándose así incluso en partes de la zona costera (Aguirre, 2012).

En cuanto a la importancia ecológica de los poríferos se cuenta que tienen amplia tolerancia ecológica y elevada biomasa (que frecuentemente supera la de los corales) son buenos competidores por el espacio y constituyen una fuente de alimento y hábitat para muchos otros grupos que pueden vivir asociados a éstos (Núñez Flores *et al.* 2010) y los patrones de abundancia y distribución en la línea de costa, se explican por la interacción de los factores señalados en el párrafo previo (Díaz y Zea, 2008). Por lo tanto, una de las principales amenazas que enfrenta este grupo es la destrucción del hábitat en el Golfo de México y en el Caribe, en donde el mayor impacto proviene de la industria turística, la tensión antrópica provocadas por la contaminación y las intensas tormentas que originan cambios ambientales (Torruco-Gómez y Gonzales-Solís, 2010).

Por ello, el presente estudio tiene como meta usar la estructura ecológica de las comunidades de Demospongiae para conocer el estado de salud de la línea de costa de playas rocosas de Cozumel (con influencia urbana); empleando la ausencia/presencia y cobertura de estas especies encontradas en los sitios.

2

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en Isla Cozumel, la cual constituye uno de los once municipios del Estado de Quintana Roo, ubicado en el extremo Oeste del Caribe Mexicano, aproximadamente a 16.5 km al Este de la Península de Yucatán. La Isla tiene colindancia con el municipio de Solidaridad al norte y al sur, así como al este con el Mar Caribe y al oeste con el municipio de Solidaridad, entre las coordenadas extremas de latitud Norte a $20^{\circ} 36'$ - $20^{\circ} 16'$, y de longitud Oeste a $86^{\circ} 44'$ - $87^{\circ} 20'$ (SECTUR, 2014; INEGI, 2017; Figura 17.1).

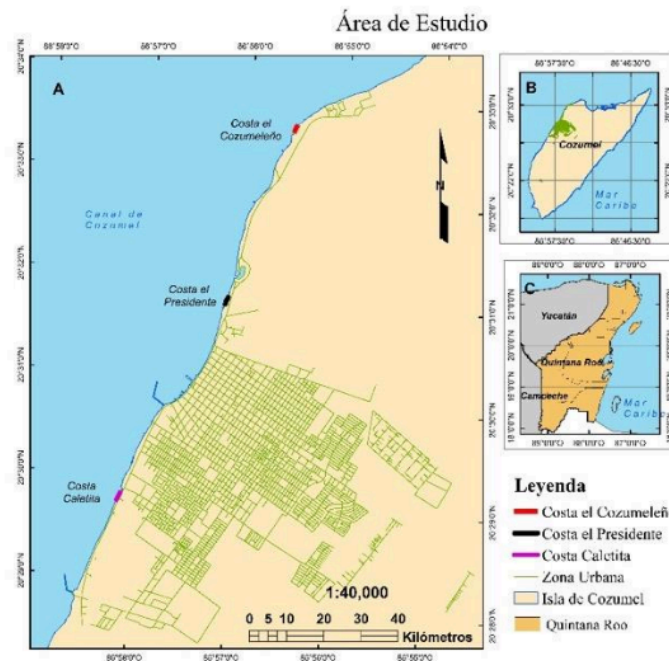


Figura 17.1. Playas rocosas analizadas, señaladas en colores rojo, azul y violeta: A) Áreas de muestreo. B) Isla de Cozumel. C) Península de Yucatán. Fuentes: elaboración propia con base en INEGI (2019), CONABIO (2011), Marco Geoestadístico Datum WGS (1984).

El muestreo se dirigió a tres playas rocosas de Cozumel, entre enero a diciembre de 2020, considerando las siguientes características: 1) localizadas frente al área urbana de San Miguel

2

de Cozumel, entre los límites norte del área hotelera y sur hasta playa caletita, 2) áreas de libre acceso y 3) áreas localizadas en la sección de barlovento de la isla.

Descripción de los sitios

El cozumeleño: playa de aproximadamente 183 m de largo de costa, con área supra litoral rocosa-arenosa de unos 2,130 m² de superficie y un área cubierta con vegetación de aproximadamente 24,500 m². Se analizó la comunidad de esponjas hasta a una profundidad máxima de 2 m. Considerada como playa publica, con servicios de hospedaje, en la Zona Hotelera Norte, en el km 4.5.

El presidente: esta costa rocosa cuenta con aproximadamente 160 m de longitud litoral. Este sitio no cuenta servicios ofrecidos hacia el turismo; sin embargo, se encuentra en un área con propiedades privadas cercanas. Las comunidades se analizaron a una profundidad máxima de 2 a 4 m, y cuenta con un área aproximada a 2,674 m², en donde yacen ciertos parches con flora sobre la roca.

Caletita: la playa rocosa Caletita cuenta con una línea de costa de 155 m de longitud, cuenta con servicios turísticos, así como el muelle exclusivo para el transporte de vehículos propios y de cargamento, entre las ciudades de Cozumel y Playa del Carmen. La región supra litoral cuenta con un área aproximada de 2,929.84 m² y el área analizada cuenta con profundidades máximas entre 1 a 2 m.

Material y métodos

Se utilizó un transecto perpendicular a la línea de costa, en cada uno de los sitios analizados. La posición del transecto se eligió de manera azarosa en cada playa, en sitios con profundidad que osciló entre 1.5 a 3 m de profundidad; el análisis de las coberturas de cada especie de Porifera se llevó a cabo por medio de fototransectos (Ruíz-Pinzón 2009; Aguirre, 2012). Mediante buceo autónomo libre, se obtuvieron imágenes por medio de una cámara deportiva GoPro Hero 7 Silver, fotografiando un cuadrante de 1 x 1 m; los cuales se colocaron a lo largo del transecto, en zig-zag, distanciados entre sí por 1 m lineal. Las fotografías se colectaron a 1 metro con respecto al sustrato de donde se posicionó el cuadrante, esto con la finalidad de abarcar toda el área del cuadrante mediante una sola fotografía (Aguirre,

2012). En total se tomaron datos de tres puntos por cada sitio de muestreo, donde los cuadrantes se encontraron en la misma columna de agua, pero en distintas profundidades con un total de seis transectos (mínimo) para cada zona.

Cobertura: se obtuvo la cobertura de cada especie/cuadrante con apoyo del software Coral Point Count with Excel extensions (CPCe V4.1). Una vez insertada la fotografía se calibró la imagen para obtener un área total de 1m². Después se procedió a realizar el análisis del área y longitud de los organismos de interés, delimitando el área de cobertura de las diversas especies de esponjas por cuadrante. Los resultados obtenidos, fueron usados para realizar una base de datos con el programa Excel para la obtención de la cobertura total (Ruíz-Pinzón, 2009).

Análisis de diversidad: se procedió a determinar la cobertura absoluta/especie/cuadrante. Luego con los datos de cobertura absoluta se procedió a la obtención de la cobertura relativa por especie. A partir de todos estos datos se realizaron los análisis de dominancia y diversidad con los índices de Simpson y Shannon y Weaner (Pla, 2006), respectivamente, usando las siguientes relaciones:

$$D = \sum (n/N)^2$$

D = Índice de Simpson

n = cobertura específica (en porcentaje)

N = cobertura absoluta (en porcentaje)

$$H = - \sum ni * \ln(ni)$$

H = Índice de Shannon-Weaner

ni = cobertura relativa

ln(ni) = logaritmo natural de la cobertura relativa

Identificación de especies y análisis de material biológico

La clasificación de las especies se realizó tomando en cuenta tres factores, actualmente considerados en guías especializadas de la región del Caribe (Maas-Vargas y Bahena-Basave, 2008; Vega, 2012; Carballo *et al.*, 2014; Ugalde *et al.*, 2015):

1. Observación directa del organismo, para determinar el color y la estructura de los organismos *in vivo*.
2. Secuenciación del Gen COI de los organismos, comparando con el banco de datos existentes en Bold Systems (<http://www.boldsystems.org>) y National Center Biotchnology Information NCBI (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) y observación de micro-estructuras (fibras y espículas), con microscopía de luz.
3. *Secuenciación de ADN*: la colecta de material biológico se efectuó con ayuda de una navaja estéril, cortando una fracción del organismo, menor a 3 cm por lado. El fragmento se colocó en una bolsa plástica con un poco de agua de mar. Todas las muestras biológicas se rotularon con el ID, nombre de la playa, número de transecto, profundidad, color *in situ*, nombre del colector y fecha. Luego el material colectado se colocó en una hielera para su transporte al laboratorio (Vargas, 2019).

Para asegurar el aislamiento y secuenciación del gen COI el protocolo inició en que, con ayuda de agua destilada, en laboratorio se procedió a eliminar restos de sedimentos o cualquier organismo afiliado al pinacodermo de la fracción de esponja colectada. Se procedió a secar el exceso de agua o mucosidad de la muestra con un paño absorbente estéril (González y Arenas-Castro, 2017). Posteriormente, con ayuda de un bisturí se realizó un corte transversal del organismo tomando una muestra de la parte interior, luego se procedió a insertar cada fragmento de la muestra en placas eppendorf (con capacidad para albergar hasta 96 muestras). Finalmente, se le adicionó el buffer de preservación (etanol concentrado) acorde con Erpenbeck *et al.* (2007) procurando cubrir todo el tejido y se almacenaron en refrigeración entre -20 °C a -80 °C (González y Arenas-Castro, 2017).

El aislamiento, amplificación y secuenciación del gen COI se llevó a cabo en el laboratorio de Código de Barras de la Vida de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal. Para ampliar la región de nuestro interés del ADN del gen mitocondrial que codifica la subunidad 1 de la enzima citocromo c oxidasa (COI), se usaron los primers universales de LCO1490 (5'- GGTCACAAATCATAAAGATATTGG-3' (forward) y HCO2198 (5'- TAAACTTCAGGGTGACCAAAAAATCA3' (reverse)).

Una vez obtenidas, la edición de las secuencias se realizó en el programa MEGA11, realizando un alineamiento múltiple de las secuencias con Aling By ClustalW, como mínimo se

consideró la alineación de mínimo 600 caracteres. Con esta información ² se procedió a la construcción del árbol de máxima similitud (Maximum Likelihood Tree) con un total de 500 réplicas, para ubicar a las especies clasificadas, en función de semejanza genética con el banco de datos accesible de Bold Systems.

Observación espículas: Con una fracción del material colectado, se elaboraron al menos 3 preparaciones permanentes de cada espécimen, siguiendo la metodología de STODOCU (2017), consistente de aislamiento con ácido nítrico, lavado con agua destilada y decantación. El precipitado se deshidrató con alcohol etílico concentrado al 70, 80, 90 y 96%, para colocarse sobre un portaobjetos, permitir su secado al ambiente y cubrirse, posteriormente con resina.

Resultados

El análisis morfológico y genético permitió la clasificación de 13 especies agrupadas en nueve Familias, siete Ordenes, tres Subclases y dos Clases de Porifera, habitantes de la Costa Oeste de la Isla Cozumel (Tabla 17.1). Por primera vez, para la región analizada, se conocen las secuencias del gen COI de cinco especies habitantes del área analizada: *Agelas tubulata* (Lehnert y van Soest, 1996), *Aiolochoiria crassa* (Hyatt, 1875), *Spirastrella* sp., *Xestospongia muta* (Schmidt, 1870) y ² *Chondrilla caribensis* (Rützler, Duran y Piantoni, 2007).

Tabla 17.1. Lista de especies de Demospongiae inventariadas en la costa oeste de Cozumel.

Especies	Costa Rocosa		
	1	2	3
Filo: Porifera			
Clase: Demospongiae			
Subclase: Heteroscleromorpha			
Familia Agelasidae			
<i>Agelas tubulata</i> Lehnert & van Soest, 1996	-	X	-
Familia Petrosiidae			
<i>Xestospongia muta</i> (Schmidt, 1870)	-	X	-

Familia Niphatidae			
<i>Niphates digitalis</i> (Lamarck 1814)	X	-	-
<i>Amphimedon queenslandica</i> Hooper & van Soest, 2006	X	-	-
Familia Spirastrellidae			
<i>Spirastrella</i> sp.	X	X	X
Subclase: Verongimorpha			
Familia Aplysinidae			
<i>Aiolochoira crassa</i> (Hyatt, 1875)	X	X	X
<i>Verongula rigida</i> (Esper, 1794)	-	X	X
<i>Verongula reiswigi</i> Alcolado, 1984	-	X	-
Familia Chondrillidae			
<i>Chondrilla nucula</i> Schmidt, 1862	-	X	-
Subclase: Keratosa			
Familia Thorectidae			
<i>Smenospongia aurea</i> (Hyatt, 1875)	X	X	X
Familia Irciniidae			
<i>Ircinia felix</i> (Duchassaing y Michelotti, 1864)	X	X	X
<i>Ircinia strobilina</i> (Lamarck 1816)	X	-	X
Clase: Homoscleromorpha			
Familia Plakinidae			
<i>Plakortis angulospiculatus</i> (Carter, 1879)	-	X	-

Fuente: elaboración por clasificación propia. Los números representan las playas analizadas: 1) Caletita, 2) El Presidente, 3) El Cozumeleño. Los avistamientos se señalan con “X”, y la ausencia con “-”.

Descripción de especies observadas (Figuras 17.2 y 17.3)

Chondrilla nucula: Esponja incrustante con hábitos crípticos, con crecimiento globular o acojinado. Ósculos dispersos sobre toda la superficie, la cual es lisa y resbaladiza. Color marrón oscuro o crema pálido *in vivo*, tornándose más claro al rodear los ósculos. En etanol, la parte interna se torna a morado mientras se acerca al pinacodermo, y manchas en color pálido en la superficie de este. Esqueleto con espículas esferaster, con espinas secundarias en

las puntas de las primarias. Con unas 25 espinas primarias, en la parte superior en promedio. Se observó habitando sobre coral o roca en playa “El Presidente” a ambas profundidades, con una cobertura relativa de 1.36%. Se obtuvieron las secuencias BOLD: MCM1182-21 y MCM1178-21 de esta especie.

Agelas tubulata: De tipo tubular, en forma de racimos fusionados a los costados surgiendo de una base en común. Con pseudo ósculos apicales y pequeños ósculos dispersos en la pared interna de la aurícula y en la pared externa. Con superficie lisa, pero rugosa al tacto y comprimible. Esponja amarilla anaranjada a marrón claro en el exterior y anaranjada interiormente. En etanol conserva el color marrón, tornándose hacia el crema en el ectosoma. Esqueleto con acantostilas, con 13-27 hileras de espinas. Con fibras hacia distintas direcciones, con un núcleo de 5 a 6 acantostilas y fibras secundarias más delgadas hacia la superficie. Se registró en las dos profundidades analizadas en “El Presidente” con una cobertura relativa de 0.84%. Asentada sobre sustrato rocoso. Se obtuvieron secuencias de 2 especímenes de esta especie: BOLD: MCM1109-21; MCM1169-21.

Aiolochoiria crassa: Esponja masiva a lobular, ósculos dispersos sobre las superficies lobulares y con superficie conulosa irregular en donde sobresalen las fibras con pequeños espacios entre cada cónulo, las crestas que interconectan los cánulos forman pequeñas depresiones poligonales y de consistencia firme. Se observaron tres colores distintos *in vivo*: amarillenta con púrpura con dominancia de color púrpura, amarillenta tornándose a un color marrón rojizo y amarilla dorado claro. Al conservarse en etanol se torna a un color morado negro, coloreando el etanol al principio en un color morado oscuro, tras varios cambios el etanol se pigmenta marrón amarillento. En la literatura no se mencionan la presencia de espícula, sin embargo, en este caso se lograron observar entre las fibras. Coanosoma formado por fibras de espongina ramificadas en un patrón dendrítico, divididas en primarias (con una medula) y secundarias. Todos los organismos se encontraron sobre sustrato rocoso. Se observó en los tres sitios analizados, en ambas profundidades. Su cobertura relativa fue de 8.33%. El espécimen de color morado se observó en los tres sitios, mientras que el espécimen naranja se observó en Caletita y el espécimen amarillo en El Presidente. La secuencia COI se obtuvo del espécimen morado con amarillo. BOLD: MCM1085-21.

Smenospongia aurea: Esponja ramificada con hábitos crípticos, con ramas cilíndricas, compuestos por masas de forma irregular de tubos cónicos o volcanes en donde se encuentran

los ósculos, que a menudo se encuentran alineados longitudinalmente. Superficie finamente canulosa. Se observaron dos colores: marrón y amarillo. En etanol el espécimen toma un color gris con pigmentos morados. El etanol se torna verde amarillento. Fibras de espongina con reticulación poligonal, sin medula. Se observó sobre sustrato rocoso en las tres localidades en ambas profundidades. La cobertura relativa fue de 0.75%. El espécimen amarillo se localizó en la costa el Cozumeleño y el espécimen color marrón en las costas Caletita y El Presidente.

Verongula rígida: Esponja masivo a tubular-lobular, los lóbulos se formarán en tubos, cada lóbulo tiene un ósculo apical con diafragmas perforados, los ósculos se encuentran definidos con los bordes lisos en la parte superior, cuanta con cresta laminares o canulosa. Consistencia comprensible y firme, áspera al tacto. Reticulación con mallas alargadas-poligonales, cuenta con medula. El organismo *in vivo* presentó un tono verdoso, asentado sobre sustrato rocoso. Se observó en El Presidente y El Cozumeleño, a una profundidad de 0-1 m. Su cobertura relativa fue de 4.15%.

Verongula reisiwigi: Esponja tubular, con forma de jarrón subesférico, con ósculos apicales, los tubos crecen a partir de una base en común. La superficie cuenta con crestas proyectadas paralelas o curvadas u onduladas irregularmente, formando sistemas de depresiones. Se observó *in vivo* en color verde con manchas amarillas y azules en la parte exterior, en la parte interior el color es amarillo limón. Conservado en etanol adquiere un color negro, el etanol se pigmenta en un color marrón amarillento. Se estructura con fibras huecas y granuladas interiormente y fibra con espinas (posible espícula), con una estructura prismática. Se presenció al organismo sobre sustrato rocoso, en el Presidente, a una profundidad de 2-3 m. Su cobertura relativa fue de 0.94%.

Ircinia felix: Esponja masiva-amorfo, globular con hábitos incrustantes, proyecciones con terminaciones en ósculos dispersos, los ósculos cuentan con membrana, el pinacodermo tiene pequeños canúlos con poca distancia entre sí y tiene una consistencia comprimible. Se observó *in vivo* en color marrón beige tornándose más oscuro mientras se acerca al ósculo, e incluso púrpura negruzco. El color en etanol se torna a marrón rosado, o gris violáceo, al acercarse al pinacodermo toma un color morado. Mientras el etanol se torna amarillo verdoso claro. Se estructura de fibras de espongina irregulares y pueden contener una carga considerable de granos de arena o restos de espículas en la medula, sin embargo, el material

extraño puede estar ausente. Espículas oxeas. El organismo se observó sobre sustrato roco y sobre la esponja *Verongula rígida*. Se encontró en las tres zonas de estudios en ambas profundidades. Su cobertura relativa fue de 1.2%.

Ircinia strobilina: Esponja masivo globular-lobular, con consistencia elástica. Los lóbulos generan pequeñas estrellas de las cuales se encuentran conectados. Ósculos en la parte superior sobre una depresión en la cual se agrupan, entre aproximadamente 1-5 mm de diámetro. De color café o marrón, pero hacia la punta de los lóbulos se tornan más claros y hacia los ósculos se tornan más oscuros. A diferencia de *I. felix* no presenta coloración en el pinacodermo, y con tonos morados dentro de los ósculos. El etanol se torna a un color verde fosforescente. Con filamentos de fibras de espongina finamente ramificadas, a veces granulada, adjunto a material foráneo. También con filamentos de colágeno, con espículas oxeas, tilostilos y triactina. Se apreció al organismo adherido a sustrato rocoso y sobre una pequeña área de coral. Se registró en las playas Caletita y el Cozumeleño, presente en ambas profundidades. Su cobertura relativa fue de 0.04%.

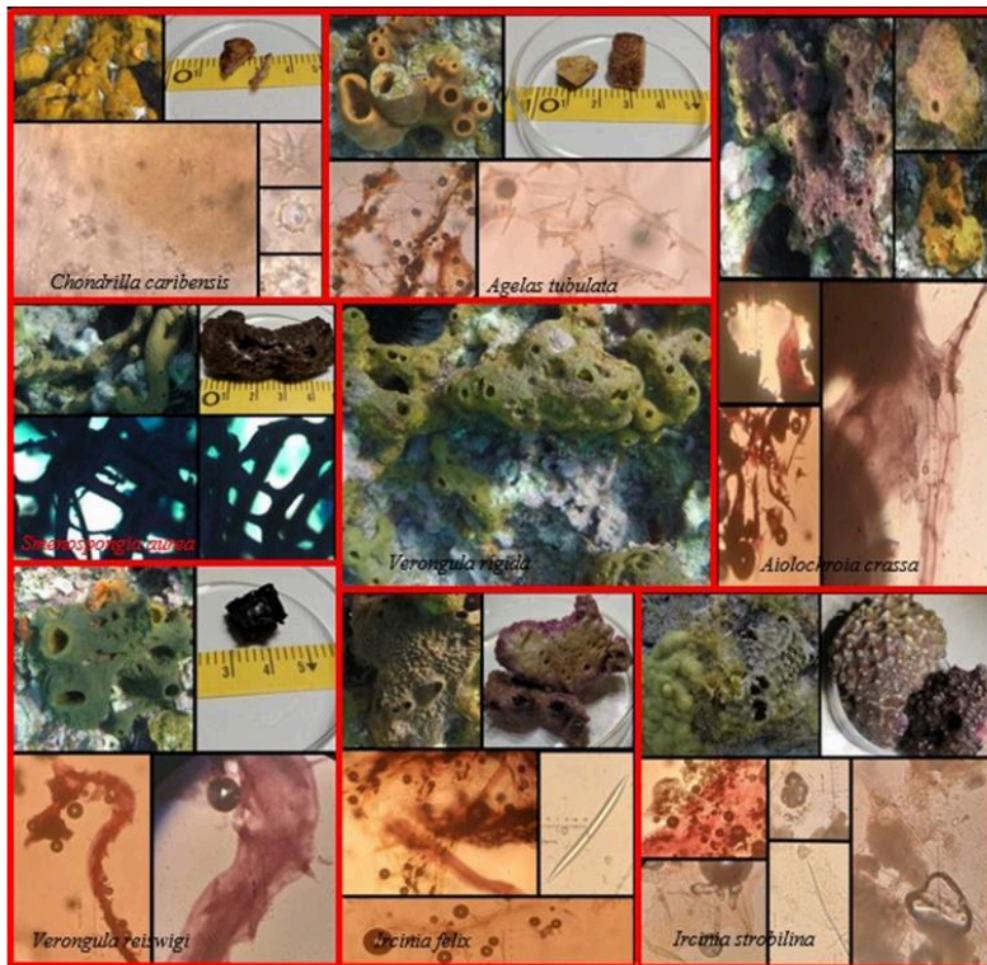


Figura 17.2. Especies de esponjas observadas en la costa Oeste de Cozumel.

²
Xestospongia muta: Esponja fusiforme de paredes gruesas, semejante a un barril, siendo una de las especies más grande del Caribe, cuenta con una superficie provista de crestas, presenta una gran pseudoscleritos apical, los ósculos se encuentran dentro del cráter, el pinacodermo es reticulada y rugosa, aunque con un patrón lobulado. Se avisto *in vivo* en color marrón rojizo en la parte externa, dentro de la aurícula se torna a un color purpura o beige pálido. Conservado en etanol toma un color beige. El etanol se torna verde claro. Se compone de espículas de tipo estrongilos con extremos ligeramente curvados, iguales y redondeados. Cuenta con fibras densa y reticuladas que forman mallas redondeadas, compuesta con espículas e incluso las mismas espículas aisladas. Se notó al organismo sobre sustrato rocoso.

Logrando avistarlo en la costa rocosa El Presidente, a una profundidad de 2-3 m. Su cobertura relativa fue de 0.07%. BOLD: MCM1118-21; MCM1119-21; MCM1121-21; MCM1125-21; MCM1126-21; MCM1127-21; MCM1128-21; MCM1129-21.

Niphates digitalis: Esponja tipo jarrón o conos aplanado-invertidos. Presenta una pseudosculos acerrado por pequeños filamentos los cuales se encuentran incluso por toda la superficie externa de la esponja como pequeñas espinas rizadas y alveolar, la superficie interior es liza en ella se encuentran los ósculos, su consistencia es rígida. Su color *in vivo* es malva. Cuando se extrae se torna a un color más pálido. Al conservarse en alcohol se torna blanco. Se estructura por espículas de tipo Oxea fusiformes, los cuales forman tractos espiculares, estas fibras forman mallas y sobresalen a la superficie. Las fibras de mayor diámetro forman fascículos longitudinales. Se apreció al organismo creciendo sobre el coral y sobre sustrato rocoso. Se hayo en la costa rocosa Caletita en ambas profundidades. Su cobertura relativa fue de 0.18%.

Amphimedon queenslandica: Esponja masiva incrustantes. Los ósculos se encuentran en la parte superior de los lóbulos, cada ósculo está rodeado por un labio membranoso ligeramente elevado, la superficie es lisa, uniforme y translúcida, pudiendo verse la red de fibra esquelética subyacente la cual es visible a través del ectosoma parcialmente translúcido. Siendo de textura comprimible y firme, muy resistente. Se distinguió un color azul grisáceo a verde, con un tono más gris alrededor del ósculo. Al preservarse en etanol toma un color gris amarillento a gris. El esqueleto se integra por meglascleras de tipo oxeas, ligeramente curvadas en el centro con puntas ahusadas o redondeadas. Cuenta con una red de fibras primarias anisotrópicas, contiene tractos espiculares de pequeñas oxeas, las fibras más grandes están interconectadas por tractos espiculares más delgados. Se percibió al organismo sobre sustrato rocoso. Se registró en la localidad de Caletita, a una profundidad de 0-1m. Su cobertura relativa fue de 0.01%.

Spirastrella sp: Esponja incrustante tipo tapete de apenas 3 mm de grosor, cuenta con diversas proyecciones rodeados de un labio membranoso en donde se encuentran los ósculos y siendo posible ver los canales, los ósculos se contraen al grado de cerrarse al introducirlo en etanol, la superficie presenta concavidades creando surcos, así también tiene una textura rígida y fibrosa poco comprimible, al secarse queda como piedra y se deshace. Se distingue por un color *in vivo*, naranja brillante, al mantenerse en etanol se vuelve rojo pálido casi rosa

traslucido, tiñendo el etanol a rojo naranja. Se soporta por espículas tilostilos rectos con un ápice y espirasteres. Se avisto al organismo sobre sustrato rocoso. Se encontró en los tres sitios muestreados, a ambas profundidades. La mayor cobertura la obtuvo en la Costa El presidente. Su cobertura relativa fue de 2.1%. BOLD: MCM1154-21.

Plakortis angulospiculatus: Plano convexo o elíptico con hábitos incrustantes. La superficie es liza con hoyuelos uniforme, ósculos conspicuos a ras de la superficie y retraídos en etanol. La consistencia es comprimible. Se avisto *in vivo*, color marrón claro con parches marrón oscuro o verdoso, en la parte interna es de marrón más claro, al acercarse al pinacodermo se torna purpura. Espículas diodos curvos o casi rectos en la mayoría con bordes afilados y centro doblado irregularmente, así como triodos irregulares de forma variable, empaquetadas densamente sin orientación. Se contempló al organismo sobre sustrato rocoso. Esta especie tuvo un único registro en la costa El Presidente, registrada a una profundidad de 0-1 m. Su cobertura relativa fue de 0.09%.



Figura 17.3. Especies de esponjas observadas en la costa Oeste de Cozumel.

Análisis de ADN

A través de un análisis BLAST y considerando la longitud de las secuencias obtenidas; fue posible verificar la clasificación de las especies *A. tubulata*, *Spirastrella* sp., *X. muta* y *Ch. mucula*, debido a que, de éstas, se obtuvieron secuencias mayores a los 650 pb y se asemejaron con secuencias previamente existentes en el banco de datos de Bold Systems (señaladas con color rojo en Figura 17.4). De tal manera que este análisis ayudó a resolver algunas dudas sobre la ubicación taxonómica de estas especies.

Aunque de *A. crassa*, también se logró aislar el gen de la fracción de un ejemplar, la longitud de la secuencia obtenida fue menor a los 500 pares de bases. Probablemente por ello, se alineó con el grupo de *V. reisiwigi*; sin embargo, hipotetizamos que este resultado es erróneo, debido a que el tamaño de la secuencia obtenido fue muy bajo y probablemente sólo se alineó con este grupo, porque ambas especies pertenecen a la misma Familia (Aplysinidae), entonces sugerimos sostener la clasificación de *A. crassa* considerando la evidencia morfológica, macro y microscópica descritas aquí.

Biomonitoreo

Los siguientes resultados se sintetizan en la Tabla 17.2. La playa El Presidente tuvo una riqueza específica mayor, seguida de Caletita y después por El Cozumeleño. *Agelas tubulata*, *Ch. nucula*, *P. angulospiculatus*, *X. muta* y *V. reiswigi* se registraron exclusivamente en “El Presidente”; mientras que *A. queenslandica* y *N. digitalis* sólo en Caletita. En el Cozumeleño no se registraron especies de Demospongiae exclusivas, al compararse con las otras dos playas rocosas analizadas (Tabla 17.2).

Las especies con coberturas relativas entre el 3 al 10% fueron *I. felix*, *S. aurea* en El Cozumeleño; pero *V. rigida* presentó un porcentaje de cobertura del 61% en el mismo lugar. En El Presidente, se observaron hasta cuatro especies con porcentajes de cobertura en el transecto de entre 5 a 18% (*Ch. nucula*, *Spirastrella* sp., *V. reiswigi*, *I. felix* y *V. rigida*), pero *A. crassa* presentó una cobertura de hasta 40% en el transecto completo.

En Caletita, la mayoría de las coberturas relativas de las especies presentes fueron menores; oscilando entre 2 a 3 % en especies como *I. strobilina* y *N. digitalis*; los porcentajes de cobertura más elevados los presentaron *S. aurea* y *A. crassa*. Aunque en el Presidente y Caletita *A. crassa*, presentó amplias coberturas, en El Cozumeleño, la misma especie presentó una cobertura relativa tan baja de 1%.

El porcentaje de cobertura total/cuadrante osciló entre 0 a 1.42% en el Cozumeleño; fue de 0 a 3.22% en Caletita y fue tan amplio como de 6.06 a 40.8% de cobertura en cuadrantes de 1 m² en el Presidente.

Debido a la mayor riqueza específica y a la mayor equitatividad en la cobertura de las especies observadas, el mayor índice de Shannon se encontró en la playa el Presidente; seguido de Caletita y finalmente, el menor índice de diversidad se encontró en la playa el Cozumeleño. En cambio, la mayor dominancia; se observó tanto en Caletita, como en el Cozumeleño (0.44); mientras que la menor dominancia se encontró en el Presidente (0.22).

Tabla 17.2. Porcentaje de cobertura de especies analizadas de costas rocosas de Cozumel.

Especies	Transectos de "El Cozumelero"						Transectos de "El Presidente"						Transectos de "Caleta"								
	1	2	3	4	5	C. R.	1	2	3	4	5	6	7	C. R.	1	2	3	4	5	6	C. R.
<i>A. tubulata</i>	-	-	-	-	-	0	-	1.7	-	-	4.18	-	-	0.049	-	-	-	-	-	-	0
<i>A. crassa</i>	0.17	-	-	-	-	0.01	3.16	0.14	38.84	-	-	-	6.4	0.401	0.03	0.2	1.48	2.84	3.5	-	0.6592
<i>A. queenslandica</i>	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	0	0.06	-	-	-	-	-	0.0049
<i>S. aurea</i>	0.97	-	-	-	-	0.092	-	1.69	-	-	-	-	-	0.014	0.51	-	-	-	1.6	-	0.173
<i>I. strobilina</i>	0.28	0.36	-	1.54	-	0.205	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	0.26	-	-	0.0212
<i>N. digitalis</i>	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0.42	-	0.068	-	-	0.0388
<i>Ch. nucula</i>	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0.1	9.48	-	0.079	-	-	-	-	-	-	0
<i>Spirastrella sp.</i>	-	-	0.06	-	-	0.01	5.16	1.11	1.99	0.14	0.23	0.74	2.16	0.095	-	-	-	0.06	-	-	0.0049
<i>V. reisiwigi</i>	-	-	-	-	-	0	6.6	-	-	-	-	-	-	0.055	-	-	-	-	-	-	0
<i>I. felix</i>	-	0.32	-	-	-	0.031	-	-	-	1.03	0.59	1.43	3.59	0.055	0.98	0.08	0.13	-	-	-	0.0974
<i>P. angulospiculatus</i>	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	0.62	-	-	0.005	-	-	-	-	-	-	0
<i>V. rigida</i>	-	-	-	-	6.04	0.616	-	-	-	-	-	-	-	22	0.182	-	-	-	-	-	0
<i>X. muta</i>	-	-	-	-	-	0	-	-	-	4.89	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	0
Cobertura por cuadrante	1.42	0.68	0.06	1.54	6.04	0	14.92	4.64	40.83	6.06	8.67	11.65	34.16		1.58	0.7	1.61	3.22	5.1	0	
Cobertura absoluta por transecto	9.74						120.93						12.21								
<i>H'</i>	1.07						1.81						1.14								
<i>D</i>	0.44						0.22						0.44								

Se muestra los porcentajes de cobertura por cuadrante de cada especie (m²), la cobertura absoluta de las esponjas por transecto, la cobertura relativa/especie/playa (C. R.) la diversidad de Shannon-Weaver (H') y la dominancia de Simpson (S) por transecto. Fuente: Elaboración Propia.

Se muestra los porcentajes de cobertura por cuadrante de cada especie (m^2), la cobertura absoluta de las esponjas por transecto, la cobertura relativa/especie/playa (C. R.) la diversidad de Shannon-Weaver (H') y la dominancia de Simpson (S') por transecto. Fuente: Elaboración Propia.

Discusión

² El Dr. Gerardo Green fue el primer mexicano en realizar investigación en materia de biodiversidad del Filo Porifera en el país (Carballo *et al.*, 2014). En 1986 Green realizó estudios taxonómicos, en las costas rocosas de islas de la Bahía de Mazatlán Sinaloa, generando la clasificación de 11 especies de esponjas, así como la sistematización de características físicas de la zona (Green y Gómez, 1986).

Aunque es un grupo con una diversidad potencial elevada en áreas costeras tropicales; aún se consideran como escasas, las publicaciones relacionadas con la clasificación de esponjas en Quintana Roo (Maas-Vargas y Bahena-Basave, 2008), así también poco se ha evaluado su uso como indicadores ambientales de la línea costera en el estado. Adicionalmente a esto, constituye uno de los grupos con menor cantidad de secuencias genéticas conocidas para el planeta, con apenas el 0.4% del total (www.boldsystems.org).

Las esponjas marinas, se reconocen como uno de los grupos de invertebrados con más dificultad de estudio por su plasticidad fenotípica y por la falta de sistematización en el conocimiento de caracteres diagnósticos (Schmitt *et al.*, 2005). Por ello, es fundamental contribuir a la clasificación de las esponjas complementando toda la información que se obtiene de los organismos vivos y de su material esquelético, con su información genética; para transitar hacia una taxonomía que cada vez integre mayor cantidad de evidencia.

² Ocasionalmente dos especies diferentes de esponjas pueden parecer la misma si se desarrollan en el mismo ambiente, incitando al desarrollo de enfoques moleculares (Ariza Pérez, 2017; Erpenbeck *et al.*, 2007). Hasta donde tenemos conocimiento; con este trabajo por primera vez, se contribuye con la información genética almacenada en el gen COI, de esponjas habitantes de Cozumel, Quintana Roo. En este trabajo, ² la información de secuencias de ADN está apoyada con información esquelética y morfológica, con lo que se generó un mejor sustento en la clasificación de las especies.

² En acuerdo con la propuesta de Ariza-Pérez (2017); también se sugiere realizar análisis de BLAST para integrarse a otros métodos de clasificación, tales como caracteres morfológicos y conteo de espículas para una correcta identificación, en algunos casos los resultados se corroboran mediante características morfológicas externas en bases de datos y la ubicación geográfica. Sin embargo, también se ha empezado a tomar en cuenta el acomodo de las

espículas en el esqueleto en conjunto con la disposición del sistema acuífero sustentando los datos con secuencias de ADNr 18S y 28S (Voigt *et al.*, 2012; Voigt y Wörheide, 2015).

Adicionalmente al hecho de que la óptima clasificación de las esponjas, podría fundamentar observaciones de tipo ecológico realizables en el área costera, es posible usar la información genética, no sólo para facilitar la clasificación (Ariza-Pérez, 2017); sino también para determinar si existe especiación críptica (Pöppe *et al.*, 2010; León-Pech, 2015), o escudriñar las relaciones filogenéticas de estos organismos en el Caribe (Erpenbeck *et al.*, 2007); o incluso re-valorar el uso de las evidencias morfológicas, como indicadores evolutivos en el grupo (Cárdenas *et al.*, 2011).

Por otra parte, tomando en consideración el uso de las esponjas desde un punto de vista ecológico; es importante señalar que Carmona-Islas *et al.* (2019) encontró mayor riqueza específica en sitios del Golfo de México que se encontraban entre 1 a 15 km de la costa; mientras que los sitios con menor riqueza de esponjas e invertebrados benthicos fue junto a la línea de costa, inventariando solo dos especies. Contrario a esto, y de manera afortunada, podemos afirmar que, en la línea de la Costa Oeste de Cozumel, aún se encuentran como mínimo 6 especies de esponjas, distribuidas en las tres zonas de estudio.

El autor previamente mencionado, relaciona la baja riqueza de éstos organismos bentónicos en la línea de costa, al mayor efecto antrópico pues aparentemente puede ser más altamente impactada, por el crecimiento de las zonas urbanas y portuarias con un importante aporte de sedimentos.

Romero *et al.* (2013) sugiere que para el desarrollo diverso y equitativo de esponjas marinas deben existir condiciones ideales tales como la presencia de fuertes corrientes, baja turbidez, poca influencia de oleaje y salinidad óptima; más, sin embargo, también menciona que existe un patrón dominante de especies incrustantes en zonas con altos niveles de oleaje, estos resultados se manifiestan en nuestras zonas de estudio debido a que presentan una influencia constante de oleaje, por lo que las especies de mayor cobertura en el área estudiada son las de hábitos incrustantes siendo las que dominan el sustrato, a diferencia de las esponjas expuestas. Romero *et al.* (2013) alude que las escasas corrientes y el poco dominio de oleaje dificulta la remoción de sedimentos que generalmente se depositan sobre las esponjas y corales, situación que baja la capacidad de filtración de las esponjas marinas, retardando su crecimiento y origina un mayor gasto energético.

En zonas como las de este estudio, específicamente Caletita y el Presidente que presentan costas de acantilado de 3-4 m de profundidad, y poseen un oleaje constante, la remoción de arena sobre esponjas situadas en fondo marino del acantilado suele ser difícil, porque los organismos bénticos llegan a cubrirse casi en su totalidad por arena, y la poca corriente del fondo marino logra descubrir pocas áreas en que aún habitan las esponjas (observación personal). Este tipo de problemas no afecta en gran medida a las esponjas incrustantes, debido que predominan en las paredes verticales situadas entre 0-3 m profundidad y no directamente en el fondo arenoso. Resultados similares presentó el estudio de Vargas (2019) sobre la preferencia de las esponjas marinas a los sustratos rocosos y semiconsolidados o duros (dunas marinas) a pesar de estar en un ambiente dominado por sedimento, favoreciendo a la riqueza de especies y la supervivencia de las misas.

Además, las esponjas incrustantes observadas, en comparación con las esponjas expuestas aparentemente son más resistentes a los embates de los huracanes, según lo expuesto por Carballo *et al.* (2014). Pues bien, las presiones ambientales, particular de los biotipos arrecifales de esta región, pueden influir en la estructura y composición del grupo. Estos fenómenos no afectan a las esponjas incrustantes, pues el fracturarse por una corriente intensa es un suceso poco usual, debido a que estas esponjas tienen una forma aplanada que cubre el sustrato.

Entonces, en las profundidades analizadas aquí (entre 1 a 3 m) se observó el predominio de especies sometidas a una tensión constante producida por el oleaje y la iluminación, dado que a poca profundidad los rayos solares son más intensos y en esta zona subsisten especies bien adaptadas, capaces de aprovechar al máximo los recursos disponibles pudiendo explicar el predominio de especies incrustantes o rastreras (Núñez Flores *et al.*, 2010). Sin embargo, la riqueza específica, diversidad y equitatividad observadas en esta zona del Caribe, fueron mayores a las conocidas para áreas con condiciones estructurales semejantes del Golfo de México.

Por otro lado, Pawlik *et al.* (2008) determina que la abundancia se ve favorecida en especies que no se defienden químicamente, debido que esta defensa requiere de un gasto energético y este se obtiene a cambio del crecimiento y la reproducción. Entre las especies encontradas en este estudio, señaladas como que se defienden químicamente se encuentran *I. estrobilina*

e *I. felix*, lo cual probablemente es un factor que explicaría la baja cobertura de especie/cuadrante observada en estas dos especies.

López (2013) menciona que los indicadores ecológicos en estudios con esponjas han tenido éxito al discriminar las zonas más contaminadas de las no contaminadas. A causa de la contaminación a nivel de comunidad la cobertura de las esponjas se ve disminuida, dado que este factor favorece a especies resistentes, pero provoca reducción de sus densidades (cobertura).

Esto se refleja en nuestros resultados, en el caso de playa Caletita la cual es conocida por contar con alta influencia de visitantes, así como una terminal marítima cercana en constantes maniobras. Además, Sánchez y Pinto *et al.* (2015) encontraron que, dos afluentes de aguas que desembocan directamente en Caletita se encuentran conectados por un pasaje subterráneo de 186 m, hacia un sistema que influye con descargas de materia orgánica disuelta, nutrientes y sedimentos hacia la línea de costa.

Por lo tanto, hipotetizamos que, a escala local los mencionados factores pueden contribuir a la menor riqueza y diversidad de esponjas en Caletita. A diferencia de la Costa el Presidente, en donde se tiene mínima influencia de personas y una desembocadura de agua de lluvia, procedente de la pista del aeropuerto internacional de Cozumel. Cabe señalar que aproximadamente a 598 m de distancia se encuentra un Puerto de Abrigo, el cual puede albergar aproximadamente 160 embarcaciones pequeñas y medianas, y a través de ellas se podrían generar otros agentes que pudiesen causar algún impacto, aún no evaluado.

Chilma-Arias (2018) sugiere que las esponjas de agua dulce, así como las marinas son indicadores ambientales, por la necesidad de la búsqueda de sustrato, así como la de un ambiente con abundante carga de oxígeno, siendo susceptible a los cambios ambientales, así como una poca adaptación en ambientes contaminados o con mucha carga sedimentaria.

Contar con una buena cantidad de información sistematizada, referente a la estructura básica de estas comunidades en la línea de costa (o los cambios que sufriría detectados a través de monitoreos) es fundamental en áreas con influencia urbana, debido al rol de las Demospongiae en las zonas que habitan, ya que juegan un papel como alimento para otros organismos bénticos, guarida, pueden mostrar la erosión de los arrecifes y por su participación en los procesos biogeoquímicos (nitrógeno, carbono y sílice); así como por lo rápido de sus respuestas en función de cambios en el ambiente.

Referencias

- Aguirre, I. O. (2012). Actividad biológica de esponjas y su relación con la complejidad de la comunidad bentónica en la bahía de la paz, B.C.S., México [Tesis de Maestría]. Instituto Politécnico Nacional.
- Ariza Pérez, f. I. (2017). Análisis metagenómico de los microbiomas asociados a esponjas marinas del Parque Nacional Cabo Pulmo (BCS), dirigido a la búsqueda de genes involucrados en la síntesis de policétidos y péptidos no ribosomales con potencial actividad antimicrobiana [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Campos-Vázquez, C., Carrera-Parra, L.F., González, N.E. y Salazar-Vallejo, S.I. (1999). Criptofauna en rocas de Punta Nizuc, Caribe mexicano y su utilidad como biomonitor potencial. *Revista de Biología Tropical*, 47 (4), 799-808.
- Cárdenas, P., Xavier, J.R., Reveillaud, J., Schander, C. y Rapp, H.T. (2011). Molecular Phylogeny of the Astrophorida (Porifera, Demospongiae) Reveals an Unexpected High Level of Spicule Homoplasy. *PLoS ONE*, 6(4), 1-8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018318>
- Carballo, J. L., Gómez, P., y Cruz-Barraza, J. A. (2014). Biodiversidad de porifera en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 143-153. <https://doi.org/10.7550/rmb.32074>
- Carmona-Islas, C., Morales-García, A., Hernández-Mendiola, J. A., Gama-Villasana, H., Colmenares-Campos, C. y Cruz-Gutiérrez, R. (2019). Invertebrados bentónicos en diez arrecifes del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1-10 <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2741>
- Chilma Arias, A. F. (2018). Análisis filogenético de las esponjas de agua dulce de Colombia mediante ADN mitocondrial COI. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de los Andes.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2011). *Zonas Económicas Exclusivas de México*. Limite Nacional. Escala 1: 250 000.
- Díaz, M. y Zea, S. (2008). Distribución de esponjas sobre la plataforma continental de La Guajira, Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Colombia.

- Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37 (2), 27-43.
<https://doi.org/10.25268/bimc.invemmar.2008.37.2.189>
- Erpenbeck, D., Duran, S., Rützler, K., Paul, V. J., Hooper, J. N. y Wörheide, G. (2007). Towards a DNA taxonomy of Caribbean demosponges: a gene tree reconstructed from partial mitochondrial CO1 gene sequences supports previous rDNA phylogenies and provides a new perspective on the systematics of Demospongiae. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 87(6), 1563–1570.
<https://doi.org/10.1017/S0025315407058195>
- Gili, J. M. (1998). Ecología trófica de algunas especies de suspensívoros bentónicos sésiles en el mar de Weddel. Un programa CS-EASIZ.
- González M. A. y Arenas-Castro H. (2017). Recolección de tejidos biológicos para análisis genéticos. D. C., Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, DC, Colombia. 33 pp.
- González-Solís, A. y Torruco, D. (2015). Fauna y flora intermareal de las costas rocosas de Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, 63(4), 943-958. doi: [10.15517/RBT.V63I4.16416](https://doi.org/10.15517/RBT.V63I4.16416).
- González-Solís, A., Torruco, D., Torruco Gonzales. A. D. y Ordaz Bencomo. J. F. (2017). Ambientes Extremos Amenazados: las costas rocosas. CONABIO. *Biodiversitas*, 130, 7-11.
- Green, G. y Gómez, P. (1986). Estudio taxonómico de las esponjas de la bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 13(3), 273-300.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2017). Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825095130.pdf
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2019). Marco Geoestadístico. Estados Unidos Mexicanos. Escala 1:4 000 000.
- León-Pech, M. G., Cruz-Barraza, J. A., Carballo, J. L., Calderón-Aguilera, L. E., y Rocha-Olivares, A. (2015). Pervasive genetic structure at different geographic scales in the

- coral-excavating sponge *Cliona vermifera* (Hancock, 1867) in the Mexican Pacific. *Coral Reefs*, 34, 887-897. <https://doi.org/10.1007/s00338-015-1316-9>
- López, L. B. (2013). *Características de las comunidades de esponjas como bioindicadores potenciales de contaminación en arrecifes coralinos* [Tesis Doctoral]. Universidad de La Habana. Cuba.
- Maas-Vargas, M.G. y Bahena-Basave, H. (2008). Esponjas marinas (Porífera: Demospongiae). En L.M. Mejía-Ortíz (ed.), *Biodiversidad Acuática de la Isla de Cozumel* (pp. 151-161). México: Plaza y Valdés, Universidad de Quintana Roo.
- Núñez Flores, M., Rodríguez-Quintal, J. G., y Cristina Díaz, M. (2010). Distribución de esponjas (Porífera) a lo largo de un gradiente de profundidad en un arrecife coralino, Parque Nacional San Esteban, Carabobo, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 58, 175-187.
- Pawlik, J. R., Henkel, T. P., McMurray, S. E., López-Legentil, S., Loh, T. L., y Rohde, S. (2008). Patterns of sponge recruitment and growth on a shipwreck corroborate chemical defense resource trade-off. *Marine Ecology Progress Series*, (368) 137-143.
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31 (8), 583-590.
- Pöppe J., Sutcliffe P., Hooper JNA., Wörheide G. y Erpenbeck D (2010). COI Barcoding Reveals New Clades and Radiation Patterns of Indo-Pacific Sponges of the Family Irciniidae (Demospongiae: Dictyoceratida). *PLoS ONE* 5 (4), 1-6. doi: 10.1371/journal.pone.0009950
- Romero, M. A., Villamizar, E. y Malaver, N. (2013). Estructura de la comunidad de esponjas (Porífera) en tres arrecifes del Parque Nacional Morrocoy, Venezuela y su relación con algunas variables ambientales. *Revista de Biología Tropical*, 61(3), 1229-1241.
- Ruíz Pinzón, C. A. (2009). *Aspectos ecológicos de la población de la esponja Discodermia dissoluta (Porífera: Demospongiae: Lithistida) en el Caribe colombiano* [Tesis de licenciatura] Universidad de Bogotá.
- Sánchez y Pinto, I. A., Cervantes-Martínez, A., Herrera, R. A. G., Campos, M. E. V. y Gutiérrez-Aguirre, M. A. (2015). Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México. *Ingeniería*, 19(1), 1-12.

- Schmitt, S., Hentschel, U., Zea, S., Dandekar, T., y Wolf, M. (2005). ITS-2 and 18S rRNA gene phylogeny of Aplysiniidae (Verongida, Demospongiae). *Journal of Molecular Evolution*, 60(3), 327-336. doi: 10.1007/s00239-005-6111-8
- STUDOCU (2017). Practica 2 Técnica para aislar Espículas de Esponjas. Manuel de actividades experimentales. Recuperado en <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-del-litoral/biologia/trabajos-practicos/practica-2-tecnica-para-aislar-espículas-de-esponjas/2976625/view>.
- SECTUR, Secretaria de Turismo (2014). Agendas de competitividad de los destinos turísticos de México 2013-2018. Cozumel, Quintana Roo. Recuperado en <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2015/02/PDF-Cozumel.pdf>.
- Torruco Gómez, D. y Gonzales Solís, A. (2010). Invertebrados. Diversidad faunística. Las esponjas y su importancia. En: Durán R. y M. Méndez (Eds). 2010. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. (pp. 202-203). CICY.
- Ugalde, D., Gómez, P. y Simoes, N. (2015). Marine sponges (Porifera: Demospongiae) from the Gulf of México, new records and redescription of *Erylus trisphaerus* (de Laubenfels, 1953). *Zootaxa*, 3911(2), 151-183. doi: [10.11646/zootaxa.3911.2.1](https://doi.org/10.11646/zootaxa.3911.2.1)
- Vargas, B. J. A. M. (2019). *Estructura de la comunidad de poríferos en el arrecife "los picos" en Veracruz, México* [Tesis de maestría]. Universidad Veracruzana.
- Vega J. C. (2012). *Composición y afinidades biogeográficas de esponjas (Demospongiae) asociadas a comunidades coralinas del Pacífico mexicano* [Tesis de doctorado] Instituto Politécnico Nacional.
- Vassallo, A., Dávila, Y., Luviano, N., Deneb-Amozurrutia, S., Vital, X. G., Conejeros, C. A., Vázquez, L. y Álvarez, F. (2014). Inventario de invertebrados de la zona rocosa intermareal de Montepío, Veracruz, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(2), 349-362. doi: 10.7550/rmb.42628
- Voigt, O. y Wörheide, G. (2015). A short LSU rRNA fragment as a standard marker for integrative taxonomy in calcareous sponges (Porifera: Calcarea). *Organisms Diversity and Evolution*, 16(1), 53-64. doi: 10.1007/s13127-015-0247-1
- Voigt, O., Wulffing E. y Wörheide, G. (2012). Molecular Phylogenetic Evaluation of Classification and Scenarios of Character Evolution in Calcareous Sponges (Porifera, Class Calcarea). *PLoS ONE* 7(3), 1-16. doi: 10.1371/journal.pone.0033417

Acerca de los autores

José Guadalupe Chan Quijano

Sus líneas de investigación convergen en las ciencias de la remediación y restauración de ambientes contaminados; análisis de conflictos socioambientales generados por la contaminación ambiental; gobernanza ambiental, gestión territorial y desarrollo regional; manejo sostenible de los recursos naturales y florística; actores sociales, políticas públicas y sociología ambiental para la sostenibilidad y criminología verde. Doctor en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable y Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural por El Colegio de la Frontera Sur. Licenciado en Manejo de Recursos Naturales por la Universidad de Quintana Roo. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores y miembro del Sistema Estatal de Investigadores en Tabasco. Cuenta con más de 45 publicaciones entre artículos científicos, de divulgación, nota periodística, capítulos de libros y libros. Ha impartido cursos en licenciatura y posgrado. Árbitro y editor asociado en revistas científicas y de divulgación. Ha dirigido y asesorado tesis de licenciatura y posgrado. Es miembro de sociedades científicas y cuenta con cursos y diplomados enfocados a la temática ambiental y de políticas públicas. Ha participado en más de 60 congresos nacionales e internacionales y en mesas de debate sobre la temática de ambientes contaminados y plagio académico. Además, ha formado parte de comités de congresos, seminarios y reuniones científicas. Actualmente es investigador nivel C en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad.

Mercedes Andrade Velázquez

Egresada de la UNAM con los grados de Física, Maestra y Doctora en Ciencias (Astronomía) con mención honorífica. Realizó estancias en Center for Astrophysics-Harvard, MA; en Ohio State University, Department of Astronomy; en Ministerio Ambiental de China, una estancia laboral en la Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional en México, donde desarrolló el manejo de los modelos globales del clima del IPCC-AR5 y aplicación del método Fiabilidad de Ensamble Ponderado. Se desempeñó en la divulgación de la Ciencia en la Dirección General de Divulgación de la Ciencia en la UNAM con los proyectos de “Videos e Imágenes de Satélite” y “Comunicación y Divulgación del tema de Cambio Climático fase

I”, además participó en la Reunión de Expertos en Comunicación de Cambio Climático del Panel Intergubernamental ante Cambio Climático (IPCC) en Oslo. Realizó otras estancias en España, Chile, Bolivia y Costa Rica. Ha tenido participación en diferentes conferencias, congresos y cápsulas, a nivel internacional y nacional. Ejemplos son CORDEX for the Latin American; The 1st International Coastal Resilience Symposium; Congreso Nacional de Cambio Climático. Actualmente labora en el Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad, en Tabasco con el reconocimiento de Investigadora por México. Ha publicado artículos científicos y de divulgación, capítulos de libro y participado en entrevistas. Forma parte del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera como representante de Clima en el Observatorio Costero de Tabasco, también integrante de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos y de la Unión Geofísica Mexicana como representante de sección de Atmósfera. Integrante del Laboratorio Nacional de Conacyt sobre Atmósfera y Clima como enlace del CCGS. Y es coordinadora del Programa Académico IV del CCGS “Clima y Cambio Climático en Socioecosistemas”. Coordinadora del Diplomado “Cambio Global y Sustentabilidad en el Trópico Húmedo de México”. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores con el reconocimiento de investigadora nivel I”. Sus líneas de investigación son climatología aplicada y generación de Escenarios.

Gema Hidalgo Rodríguez

Licenciada en Biología, con Maestría en Biología Marina y Acuicultura, por la Universidad de La Habana y Doctorado en Ecología y Pesquerías con mención honorífica, por la Universidad Veracruzana. Realizó una estancia postdoctoral en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Sisal. Se desempeña como Investigadora de tiempo completo en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, vinculada al Programa Académico: Agua: Ecología Acuática, Manejo Sustentable y Cambio Global. Anteriormente Investigadora en el Instituto de Oceanología, en La Habana. Sus líneas de investigación versan sobre diversidad y ecología de sistemas acuáticos, costero-marinos, con enfoque en la taxonomía de la macrofauna bentónica y la sistemática de anélidos poliquetos como grupo indicador de integridad ecosistémica, en un contexto de transdisciplina. Actualmente, estudia los patrones espaciotemporales de la macrofauna, así como la validación de índices bentónicos, en la generación de bases científicas sólidas y

novedosas para comprender la vulnerabilidad y resiliencia, interacciones, umbrales y trayectorias de los sistemas bajo estudio. Lo anterior constituye un aporte para la construcción de mejores estrategias de gestión de los recursos acuáticos y de políticas públicas. Ha participado como docente del Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, de la Maestría en Ecología y Pesquerías de la UV y del Diplomado que imparte el CCGS. Participa en la dirección de tesis y es miembro de comités de tesis de grado y posgrado, así como asesora de estancias y prácticas profesionales a estudiantes de diferentes universidades. Es autora/coautora de 19 publicaciones científicas, 25 reportes de investigación y 5 bases de datos en repositorios internacionales. Es revisora para revistas ISI internacionales. Ha sido ponente en más de 25 reuniones científicas, participado en talleres especializados, en series documentales y seminarios web. Realizó 5 estancias internacionales en instituciones académicas de cuatro países. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Tabasco, del Consejo Directivo del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera de Laboratorios Nacionales, y del Nodo Científico C66 de la Red Iberoamericana PROPLAYAS en gestión y certificación de playas. Ha participado en 20 proyectos de investigación, 5 de éstos con responsabilidad técnica; así como en más de 15 campañas oceanográficas. Acreedora de 15 apoyos, reconocimientos y becas científicas. Es buzo certificado, con estudios en idiomas inglés, francés e italiano.

Researchgate: <https://www.researchgate.net/profile/Gema-Hidalgo-2>

Francisco Javier Álvarez Sánchez

Obtuvo la Licenciatura en Biología, la Maestría en Ciencias (Biología) y el Doctorado en Ciencias (Biología) en la UNAM. En la docencia, ha participado en 18 talleres en los que el tema ha sido primordialmente la biota, la microbiota y los procesos en el suelo. Ha participado como profesor y como asistente en 15 cursos de actualización. Ha impartido en las Licenciaturas de Biología y Ciencias de la Tierra de la UNAM, así como en el posgrado, 73 cursos semestrales. Actualmente participa en los Posgrados de Ciencias Biológicas y Ciencias de la Sostenibilidad de la UNAM. Ha dirigido 31 tesis de licenciatura, 18 de maestría y dos de doctorado. Ha sido jurado de 53 tesis de licenciatura, 60 de maestría y 27 de doctorado, así como en 41 exámenes de Candidaturas de Doctorado. Como resultado de sus investigaciones sobre ecología del suelo y ecología de la microbiota del suelo, ha

publicado tres artículos en revistas arbitradas, 36 artículos en revistas indizadas, 32 capítulos de libro arbitrados tanto nacionales como internacionales, así como seis libros. Fue parte del Comité Editorial de Tropical Ecology, y ha sido revisor entre otras revistas de Restoration Ecology, Journal of Tropical Ecology, Ecoscience, Letter in Applied Microbiology, Functional Ecology, Plant Biology y Journal of Mountain Science, entre otras. Ha sido miembro del Registro de Evaluadores Acreditados del CONAHCYT. Los resultados de sus trabajos se han presentado en 63 congresos internacionales y 146 en congresos nacionales. Además, ha impartido más de 30 conferencias para público en general y estudiantes de nivel medio-superior. Ha realizado estancias sabáticas y de investigación, en la Oregon State University, la Northern Arizona University, el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, la Academia de Ciencias de Cuba, el Instituto de Ecología A.C., la Universidad Autónoma de Tlaxcala y la Universidad Autónoma de Yucatán. Ha sido Tesorero y presidente de la Sociedad Botánica de México y presidente de la Sociedad Mexicana de la Simbiosis Micorrízica. Fue miembro de la Comisión Dictaminadora del Instituto de Biología de la UNAM y Chair del congreso más importante a nivel internacional de la International Mycorrhiza Society, al traer por primera vez para México The 10th International Conference on Mycorrhiza. Ha sido Coordinador de Investigación y Coordinador General del Departamento de Biología, así como Coordinador del Departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias de la UNAM, en dos ocasiones. Fue Secretario de Integración Académica de la Facultad de Ciencias de 2018 a 2020. En dos ocasiones, ha sido miembro de la terna para elegir al Director de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha sido Director General del Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. de 2021 a 2024, y desde mayo de 2023, Coordinador del Centro de Investigación sobre el Cambio Global de la UNAM.

Martín José Montero Martínez

Tecnólogo del Agua “B” Titular, adscrito a la Subcoordinación de Eventos Extremos y Cambio Climático del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Sistema Nacional de Investigadores: Nivel I. Miembro de redes académicas como: REDESClim (miembro cofundador de 2011-2013), LANRESC y LANCAC. Licenciado en Física por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (1989), M. en C. Geofísica, por la Universidad Nacional

Autónoma de México (1993) y Doctor en Ciencias de la Atmósfera por la Universidad de Arizona, EEUU (1998). Asistente de investigador en la Universidad de Arizona de 1997 a 1998. Estancia posdoctoral en la Universidad de Dalhousie, Canadá (1999). Estancias de investigación en EEUU (2008), Japón (2009) y Australia (2010). Subgerente de Monitoreo Atmosférico Ambiental en el SMN/Conagua de 2011 a 2013. Investigador con más de 25 años de experiencia en aerosoles, climatología aplicada y cambio climático. Ha sido investigador principal y colaborador en más de 30 proyectos científicos. Profesor de asignatura (Climatología Física y Cambio Climático) por más de 20 años en la maestría en Ciencias y Tecnología del Agua del IMTA. Ha dirigido varias tesis dirigidas a nivel licenciatura, maestría y doctorado. Múltiples publicaciones como autor y coautor en revistas indizadas arbitradas, capítulos de libro, coordinador de dos libros, un registro de derecho de autor, múltiples reportes técnicos de proyectos, varias conferencias magistrales y múltiples conferencias nacionales e internacionales. Sus líneas de investigación actuales son: análisis de calidad y homogeneización de datos climáticos, reducción de escala estadística, detección de cambio climático y análisis de proyecciones del CMIP6.

Denise Soares

Doctora en antropología social por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Investigadora del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua desde 2000. Militante en la Red de Género y Medio Ambiente e integrante de la Red Conahcyt de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM). Entre sus líneas de investigación están: gestión social del agua, adopción de tecnologías de agua y saneamiento, derechos humanos al agua y al saneamiento, vulnerabilidad social y de género frente al cambio climático.

Ricardo Víctor López Mera

Licenciatura en Sociología por la UAM-Iztapalapa y con estudios de maestría en Ciencias Sociales por la UACM. Investigador del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua desde 2010. Dentro de los principales temas de investigación sobresalen: conflictos asociados al agua, procesos participativos en la implementación de tecnologías alternativas de agua y saneamiento en comunidades rurales e indígenas, vulnerabilidad social frente a eventos

extremos, estudios sobre comités comunitarios de agua, evaluaciones en apropiación tecnológica y participación en Planes de Justicia asociados al agua, saneamiento y organización comunitaria.

Christopher Lionel Heard

Cuenta con más de cuarenta años de experiencia en investigación en eficiencia energética y comportamiento térmico de edificios y vivienda. Estudió la estimación de necesidades estacionales de calefacción de edificios altos en el Reino Unido. Ha participado en el desarrollo de normas oficiales mexicanas de eficiencia energética de envolturas de edificios no residenciales y de vivienda llevando a cabo determinación de niveles económicos de aislamiento térmico y el impacto de sombreado de ventanas. Participación en el desarrollo de un sistema para diagnóstico energético y económico de programas de ahorro y uso eficiente de energía en Mexicali. Simulación térmica de vivienda y edificios comerciales ligado a consumo horario de energía para investigar el posible impacto del cambio de horario y el ahorro de energía en aire acondicionado. Investigación del impacto potencial de cambio climático sobre el confort térmico vivienda en la Ciudad de México. Investigación sobre la rentabilidad de medidas de aislamiento térmico y el impacto de en diversas regiones de la República Mexicana. Estudio del efecto de las estrategias pasivas para el enfriamiento de edificaciones en climas cálido-húmedos y la aplicación del análisis termodinámico horario de la exergía de la deshumidificación en sistemas de aire acondicionado. Desarrollo de datos climatológicos de años típicos para simulación de confort térmico de vivienda y edificios para climas en la República Mexicana incluyendo: Villahermosa y la Sierra Baja Tarahumara. Se ha participado en el análisis de sistemas de turbinas de gas con enfriamiento de aire a la entrada el compresor tanto en los aspectos termodinámicas de sistemas de refrigeración por absorción como la psicometría del proceso de enfriamiento, el impacto sobre la potencia y la eficiencia de las turbinas. Se aplicó análisis sobre el rendimiento anual hora por hora con datos climatológicos típicos de sitios de uso de turbinas de gas para compresión de gas natural. Actualmente trabaja en el desarrollo de información climática típica para la simulación térmica de edificios y vivienda en la República Mexicana con condiciones actuales y al futuro tomando en cuenta los pronósticos de cambio climáticos indicados en los resultados de la aplicación de los modelos regionales climatológicos.

Sazcha Marcelo Olivera Villarroel

Doctor en economía con especialidad en economía de los recursos naturales por la Facultad de Economía, UNAM, México. Profesor titular “C” Departamento de Teoría y Procesos del Diseño de la División de Ciencias de la Comunicación y Diseño en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Cuajimalpa. Líneas de investigación: recursos y economía ambiental, teorías del comportamiento humano, cambio climático y teoría del valor. Entre sus publicaciones más reciente se encuentran “La sequía: el mal silencioso de la migración centroamericana en el periodo 1990 a 2019”; *“Enclaves of Violence: Organized Crime and Strategic Territories in Mexico”*.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1864-7374>

Candelario Peralta Carreta

Especialista en percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG), con más de 14 años de experiencia en el análisis geoespacial aplicado a la gestión ambiental y ecológica. Su trabajo ha estado enfocado en el estudio de la cobertura arbórea, el cambio de uso de suelo, la fragmentación del paisaje y la morfodinámica fluvial, utilizando sensores remotos y modelado de datos espaciales para comprender las dinámicas ambientales de los ecosistemas tropicales. Es ingeniero agrónomo con especialización en el manejo de agroecosistemas. Realizó una maestría en ciencias ambientales en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), donde participó en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, adquiriendo una sólida formación en análisis espacial y modelación ambiental. Posteriormente, se integró al laboratorio de geomática del Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco, donde lideró proyectos de reconversión productiva en zonas de inundación recurrente, abordando soluciones basadas en datos espaciales para la adaptación al cambio climático. Actualmente, se desempeña como técnico académico en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste A.C. (CCGS) y cursa un doctorado en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales, donde desarrolla una investigación enfocada en la evaluación de atributos comunitarios del bosque tropical mediante tecnología LiDAR aerotransportada. Además, es miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Tabasco y de la Red de Regeneración de Selvas del Sureste. Ha impartido múltiples cursos

y talleres sobre percepción remota, SIG y análisis de datos ambientales, con aplicaciones en conservación de recursos naturales y planificación territorial. Su experiencia en geoinformática lo ha posicionado como un referente en el uso de tecnologías espaciales para el estudio, monitoreo y gestión de ecosistemas tropicales.

Gladis Yanet Martínez Martínez

Doctora en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales, se ha desarrollado como investigadora con una destacada trayectoria académica y profesional. Su formación incluye una Maestría en Ciencias Ambientales y una ingeniería en Agronomía, complementadas con un diplomado en Sustentabilidad y Territorios por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro del Cambio Global y Sustentabilidad en el Sureste A.C. Su experiencia profesional abarca la colaboración en proyectos de ordenamiento ecológico y evaluación de recursos naturales, destacándose en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C. y en el Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Ha desempeñado funciones como docente en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 266. Su formación en Sistemas de Información Geográfica (SIG) le ha permitido participar en estudios sobre caracterización de cuencas, identificación de microrregiones prioritarias y modelado ambiental. Ha trabajado con software especializado como ArcGIS, QGIS y herramientas de modelado como MaxEnt y MetaWin. Además, ha participado en investigaciones enfocadas en la relación entre el cambio climático y las enfermedades emergentes en cultivos, contribuyendo al desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación en zonas tropicales. Ha publicado artículos científicos en revistas arbitradas, abordando problemáticas ambientales como la propagación del Huanglongbing en cultivos de cítricos. Su capacidad analítica y organizativa la han llevado a colaborar en diversos proyectos interdisciplinarios, fortaleciendo su experiencia en investigación aplicada y el diseño de metodologías innovadoras para el estudio de ecosistemas. Entre sus habilidades destacan el liderazgo, el trabajo en equipo y la adaptabilidad a entornos multidisciplinarios, permitiéndole integrarse en diversos grupos de investigación.

Oscar Frausto Martínez

Licenciado y maestro en geografía con especialidad en manejo y conservación de los recursos naturales. Doctor en análisis e investigación espacial por la Universidad Bauhaus – Alemania. Profesor investigador de la División de Ciencias Multidisciplinarias Cozumel de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II, miembro de la Academia de Geografía de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística; miembro de la Cátedra internacional Stephen Olsen en Manejo Integrado de la Zona Costera e integrante de la REDESCLIM del CONAHCYT. Es director del Laboratorio de Observatorio e investigación espacial del SECIHTI (CONAHCYT) y director del observatorio urbano de la Riviera maya (Cancún, Cozumel, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum) el cual está reconocido por ONU – Habitat desde el 2008. Sus líneas de investigación se centran en el diseño, uso y desarrollo de indicadores de sustentabilidad aplicados a diversos contextos territoriales. A partir del 2025 es presidente de la Asociación Mexicana de Estudios sobre Karts A. C.

ORCID: 0000-0002-6610-5193

Linda Rachel Martell Hernández

Estudiante de doctorado en Desarrollo Sostenible por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México. Licenciada en Geografía y Ordenación del Territorio y Maestra en Análisis Espacial y Geoinformática por la Universidad Autónoma del Estado de México. Becaria del Consejo Nacional de Ciencias, Humanidades y Tecnología para estudios de posgrado. Integrante de la Red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos del SECIHTI (CONAHCYT). Sus líneas de investigación son: el manejo integrado de arribazones de sargazo, desarrollo de bases de datos, monitoreo y disseminación de información. Generación de modelos espaciales a través de percepción remota. Su línea de investigación es el estudio de los fenómenos socio-territoriales y los sistemas de información geográfica.

ORCID: 0009-0000-7194-2570.

José Francisco Rodríguez Castillo

Especialista en planificación territorial y ambiental con experiencia en el análisis del karst y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Posee una Maestría en Ciencias

Marinas y Costeras y una Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Su trayectoria incluye 13 publicaciones científicas, entre ellas 11 artículos (3 como autor principal y 8 como coautor) y 2 capítulos de libro, además de participación como ponente en congresos nacionales e internacionales sobre planificación urbana en zonas kársticas y detección de cambios ambientales. Ha trabajado como técnico ambiental de investigación, especializándose en el análisis y procesamiento de datos en SIG, y actualmente se desempeña como consultor ambiental, asesorando en la gestión de impactos ambientales y cumplimiento normativo. También ha sido coordinador de seminarios y congresos académicos en Quintana Roo y en eventos internacionales. En el ámbito educativo, es profesor de asignatura en el Colegio de Bachilleres del Estado de Quintana Roo, Plantel Cozumel, donde imparte clases de ciencias ambientales y tutorías, además de haber sido instructor en talleres de SIG aplicados a Protección Civil y saneamiento costero. Entre sus habilidades destacan el manejo de SIG y cartografía, análisis ambiental, investigación científica, docencia, monitoreo ecológico y gestión de eventos. Su trabajo ha sido reconocido con premios como la Mención Honorífica en la Feria de Ciencias e Ingeniería 2020 y el primer lugar en la Feria de Ciencias e Innovación 2019.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-0591>.

Sergio Esteban De León López

Doctorado en Urbanismo, Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática; Especialista en Cartografía Automatizada, Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Es licenciado en Geografía, todos por la Universidad Autónoma del Estado de México. Es investigador de la Facultad de Planeación Urbana, Universidad Autónoma del Estado de México, México. Consultor internacional y director de la empresa GEOLANDER Consultores – México. Ha ejercido profesionalmente desde el año 2000 en Instituciones como INEGI, INIFAP, SEDESOL, El Colegio Mexiquense A.C., Ayuntamientos y en el sector privado, ejecutando acciones relacionadas con Cartografía, SIG, GPS, Análisis Espacial y Ejecución de Proyectos para el Desarrollo Urbano, la Prevención de la Violencia y la Inseguridad, así como para la elaboración de Atlas de Riesgos Naturales, Evaluación de Vulnerabilidad y Proyectos para el Desarrollo Social, Análisis de Pobreza, y Planificación. En el ámbito Académico, desde el año 2004 ha impartido asignaturas en temas de:

Cartografía, Cartografía Automatizada, SIG Vectorial y Ráster, fundamentos de Teledetección, Geotecnología, así como también varios módulos en Diplomados, Especialidades y cursos diversos, destacando entre ellos “Introducción al uso de drones con fines cartográficos” impartido para Instituciones de Educación Superior y Asociaciones de Profesionales de la Construcción.

ORCID: 0000-0002-9445-0701.

Jonathan Alfredo Solís Sánchez

Estudiante de la licenciatura en Manejo de Recursos naturales de la Universidad autónoma del estado de Quintana Roo. Ha complementado su educación con cursos especializados como el “Curso Introductorio de Aplicaciones Ofimáticas” (2020) y el curso teórico-práctico "Calidad del agua y bioindicadores en sistemas acuáticos marinos, costeros y continentales". Además, realiza sus estancias profesionales en el Laboratorio de Observación e Investigación Espacial, donde también ha sido auxiliar de investigación. Ha colaborado en el proyecto SarTECH para la entrega de material didáctico sobre el sargazo pelágico en escuelas secundarias y en iniciativas de ciencia comunitaria, proyecto a largo plazo en colaboración con Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Universidad Nacional Autónoma de México y University of Southampton, en Inglaterra. Ha organizado y participado en diversos talleres y eventos académicos, como la XII Reunión Nacional RedesCLIM y la VIII Reunión Anual de la Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst (AMEK). Además, ha sido expositor en la muestra "Proyectos Universitarios por un Futuro Sostenible".

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1720-7792>

Fernando Tudela

Arquitecto por la Universidad de Madrid- Sevilla (1963) y Doctor por la Universidad de Sevilla (1975), Fue investigador asociado en el University College de Londres, School of Environmental Studies (1974) e investigador en la Universidad de Portsmouth, Reino Unido. Más adelante fungió como el primer director del Programa LEAD-México en el COLMEX de 1993 a 2001. Como coordinador de asesores de la titular de SEMARNAP, durante el periodo comprendido entre 1996 y 2000, participó en las negociaciones internacionales sobre cambio climático que condujeron al Protocolo de Kioto. Desde entonces se ha especializado

en temas del cambio climático, y políticas públicas sobre medio ambiente. Trabajó como consultor del Banco de Desarrollo para América Latina y la Secretaría de Relaciones Exteriores. Fue vicepresidente del Center for Clean Air Policy (CCAP) Washington y presidente del grupo de expertos de la OCDE y la Agencia Internacional de Energía de 2010 a 2012. Durante el periodo 2003 a 2012 fue Subsecretario de Planeación y Política Ambiental en SEMARNAT. Profesor-investigador en el Centro de Cambio Global y Sustentabilidad del Sureste. Consultor para la CEPAL; Sría Relaciones Exteriores. Miembro de CEIBA A.C. Profesor invitado Universidad Carlos III, Madrid, España (2024). Miembro de la Comisión de Revisión del texto sobre Biodiversidad y Cambio Climático, Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina de los Estados Unidos. Autor y coautor de múltiples publicaciones, ha recibido distinciones de la Universidad de Sevilla (Premio Extraordinario de Doctorado), del Ministerio de Educación de España (XXIX Premio Nacional de Estudios Profesionales), de la Universidad Autónoma Metropolitana, México (Premio a la Investigación, Primer Concurso Cuatrienal), y del gobierno del estado de Tabasco (Premio Estatal de Ecología 2019). Sus principales áreas de interés son las políticas públicas sobre medio ambiente, la gestión urbana, las negociaciones internacionales sobre cambio climático, las estrategias de mitigación y adaptación, los sistemas complejos, la interdisciplina y la historia ambiental.

Julia Carabias Lillo

Bióloga por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y Profesora de Carrera de esta institución desde 1981 a la fecha. Su trabajo de investigación se ha centrado en diversos temas ambientales, en particular en la regeneración de selvas tropicales, restauración ambiental, manejo de recursos naturales, ecología y sistemas productivos, cambio global, pobreza y medio ambiente y política ambiental. Ha producido numerosos artículos científicos y ha sido coautora de varios libros, entre los que destacan: Ecología y Autosuficiencia Alimentaria; La producción Rural en México: Alternativas Ecológicas; Manejo de Recursos Naturales y Pobreza Rural; Agua, Medio Ambiente y Sociedad; Cambio climático; Conservación y desarrollo sustentable en la Selva Lacandona. Ha impartido cursos en licenciatura y posgrado de manera ininterrumpida desde 1977. Fue presidenta del Instituto Nacional de Ecología en 1994 y titular de la Secretaría de Medio

Ambiente, Recursos Naturales y Pesca de 1994 a 2000. Actualmente dirige el programa de Conservación, Manejo y Restauración de Recursos Naturales en la Selva Lacandona, Chiapas. Ha formado parte de diversas comisiones multilaterales de las Naciones Unidas y de varios consejos directivos y académicos de organismos nacionales e internacionales. Los principales reconocimientos recibidos han sido: el Premio Getty (2000), otorgado por Word Wildlife Fund; el Premio Internacional Cosmos 2004; el Premio “Campeones de la Tierra” otorgado por el PNUMA (2005); Reconocimiento “Naturaleza, Territorio y Sociedad: Alexander Von Humboldt”, otorgado por la Universidad de Guadalajara (2011) y en 2018 recibió el Premio de Ecología y Medio Ambiente de la Fundación Miguel Alemán Valdés. Ha recibido doctorados Honoris Causa otorgados por: la Universidad Autónoma de Nuevo León (2013); la UNAM (2019); la Universidad Autónoma de Tlaxcala (2020) y la Universidad de Guadalajara (2022). En 2017 el Estado mexicano le otorgó la Medalla Belisario Domínguez y en 2019 ingresó como miembro de El Colegio Nacional.

María Zorrilla

Maestra en Estudios Regionales por el Instituto Mora y Licenciada en Ciencia Política por el ITAM, con estudios de doctorado en la Universidad Nacional Autónoma de México. Entre 1995 y 2003 trabajó como servidora pública en el gobierno federal en distintas en temas de política ambiental. A partir de 2003 se ha desarrollado como investigadora y consultora en temas que vinculan territorio, medio ambiente y sociedad. Ha trabajado en el desarrollo de planes y estrategias de adaptación al cambio climático y biodiversidad tanto a nivel nacional, como regional y estatal y cuenta con varias publicaciones al respecto. Tiene experiencia y publicaciones en análisis de políticas públicas ambientales (suelo, cambio climático y biodiversidad) así como en el desarrollo de procesos participativos para la toma de decisiones. Ha sido consultora para el PNUD, ONU Medio Ambiente, UNICEF, GIZ y BID en temas de políticas públicas ambientales, biodiversidad, análisis de vulnerabilidad social y adaptación al cambio climático. Entre 2012 y 2018 trabajó como investigadora asociada al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, colaborando en investigaciones sobre la Cuenca del Usumacinta en México. Desde 2019 es académica del tiempo completo del Centro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad (CENTRUS) de la Universidad Iberoamericana.

Jonathan V. Solórzano Villegas

Biólogo, Maestro en Ciencias Biológicas y Doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Su investigación se ha centrado en monitorear los bosques tropicales y sus transformaciones mediante sensores remotos, para brindar información que promueva su aprovechamiento sustentable. En particular, ha estudiado la modelación de atributos estructurales y de diversidad de la vegetación, así como la cuantificación de procesos como la deforestación y la degradación forestal. Además, tiene interés por el uso de algoritmos de inteligencia artificial y el desarrollo de código libre. Ha trabajado en instituciones como el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A. C. (CCGS), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Morelia. Adicionalmente, ha impartido diversos cursos en instituciones como la UNAM, la Universidad de Guanajuato, la SELPER y la Redbioma. Actualmente, es investigador asociado en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) y miembro del SNII nivel 1.

Elisa Castro**Manuel Jesús Cach Pérez**

Es biólogo por el Instituto Tecnológico de Conkal, Yucatán, Maestro en Ciencias Biológicas por el Instituto de Ecología A.C. (Xalapa, Veracruz), y Doctor en Ciencias Biológicas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, México. Actualmente es Investigador Titular en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), un centro público de investigación perteneciente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Es responsable del Grupo de Investigación Transdisciplinario Milpa Mesoamericana dentro del Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente de ECOSUR. Su área de interés es la ecofisiología y morfología de plantas cultivadas, así como de plantas creciendo en ambientes extremos tales como epífitas. Le interesa conocer la plasticidad de las plantas ante cambios en el ambiente, es decir, cómo las plantas responden a nivel morfo-fisiológico y/o productivo ante la variación climática producto de fenómenos como el cambio climático,

cambio del uso del suelo o cambio en sistemas de manejo productivo, con especial énfasis en los rasgos funcionales y manejo tradicional de la Milpa. Ha dirigido estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado; ha dictado más de 37 cursos a nivel posgrado, educación continua y participado como profesor en diferentes talleres y diplomados nacionales e internacionales. Cuenta con más de 30 publicaciones científicas entre artículos, libros y capítulos de libro; ha participado en congresos en México y en el extranjero en donde ha presentado tanto resultados de su trabajo, como conferencias magistrales por invitación. Es miembro del comité editorial de *Frontiers in Forests and Global Change*, y ha sido jurado en concursos académicos y evaluador de estancias posdoctorales, así como de propuestas de investigación de la SECIHTI. Es fundador y también responsable del Laboratorio de Ecofisiología Vegetal y Sistemas Agroforestales (LEVSA) de ECOSUR, así como responsable del Laboratorio Nacional de Innovación Ecotecnológica para la Sustentabilidad en su sede de Villahermosa. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de la SECIHTI, así como del Sistema Estatal de Investigadores del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco, México.

María Guadalupe Carrillo Galván

Doctora en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México. Su línea de investigación versa en agrobiodiversidad para la sustentabilidad ecológica y cultural, en particular estudia “la diversidad y evolución de las plantas cultivadas, sus parientes silvestres y el aprovechamiento de los recursos fitogenéticos”. Las áreas que corresponden a su línea de interés son: botánica, etnobotánica, arqueobotánica, etnohistoria, genética, evolución y estadística. Ha impartido cursos a nivel posgrado y educación continua dentro de estas temáticas y ha publicado sus hallazgos en diversas revistas nacionales e internacionales. Es Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores del SECIHTI. Actualmente es Investigadora por México-SECIHTI en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo- CEIBAAS-Colima. Colaboradora del Jardín Etnobiológico La Campana (Colima) y su investigación tiene la meta de incidir a diferentes niveles sociales.

Leonardo Noriel López Jiménez

Es profesionalista de la gestión ambiental, la conservación de la naturaleza, la ecología, el manejo de los recursos naturales y la comunicación ambiental. Es ingeniero ambiental, maestro en ciencias biológicas y especialista en educación ambiental. Cuenta con experiencia en manejo de áreas naturales protegidas, monitoreos biológicos, trabajo comunitario, turismo naturaleza, educación y comunicación ambiental, y colabora en el diseño y formulación de proyectos de restauración ecológica de manglares, pesca responsable, ecoturismo comunitario, planeación territorial y gestión del agua. Cuenta con publicaciones científicas y de divulgación, y es instructor, asesor y docente en diplomados y cursos de licenciatura y maestría.

Adriana Rodríguez Jiménez

Bióloga y educadora popular. Ha sido funcionaria pública, colaboradora en organizaciones de la sociedad civil y consultora independiente. Cuenta con especialidad en planeación estratégica y formación de capacidades para el desarrollo local. En los últimos 10 años, ha colaborado en iniciativas de conservación y manejo de áreas naturales protegidas, como la elaboración de estudios técnicos justificativos, el decreto de nuevas áreas, la educación popular ambiental, y el monitoreo biológico. Desde hace 10 años promueve iniciativas comunitarias de conservación, restauración y manejo sostenible de ecosistemas para la adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres. Actualmente está interesada en integrar el nexo entre migración, medio ambiente y cambio climático en políticas públicas y procesos de adaptación local.

Lucía Sanaphre Villanueva

Doctora en Ciencias Biológicas con especialidad en Recursos Naturales por el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Su trabajo se centra en la ecología funcional, estudiando cómo varía la abundancia de diversas estrategias ecológicas de plantas leñosas en respuesta a gradientes ambientales, la coordinación de rasgos funcionales aéreos y subterráneos, y sus aplicaciones en la restauración ecológica. Actualmente es Investigadora por México de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) adscrita a la Universidad Autónoma de Querétaro UAQ), colaborando con múltiples instituciones nacionales en proyectos sobre vegetación riparia, matorral xerófilo y selva inundable.

Actualmente pertenece al Sistema Nacional de Investigadores nivel I. Cuenta con una amplia trayectoria en investigación y consultoría ambiental, habiendo efectuado un Posdoctorado en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y trabajado en el Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A. C. (CCGS) en Tabasco, en la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Querétaro (SEDESU) y como consultora en planeación ambiental. En su trabajo científico ha estudiado la vegetación en distintos ecosistemas tropicales de México, incluyendo bosques deciduos, subperennifolios y perennifolios. Ha publicado en revistas científicas de alto impacto como Science, Nature Ecology & Evolution, PNAS y Environmental Research Letters, abordando temas como recuperación de bosques tropicales, rasgos funcionales de plantas, y modelos de diversidad con percepción remota. También ha contribuido con capítulos de libros y artículos de divulgación científica. Como revisora de artículos científicos, ha colaborado con revistas como Functional Ecology, Forest Ecology and Evolution, Frontiers in Forests and Global Change, Frontiers in Plant Science, Madera y bosques, y Acta Oecologica. También ha evaluado proyectos para el CONAHCYT (ahora SECIHTI) y ha participado en diversos grupos de trabajo asociados a la elaboración de la estrategia REDD+ para la mitigación del cambio climático en el estado de Tabasco. En el ámbito académico, ha impartido clases y diplomados en la UNAM, El Colegio de la Frontera Sur, CCGS y la UAQ, además de dirigir y co-dirigir tesis de licenciatura y posgrado. Ha participado en diversos congresos nacionales e internacionales, presentando investigaciones sobre ecología funcional, diversidad vegetal, restauración ecológica y ordenamiento territorial.

Ofelia Castillo Acosta

Profesora Investigadora de Tiempo Completo y Titular A, por 38 años en la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Bióloga y Maestra en Ciencias (Biología) por la Facultad de Ciencias de la UNAM. Realizó estudios concluido de Doctorado en Botánica por Colegio de Postgraduados. Profesora del Programa PRODEP, SEI y SNI. Es secretaria de la Academia de Ecología. Integrante del Cuerpo Académico Consolidado de Ecología, Restauración y Manejo de Comunidades Tropicales. Línea de Generación de Conocimientos: ecología, diversidad y manejo de comunidades

tropicales. Ha formado recursos humanos desde licenciatura, maestría y doctorado en investigaciones sobre estructura y composición florística de relictos de selvas, vegetación secundaria derivada de selvas o acahuales del sureste de México, incluyendo los estados de Campeche, Veracruz, Tabasco, Chiapas, Quintana Roo y Oaxaca. Además de colaborar con la vegetación y flora de Guatemala. Coordinadora de la Red Académica sobre Regeneración de Selvas del Sureste de México. Ha publicado artículos en revistas indexadas CONACYT, JCR y capítulos de libros sobre Biodiversidad de Tabasco.

Lilia Gama Campillo

Bióloga, PhD in Philosophy (Botany), es docencia e investigadora en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; pertenece a la Sociedad Botánica de México. Sus líneas de investigación son ecología y conservación del paisaje, cambio global e impactos del cambio climático, dinámica costera. Sus últimas y más importantes publicaciones son “Implicaciones de la potencial elevación del nivel del mar para la población costera de Tabasco, México”; “Potencial incremento de golpe de calor por calentamiento global en Tabasco, México”; *“Seroepidemiological analyses of rabies virus in two procyonid species from La Venta urban park, in Tabasco, Mexico”*.

Coral Jazvel Pacheco Figueroa

Doctora en Ecología y Manejo de Recursos Tropicales. Es docente e investigadora en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; pertenece a la Sociedad Mesoamericana para la Biología y la Conservación, Grupo de Trabajo de Transporte para América Latina y el Caribe (LAGTWG) de la UICN, Grupo de Especialistas de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas de la UICN. Sus líneas de investigación son ecología de carreteras, gestión de áreas protegidas y gestión de vida silvestre. Sus últimas y más importantes publicaciones son “Evaluación de la conectividad local por medio de corredores biológicos en Tabasco”; *“Documentation of a road-killed spectral bat (Vampyrus spectrum) and first report of the species in Tabasco, México”*; “Puntos de alta siniestralidad de vertebrados en la carretera costera de Tabasco”.

Ena Edith Mata-Zayas

Bióloga, MC en Biología Animal, PhD in Biological Sciences. Es docente e investigadora en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; pertenece a la AMMAC y OWSD. Sus líneas de investigación son ecología y conservación en paisajes antropizados, biodiversidad y servicios ecosistémicos en agrosistemas, cambio global y bienestar humano. Sus últimas y más importantes publicaciones son “Biodiversidad asociada al agrosistema de cacao. En El Cacao tabasqueño: de los olmecas a nuestro tiempo”; “Avifauna en monocultivos agroforestales comerciales en Huimanguillo, Tabasco, México”; “Potencial incremento de golpe de calor por calentamiento global en Tabasco, México”.

Juan de Dios Valdez Leal

Doctor en Ecología y Manejo de Recursos Tropicales, es docente e investigador en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; pertenece a la Sociedad Mesoamericana para la Biología y la Conservación, Grupo de Trabajo de Transporte para América Latina y el Caribe (LAGTWG) de la UICN, Grupo de Especialistas de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas de la UICN. Sus líneas de investigación son ecología de carreteras, conectividad, conservación y gestión en áreas protegidas. Sus últimas y más importantes publicaciones son “*Bat community structure in the Tabasco Plain wetlands*”; “*The Composition and spatial-temporal diversity of the aquatic bird community in the "Laguna de las Ilusiones"*”; “Evaluación de la conectividad local por medio de corredores biológicos en Tabasco”.

Eduardo Javier Moguel Ordoñez

Doctor en Ciencias, es docente e investigador en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Sus líneas de investigación son agrometeorología, conservación y gestión ambiental. Sus últimas y más importantes publicaciones son “Biodiversidad asociada al agrosistema de cacao”; “Efecto del cambio de uso del suelo sobre la biodiversidad florística en un mosaico agroforestal del sureste de México”; “*Bat community structure in the Tabasco Plain Wetlands*”.

Hilda María Díaz López

Maestría en Ciencias Ambientales, es técnico académico en investigación en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Participa en el proyecto “Fortalecimiento de las actividades

agroturísticas para promover la conservación de la biodiversidad en los sistemas agroforestales de cacao en el estado de Tabasco” y “Elaboración de los Atlas de peligros municipales del Estado de Tabasco”. Sus últimas y más importantes publicaciones son “Panaquía: propuesta de análisis de la dinámica costera de Tabasco ante el cambio global”; “Implicaciones de la potencial elevación del nivel del mar para la población costera de Tabasco, México”; “Potencial incremento de golpe de calor por calentamiento global en Tabasco, México”.

Karina Esqueda Lara

Investigadora del Centro de Investigación sobre el Cambio Global de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cuenta con una licenciatura en biología por la Universidad de Guadalajara, maestría y doctorado en ciencias por el posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus líneas de investigación son sobre la diversidad y ecología de fitoplancton marino y agua dulce. Cofundadora (2015) y miembro del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANREC). Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, Nivel 1. Ha colaborado en diversos proyectos de investigación disciplinaria (como los financiados por la CONABIO) y multidisciplinarios (SIMORELOS-CONACYT, WWF, FOMIX, FORDECYT, PAPIME y PAPIIT) de la Universidad de Guadalajara, Universidad Autónoma Metropolitana, Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad A.C., Universidad Nacional Autónoma de México. Fue parte del Comité de atención para la mortandad inusual del manatí en Tabasco (2018) y su participación estuvo enfocada a la línea de investigación sobre florecimientos de cianobacterias. Ha participado en seis campañas oceanográficas en el Golfo de California, Pacífico tropical mexicano y Golfo de México. Cuenta con 22 publicaciones entre artículo, libros y capítulos de libro, más de trece ponencias en congresos nacionales e internacionales y más de trece actividades de divulgación científica entre entrevistas de radio y talleres. Participa en la formación de recursos humanos recibiendo alumnos para servicio social, prácticas profesionales y tesis.

Rodrigo M. Villanueva Meza

Sus líneas de trabajo e investigación se centran en la gestión de recursos naturales, impacto ambiental, monitoreo biológico y análisis de datos ambientales. Ha trabajado en evaluación de impacto ambiental y social, restauración ecológica y manejo de biodiversidad, con especial énfasis en la conservación de especies de importancia ecológica y el uso de datos geoespaciales para la toma de decisiones. Es Maestro en Ecología Internacional y Ciencia de Datos Aplicada, con más de 10 años de experiencia en la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelado predictivo y big data en el ámbito ambiental. Ha liderado y participado en proyectos ambientales en México y Canadá, incluyendo la restauración de la Turbera de Johnville en Canadá. Su trabajo ha resultado en la creación de bases de datos ambientales para monitoreo de especies, la identificación de pasos de fauna en proyectos de infraestructura y el desarrollo de estrategias de mitigación ambiental a partir del análisis de datos. Publicó su primer artículo en una revista indexada: "Germinación de tres especies de cactáceas endémicas de México en condiciones asépticas" en Zonas Áridas (2016), y ha registrado colaboraciones en la documentación de 12 especies de mamíferos para la colección biológica del Instituto de Biología - UNAM. Ha participado en diferentes congresos nacionales, presentando investigaciones sobre biodiversidad, conservación y gestión ambiental. Además, cuenta con certificaciones en Python, R, PostgreSQL y Power BI, aplicadas al análisis y visualización de datos ecológicos, lo que le ha permitido integrar herramientas de ciencia de datos en el análisis de ecosistemas y procesos de restauración. Actualmente es Biólogo en Prevention is Creating a SAFE World, donde implementa estrategias de ciencia de datos y monitoreo ambiental para la prevención y mitigación de impactos ecológicos.

Evelia Rivera Arriaga

Doctora en Política Marina, actualmente Profesor Investigador Titular C en el Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Universidad Autónoma de Campeche, miembro del SNI Nivel I. Sus líneas de investigación son la política marina, legislación y manejo costero para el desarrollo sustentable; política y tratados internacionales en materia de océanos; y políticas públicas para el ambiente y el cambio climático. Responsable de la Red Internacional de Mares y Costas desde el 2007. Titular de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno de Campeche del 2009-2015. Presidente del

Scientific-Policy Advisory Committee del Inter-American Institute for the Research of Global Change de 2017-2023 y Autor líder en el Grupo de Expertos para elaborar el Reporte Global Especial sobre Océanos y Criosfera en un clima cambiante para el IPCC de la ONU en 2019. Responsable del proyecto: Islas de calor urbanas en la ciudad costera de San Francisco de Campeche; y del proyecto Percepción sobre el cambio climático en la ciudad de San Francisco de Campeche.

Angelina del Carmen Peña Puch

Doctora en Ecología y Desarrollo Sustentable, Investigador invitado en el Instituto EPOMEX, SNI Nivel candidato. Sus líneas de investigación son gobernanza socioambiental, ciencias de la sustentabilidad y manejo de los recursos naturales. Actualmente lleva el proyecto: “Avances de la gobernanza vertical y horizontal en SSE costeros con presencia de pesca ribereña y turismo comunitario en las ANP de Campeche”. Las publicaciones recientes son: “*Exploring governance challenges in coastal communities through key informant perceptions in Campeche*”; “La perspectiva de SSE en los instrumentos de manejo pesquero de México: riesgos y oportunidades de los permisos de pesca a largo plazo”; “Mitigación y adaptación al cambio climático.

Beatriz Edith Vega Serratos

Doctora en Ingeniería, actualmente Profesora Investigadora Titular B en el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de México, Nivel Candidata. Sus líneas de investigación son, evaluación de riesgos naturales, procesos costeros e hidrológicos energías renovables del océano. Corresponsable de los proyectos Atlas de Peligros y Riesgos Naturales del Estado de Campeche. Publicaciones recientes: “*Risk Management of Extreme Precipitation in Mexico: Building Resilience*”, “*The hydrodynamic performance of a shore-based oscillating water column device under random wave conditions*”, “*Building adaptation to extreme rain effects in San Francisco de Campeche, Mexico*”

Gregorio Posada Vanegas

Doctor en Ingeniería, actualmente Profesor Investigador titular C en el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de México, Nivel I. Sus líneas de investigación son procesos costeros e hidrológicos, evaluación de riesgos naturales y energías renovables del océano. Responsable interno del proyecto: Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano, CEMIE-Océano, así como de los proyectos Atlas de Peligros y Riesgos Naturales del Estado de Campeche, Publicaciones recientes: “*The hydrodynamic performance of a shore-based oscillating water column device under random wave conditions*”, “*Pore Water Chemical Variability and Its Effect on Phenological Production in Three Mangrove Species under Drought Conditions in Southeastern Mexico*”, “*Building adaptation to extreme rain effects in San Francisco de Campeche, Mexico*”.

Yassir Edén Torres Rojas

Doctor en Ciencias Marinas, actualmente Profesor Investigador titular C en el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, y miembro del SNI Nivel I. Sus líneas de investigación son ecología isotópica, ecología y pesquería de recursos marinos, y nicho trófico y su relación con cambio climático. Responsable del proyecto: “Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en otolitos de peces Marinos presentes en el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos, Campeche: Indicadores del Cambio Climático”. Publicaciones recientes: “*General health status of a stranded Tursiops truncatus of the oceanic ecotype in southern Gulf of Mexico, Campeche coasts: a multidisciplinary analysis*”; “Cambios ambientales en una laguna costera tropical: un enfoque de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en una especie residente.”; “Concentración de oligoelementos metálicos (cobre y zinc) en músculo e hígado del cazón picudo del Atlántico (*Rhizoprionodon terraenovae*), capturado en el litoral de Campeche, México”.

Gregorio De la Cruz Uc

Egresado de la Licenciatura en Manejo de recursos Naturales por la Universidad Autónoma de Quintana Roo (UAQROO) en el Campus Cozumel y Técnico en Turismo por parte del Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos en el Planten Playa del Carmen. Es asesor de ventas y administrador de la sucursal Wasser Playa en la empresa Bio Saving Energy S A

PI DE CV desde el 2021 hasta la fecha actual, influyendo con los usuarios en el uso correcto de químicos y accesorios, para el tratamiento y análisis del agua, el óptimo articulado de los sistemas de suavizadores y osmosis inversas. Cuenta con habilidades técnicas en laboratorio, preparación de muestras para análisis, trabajo de campo y de gabinete. Competencia en el uso de software de análisis de datos y Microsoft, pensamiento analítico y destreza en la resolución de problemas, así como trabajo en equipo. Entre sus principales áreas de interés se encuentra la vida marina en general, principalmente en costas rocosas en donde la experiencia es única; la administración; y el asesoramiento en sistemas de tratamiento y equipos de análisis del agua. Ha participado en cursos de especialización, tales como: Introducción al Estudio de Venenos y Antivenenos de Serpientes, accidente ofídico y tratamiento prehospitario, impartido en el Planetario cha'an Káan Cozumel (2017) y Curso de Formación de Monitores Internacionales en Resiliencia ante Desastres, impartido en el Observatorio del Desarrollo de la Universidad de Costa Rica (2018). Entre sus experiencias laborales se encuentra: asociado de seguridad en Sam's Club Playa del Carmen, verificando inventario de mercancía de tecnología, arqueos a caja chica y caja general, así como la seguridad de todo el personal y Auxiliar de Oficina Administrativa en Sam's Club Cozumel, generando el retiro de efectivo de cajas, arqueos a cajas, cierres de póliza de ventas, conciliación bancaria, recepción y entrega de valores, recepción y liberación de facturas.

Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

Bióloga por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Maestra en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, y Doctora en Ecología y Desarrollo Sustentable por El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Chetumal. Se incorporó a la UQROO-Unidad de Ciencias Multidisciplinarias de Cozumel desde agosto de 2005 y previamente laboró como profesora en la Universidad Nacional Autónoma de México y el Instituto Tecnológico de Chetumal. Sus líneas de investigación son ecología y taxonomía del zooplancton de agua dulce y marina; así como estudios de calidad del agua continental e indicadores bióticos. Ha publicado unos 35 artículos en revistas especializadas de impacto internacional, 8 a nivel nacional y 3 libros. Posee experiencia de 20 años como profesora de nivel licenciatura en cursos de Química, Métodos y Técnicas de Investigación, Ecología de poblaciones, Ecología de comunidades, Ecología Tropical y Taxonomía de Invertebrados.

También ha sido docente de nivel Maestría en cursos relacionados con la evaluación y Manejo de Sistemas Acuáticos y Estadística Multivariada en programas de excelencia de la SECIHTI en México. Participé como sinodal o directora de 20 tesis de licenciatura y he dirigido o co-dirigido a 4 tesis de maestría y 2 tesis de doctorado. Entre 2000 al 2024, ha realizado estancias académicas en Estados Unidos, Francia y España y desde 2002 recibió el nombramiento como Investigadora Nacional Nivel 1, en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Cuento también con experiencia de 15 años como participante y/o responsable de proyectos de investigación. Como ejemplo de los proyectos en que ha sido responsable destacan “Estudio geohidrológico y evaluación de fuentes contaminantes del acuífero Norte de Quintana Roo” y “Variación temporal y espacial del zooplancton y descriptores ambientales de sistemas cársticos (cenotes, aguadas) de la región noreste de Quintana Roo (Cozumel), México”, “Diversidad de micro-crustáceos de México y Pantropicales” los cuales he realizado en la UQROO-Cozumel.

Adrián Cervantes Martínez

Tiene una Licenciatura en Biología por la Universidad Nacional Autónoma de México (FES-Iztacala). Maestría en Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo Rural y el Doctorado en Ecología y Desarrollo Sustentable por el Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Fue profesor de Biología en la Facultad de Estudios Superiores (FES-Iztacala) de 1996-98. Actualmente Profesor-Investigador de Tiempo Completo Titular “A” de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, en la División de Ciencias Multidisciplinarias Campus Cozumel desde 2005 a la fecha. Desde el 2006, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII) Nivel I, con otorgamiento de la distinción hasta 2029. Miembro del Registro CONAHCyT (ahora SECIHTI) de Evaluadores Acreditados (RCEA) en el Área 2 “Biología y Química”. Becario del CONAHCyT para estudios de posgrado y beneficiario del Programa de Retención, también del CONAHCyT. Su línea de investigación es la limnología y ecología de sistemas acuáticos continentales, con énfasis en los sistemas acuáticos cársticos de la Península de Yucatán. También ha trabajado con comunidades pesqueras, con proyectos relacionados al desarrollo comunitario, evaluación de recursos pesqueros y comportamiento fisicoquímico del agua en las zonas de pesca y áreas de influencia. Algunos de los proyectos que ha desarrollado son: “Análisis hidrológico de

ambientes cársticos y su influencia sobre la franja costera de Cozumel, Quintana Roo”,
“Estudio hidrológico y calidad de agua subterránea e insular del estado de Quintana Roo”
“Análisis físico y químico de sistemas anquihalinos (cenotes) en la isla Cozumel”
“Evaluación de recursos pesqueros del centro-norte de Quintana Roo. Ha publicado alrededor de 40 artículos científicos nacionales e internacionales, generadas a partir de proyectos de investigación soportados por la institución y con recursos externos del CONAHCyT. Ha dirigido y asesorado aproximadamente a 65 estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado. Finalmente, ha hecho estancias de investigación en Alemania, Bélgica, España, Francia, Estados Unidos, Guatemala, el Salvador, entre otros.

Investigación transdisciplinaria sobre cambio global en el sureste de México

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	ecosur.repositorioinstitucional.mx Internet	7714 palabras — 7%
2	repobiblio.cuc.uqroo.mx Internet	3350 palabras — 3%
3	docplayer.es Internet	2225 palabras — 2%
4	nanopdf.com Internet	545 palabras — < 1%
5	Ileana Espejel. "Resiliencia de socioecosistemas costeros", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2020 Crossref	388 palabras — < 1%
6	cienciaergosum.uaemex.mx Internet	236 palabras — < 1%
7	www.ssoar.info Internet	121 palabras — < 1%
8	"Chapter 300620 Smart Sustainable City", Springer Science and Business Media LLC, 2022 Crossref	101 palabras — < 1%

9 Fabiola Parra Rondinel. "Domesticación en el continente americano Investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2017

98 palabras — < 1 %

Crossref

10 www.researchgate.net

Internet

67 palabras — < 1 %

11 Waddington, Katrina. "The Tides of Change: Scientific Approaches to Estuarine Management in a Changing World.", University of New South Wales (Australia)

34 palabras — < 1 %

ProQuest

12 Nunez Aguilar, Alejandra. "Retos De La politica De adaptacion Al Cambio climatico En Mexico: Un Enfoque Desde La economia politica y El analisis Institucional.", Centro de Investigacion y Docencia Economicas (Mexico), 2021

18 palabras — < 1 %

ProQuest

13 "Los Sistemas Agroforestales de México: avances, experiencias, acciones y temas emergentes", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2020

17 palabras — < 1 %

Crossref

14 "Nuevas territorialidades. Gestión de los territorios y recursos naturales con sustentabilidad ambiental", Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2023

17 palabras — < 1 %

Crossref

15 Andrés Hugo Arias, Sandra Elizabeth Botté. "Coastal and Deep Ocean Pollution", CRC Press, 2020

17 palabras — < 1 %

Publicaciones

-
- 16 [en15dias.com](#) Internet 17 palabras — < 1%
-
- 17 Macarena del Pilar Valenzuela Zubiaur. "Contribución de la Red Chilena de Fab Labs al ecosistema de innovación local para alcanzar el desarrollo sostenible.", Universitat Politècnica de Valencia, 2022 16 palabras — < 1%
Crossref Posted Content
-
- 18 de Takahashi, Alejandra Graciela Martínez Grimaldo. "Relaciones Sociales De Poder y Desarrollo Territorial En La creación De áreas Naturales Protegidas: Caso Del Santuario Nacional Los Manglares De Tumbes (Snlmt).", Pontificia Universidad Católica del Perú - CENTRUM Católica (Peru), 2021 16 palabras — < 1%
ProQuest
-
- 19 "Transitando hacia paisajes resilientes ante incendios forestales: evaluación de los paisajes en las interfaces urbano-forestales del Área Metropolitana de Concepción - Chile", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2023 15 palabras — < 1%
Crossref Posted Content
-
- 20 [archive.org](#) Internet 15 palabras — < 1%
-
- 21 [moam.info](#) Internet 15 palabras — < 1%
-