

**COLECCIÓN
CIENCIAS Y
HUMANIDADES
PARA MÉXICO**

Cambio climático en México

Bienestar humano y ecosistémico

Carolina Ureta Sánchez
Constantino González Salazar
Ángela P. Cuervo Robayo



CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

COLECCIÓN

CIENCIAS Y HUMANIDADES PARA MÉXICO

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) difunde, a través de la colección Ciencias y Humanidades para México, obras de investigación científica y humanística que aportan conocimientos para el desarrollo y bienestar de nuestro país.

Las personas autoras, tanto nacionales como extranjeras, son profesionales y académicas altamente capacitadas en la investigación humanística y científica, dedicadas a la atención de las principales temáticas y los problemas prioritarios de México, así como del contexto latinoamericano.

Con la publicación de estos trabajos se conforma un corpus valioso, accesible para estudiantes de educación superior, así como profesionales especializados y no especializados. De igual forma, el público general podrá completar o enriquecer su formación mediante la lectura y el estudio de sus páginas.

Los libros de esta colección abordan cuestiones fundamentales y de interés, como salud, movilidad, soberanía alimentaria, migración, cambio climático, transición energética, educación, artes y literatura, y contribuyen al diálogo e intercambio de ideas sobre temas actuales que remiten a nuestras realidades.

De esta manera, el Conahcyt y el Fondo de Cultura Económica han unido esfuerzos para hacer de esta colección una muestra significativa de las visiones y los conocimientos que las y los expertos tienen respecto de algunos temas sobresalientes que hoy se debaten en México y América Latina.

Cambio climático en México

Bienestar humano
y ecosistémico

COLECCIÓN
**CIENCIAS Y
HUMANIDADES
PARA MÉXICO**

Carolina Ureta Sánchez
Constantino González Salazar
Ángela P. Cuervo Robayo

Cambio climático en México

Bienestar humano
y ecosistémico



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Instituto
Mora

Primera edición, 2024

Ureta Sánchez, Carolina, Constantino González Salazar y Ángela P. Cuervo Robayo

Cambio climático en México. Bienestar humano y ecosistémico / Carolina Ureta Sánchez, Constantino González Salazar, Ángela P. Cuervo Robayo. -- México : Conahcyt, Instituto Mora, 2024

274 p. : ilus., figuras, tablas ; 23 x 17 cm -- (Colec. Ciencias y Humanidades para México)

ISBN: en trámite

1. Agricultura -- México -- Aspectos ambientales 2. Cambios climáticos -- Salud pública - México 3. Cambios climáticos -- Aspectos sociales -- México 4. Cambios climáticos -- Estudio de casos -- México 5. Políticas ambientales -- México 6. Conservación biodiversidad -- México 7. Ecología 8. Divulgación científica I. González Salazar, Constantino, coaut. II. Cuervo Robayo, Ángela P., coaut. III. t. IV. Ser.

LC QC986.A1C35

Dewey 574.5222 U875c

Distribución mundial



CONAHCYT

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

© Carolina Ureta Sánchez

© Constantino González Salazar

© Ángela P. Cuervo Robayo

© Ilustración de portada: Nancy Sarahí Garduño Hidalgo

© Ilustraciones de interiores: Adriana Corach

D.R. © 2024 Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

Av. Insurgentes 1582, col. Crédito Constructor,

Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940

D. R. © 2024 Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora

Calle Plaza Valentín Gómez Farías 12, col. San Juan Mixcoac,

Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03730

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Esta publicación forma parte del proyecto "Plataformas de difusión científica: narrativas transmedia para México" del Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024.

ISBN: en trámite

Distribución gratuita, prohibida su venta

Impreso y hecho en México

Introducción

Este libro tiene como objetivo mostrar el estado actual del conocimiento sobre el cambio climático, enfocado en tres ejes fundamentales para el bienestar humano y ecosistémico: la seguridad alimentaria, la salud y la conservación de la biodiversidad. Aunque parecieran ser líneas con poco vínculo entre sí, la realidad es que la conservación de los ecosistemas es esencial para lograr la seguridad alimentaria, y sin ella las personas no pueden acceder a una salud digna.

A lo largo de estas páginas se tendrá un mejor entendimiento de qué es el cambio climático antropogénico, se explorará qué lo distingue de otros cambios ocurridos a lo largo de la historia del planeta, y cómo se ha descubierto la importante contribución que tiene la actividad humana sobre el sistema climático de la Tierra. Asimismo, se describirán los conceptos más recientes en la ciencia del clima, los cuales han permitido construir un conocimiento más sólido sobre lo que está sucediendo y lo que podría suceder en el futuro. Además, se presentarán estudios de caso que evalúan alternativas para reducir riesgos potenciales en los sistemas de producción de alimentos, el sistema salud, y la conservación de la biodiversidad.

El primer capítulo está dedicado a la historia climática del planeta Tierra y los diversos cambios que ha experimentado. Analiza también cómo se ha desarrollado la ciencia del clima y cómo han evolucionado los cuestionamientos científicos a lo largo de su historia. Se abordan los conceptos clave de la ciencia del clima que se utilizan en la actualidad, los escenarios de cambio climático que se han propuesto, y los diferentes

instrumentos de política pública y tratados internacionales más relevantes en este ámbito.

El segundo capítulo describe los conceptos relacionados con la seguridad alimentaria, su evolución histórica y en dónde estamos parados como humanidad en torno a este tema. Se analiza la situación internacional y nacional de la agricultura, la ganadería y la pesca en un contexto de creciente variabilidad climática originada por el cambio climático antropogénico. Este capítulo concluye con ejemplos de estudios de caso sobre adaptación al cambio climático, enfatizando la importancia de articular esfuerzos para generar medidas y estrategias de adaptación y mitigación en los tres sectores de producción de alimentos.

El tercer capítulo ofrece un panorama general de los efectos de los cambios ambientales, derivados de las actividades humanas sobre la salud pública, y el desafío que representa evaluar el impacto del cambio climático en la aparición y propagación de enfermedades. En este capítulo se revisan conceptos esenciales sobre los determinantes sociales de la salud y los factores ambientales asociados con la presencia de enfermedades. Se destaca la necesidad de realizar estudios retrospectivos para determinar los factores que han favorecido la manifestación de numerosas enfermedades como epidemias y pandemias, con el fin de sentar las bases para estudios prospectivos en escenarios de cambio climático. Se presenta el conocimiento adquirido sobre un pequeño grupo de enfermedades y su relación con la variabilidad climática, destacando los grandes vacíos de información que existen en México sobre los efectos del cambio climático en la salud pública. Finalmente, se revisan algunas de las nuevas propuestas teóricas y metodológicas para el estudio del cambio climático y la salud, así como las perspectivas dentro de este campo de investigación.

El cuarto capítulo ofrece un panorama general de la biodiversidad de México, identificando las características que lo catalogan como un país megadiverso, así como los factores de presión que ponen en riesgo

el correcto funcionamiento de los ecosistemas y las contribuciones que recibimos de la naturaleza. Además, proporciona una perspectiva de la disciplina de la biología del cambio climático y cómo la investigación desarrollada en México aporta información sobre las respuestas de las especies al cambio climático. Se resaltan también los esfuerzos necesarios para cerrar los existentes vacíos de conocimiento. El capítulo concluye con una reflexión sobre la adaptación y mitigación desde la perspectiva de la biodiversidad, y enfatiza que aún es posible frenar los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad y garantizar así un ambiente saludable para las personas.

1. Historia, antecedentes y conceptos

LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS A LO LARGO DE LA HISTORIA DEL PLANETA

Una estrella, no muy especial, ni muy grande, una estrella como cualquier otra entre millones de estrellas que se han generado y desaparecido en la existencia de nuestro universo tuvo algo especial: a un lado de ella, se formó un planeta cuyas propiedades facilitaron la existencia del agua. Este líquido convirtió al planeta en el único lugar conocido de todo el universo en el que sabemos que existe la vida en la actualidad.

DIRK NOTZ

A pesar de que a inicios de la formación de la Tierra el Sol era un 30% menos brillante que en la actualidad, los océanos no estaban congelados debido a la alta concentración de CO₂ en la atmósfera, que generaba un efecto invernadero en el planeta (Notz, 2020). La Luna también ha tenido, y sigue teniendo, una importante influencia en las condiciones climáticas de la Tierra, al afectar su eje y aumentar las horas de luz y oscuridad en las áreas tropicales. Con el tiempo, su alejamiento ayudó a disminuir las enormes mareas de los océanos (Williams, 2000).

Desde la formación del planeta Tierra, hace aproximadamente 4540 millones de años, se han registrado al menos seis eras de hielo significativas

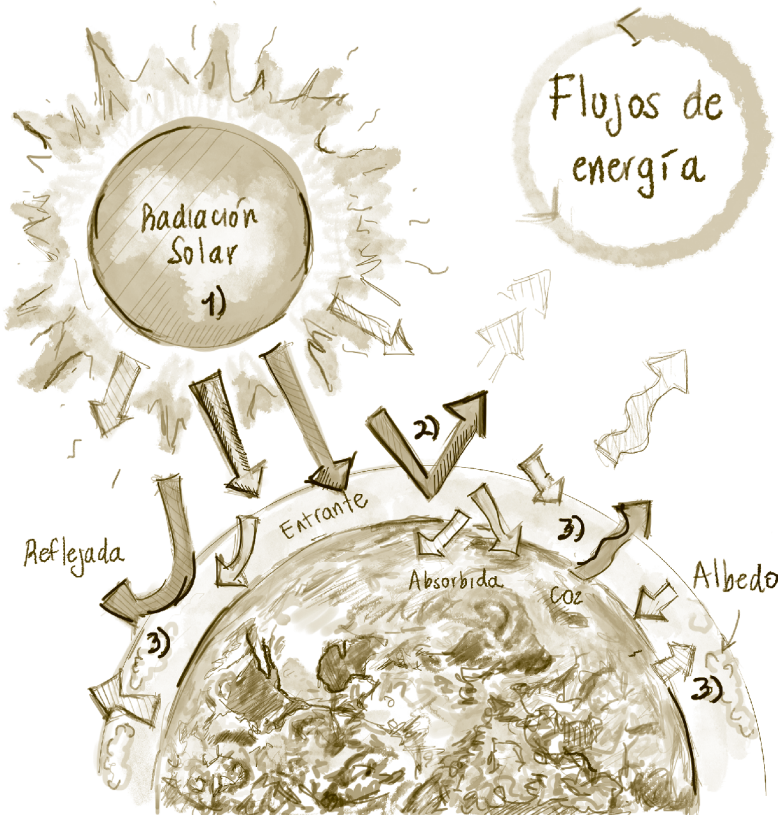
(Barry y Gan, 2022). Estas eras son periodos prolongados de tiempo geológico que se caracterizan por la expansión de glaciares continentales. A su vez, están conformadas por periodos más cortos en los que una mayor extensión continental se cubre de hielo, conocidos como glaciaciones, intercalados con periodos interglaciares (Lin y Qian, 2022). Aunque en la actualidad el planeta tiene temperaturas más elevadas, técnicamente estamos en una era de hielo, pero en un periodo interglacial (Lin y Qian, 2022).

Los cambios climáticos han acompañado al planeta Tierra desde que surgió y están relacionados principalmente con tres flujos de energía: 1) la proveniente del Sol hacia la Tierra, 2) el reflejo de esa energía devuelta al espacio, y 3) el flujo de energía entre la atmósfera, la superficie terrestre y el espacio exterior. La energía solar que llega a la Tierra es de 1300 W/m^2 , y el 30% de esa energía es reflejada por las nubes y la superficie terrestre (el reflejo de esta luz se conoce como albedo). La cantidad de energía reflejada depende de las características de las nubes y de la superficie terrestre; por ejemplo, la nieve fresca refleja el 80% de la energía solar, mientras que el mar abierto absorbe el 90%. Si sólo consideráramos el balance entre la energía que entra al planeta por los rayos del Sol y la que sale por el albedo, la temperatura media anual sería de -18°C ; sin embargo, gracias a la atmósfera es de $+15^\circ\text{C}$ (Notz, 2020).

La atmósfera primitiva de la Tierra era muy similar a la actual atmósfera de Venus y Marte, dominada por CO_2 y carente de oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2) (Sánchez-Santillán et al., 2014). En cuanto surgió la vida en el planeta, hace aproximadamente 3800 millones de años, los microorganismos fotosintéticos comenzaron a incrementar la cantidad de O_2 en la hidrósfera y la atmósfera. Las concentraciones de O_2 aumentaron lo suficiente como para que, gracias a los rayos UV, se formara ozono (O_3) y, con ello, la capa de ozono (Sánchez-Santillán et al., 2014). La filtración de los rayos UV por la capa de ozono facilitó la diversificación de la vida fuera del agua (Ratner y Walker, 1972). Sin embargo, a pesar de que la atmósfera actual está compuesta principalmente por nitrógeno,

(N₂) (78%), oxígeno (O₂) (21 %) y argón (Ar) (0.93%), estos gases apenas interactúan con la radiación de onda larga, que es la que permanece en la Tierra tras ser reflejada por su superficie. Son el CO₂, que siempre existió en la atmósfera, el vapor de agua y el metano los que permiten retener otra fracción de la energía solar. Entre estos, el CO₂ es el gas con efecto invernadero más estable y, por tanto, el de mayor influencia en nuestro clima (Notz, 2020).

Ilustración 1. Balance energético del planeta



Autoría: Adriana Corach.

Dada la explicación anterior, para que ocurra un cambio climático en el planeta debe producirse una alteración en alguno de los tres flujos de energía mencionados: radiación solar entrante, albedo o concentración de gases con efecto invernadero. Para comprender los cambios climáticos a lo largo de la historia, es fundamental ubicar las eras del hielo y las causas de su finalización. Y para situar estos grandes cambios en una línea del tiempo, es primordial distinguir las distintas etapas de la historia del planeta en términos geológicos: eones, eras, periodos y épocas, dependiendo de su duración.

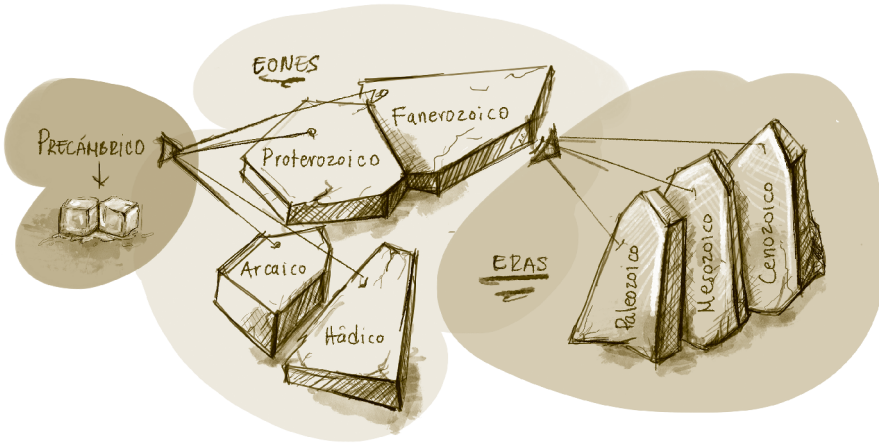
Existen cuatro eones: Hádico, Arcaico, Proterozoico y Fanerozoico. Los primeros tres abarcan miles de millones de años y constituyen lo que llamamos el Precámbrico, que cubre el 90% de la historia del planeta. El eón Fanerozoico, que dura aproximadamente 540 millones de años, se divide en tres eras: Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico; cada era, a su vez, se subdivide en periodos y épocas (Orndorff et al., 2007). En este texto nos limitaremos a los periodos, pues el objetivo es ubicar temporalmente las grandes eras de hielo que se extienden a lo largo de amplios periodos geológicos.

Ilustración 2. El aumento de la temperatura trajo consigo agua y vida



Autoría: Adriana Corach.

Ilustración 3. Eras geológicas



Autoría: Adriana Corach.

PRECÁMBRICO

Durante el Precámbrico (4600-541 millones de años) hubo dos eras de hielo, siendo la última la que, según se cree, transformó al planeta en una gran “bola de nieve” (Hoffman y Schrag, 2002). Esta teoría sugiere que, hace aproximadamente 650 millones de años, casi toda la superficie del planeta quedó cubierta de hielo, provocando climas extremadamente fríos (Walker, 2007). Aunque esta teoría cuenta con poca evidencia, se han encontrado algunos sedimentos que podrían apoyarla. Las hipótesis principales sobre por qué se cubrió el planeta de hielo son *a)* el impacto de un meteorito generó una capa de aerosoles en la atmósfera, provocando un enfriamiento que se reforzó a medida que aumentaba el albedo; *b)* un incremento en la actividad volcánica arrojó aerosoles a la atmósfera; *c)* el planeta atravesó una nube interestelar de polvo cósmico que redujo la cantidad de radiación del Sol que llegaba al planeta (Sánchez-Santillán et al., 2014). Los aerosoles son partículas que influyen

en el balance energético (por su reflectividad) y en la calidad del aire. Su enfriamiento es generalmente de corto plazo en términos geológicos. Pueden tener origen natural (biológico o volcánico) o antrópico, y pueden alterar la formación de nubes y la calidad del aire (Vimal, 2017). Se cree que otro factor clave para que el planeta se convirtiera en una gran “bola de nieve” es que toda el área continental estaba cerca del ecuador, lo que elevó la precipitación y facilitó la formación de hielo, aumentando el albedo y disminuyendo aún más la temperatura. Luego se pensó que fue la actividad volcánica la que aumentó los gases con efecto invernadero en la atmósfera, ayudando a terminar con esta “bola de nieve” (Notz, 2020).

FANEROZOICO

Paleozoico

La era Paleozoica (541-252 millones de años) es la primera era del Fanerozoico y se divide en seis periodos geológicos: Cámbrico, Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero y Pérmico. Durante el Cámbrico (541-485 millones de años), los mares se elevaron y se formó Gondwana, que fue un súper continente. La vida se desarrolló y diversificó, en parte debido a una temperatura promedio de 22°C. Existe evidencia de un efecto invernadero durante este periodo, similar al de las eras Mesozoica y Cenozoica (Hearing et al., 2018), así como de posibles ciclos de glaciación e interglaciales (Peng et al., 2020).

El Ordovícico (486-443 millones de años) se caracteriza por una gran diversificación biológica, seguida de una extinción masiva debido a una era de hielo que duró 40 millones de años (Cocks y Torsvik, 2021). En el Silúrico (443-419 millones de años), el hielo se derritió y predominó un clima más cálido, con fluctuaciones en el nivel del mar y la convergencia de placas tectónicas. Este periodo se caracteriza por la colonización del área continental por parte de la vida (Melchin et al., 2020). Durante

el Devónico (419-359 millones de años), el clima fue cálido y homogéneo, sin evidencia de glaciares en los polos. Un evento importante de este periodo es que se establecieron los bosques (Becker et al., 2020); esto ocasionó una reducción del CO₂ en la atmósfera de 6 300 a 2 100 ppm, lo que podría haber causado un enfriamiento, pero no fue así debido a que la mayor cobertura vegetal incrementó la absorción de energía de la superficie terrestre (Le Hir et al., 2011). Entre el Carbonífero y el Pérmico se produjo la mayor glaciación de la era Paleozóica, que duró 100 millones de años, y tras la cual se formó el supercontinente Pangea (Sánchez-Santillán et al., 2014).

Mesozoico

La era Mesozoica (252-66 millones de años) se divide en los periodos Triásico, Jurásico y Cretácico (Rubio, 2013). Durante estos periodos predominaron los climas cálidos y no hubo eras glaciales. La temperatura anual promedio fue 14°C más alta que la actual, en parte debido a concentraciones de CO₂ de hasta 1 000 ppm, comparadas con las 280 ppm de hace 200 años y las 400 ppm actuales. Cuando se está en un cuarto con poca ventilación se puede llegar a alcanzar esos niveles de CO₂, es decir, que el humano puede sobrevivir en esas condiciones. Sin embargo, se considera un umbral de bajo rendimiento laboral y académico (Notz, 2020). En esta era, el supercontinente Pangea se fragmentó, y la separación de los diversos bloques estuvo acompañada de una gran actividad volcánica. La separación de los continentes permitió que se mitigaran los climas áridos por la humedad marina y hubo una importante diversificación vegetal. Hubo varios cambios climáticos cuyo origen varió por la luminosidad solar, la configuración de órbita, el nivel del mar y la paleogeografía (Landwehrs et al., 2021). Durante el periodo Triásico, la Pangea terminó de formarse; un evento climático significativo fue el Pluvial Carniano, que incrementó la humedad y la precipitación global

(Preto et al., 2010). Los periodos Jurásico y Cretácico se caracterizan por la separación de los continentes y la orogénesis que influyó en los climas de la Tierra (sombra orográfica), generando una mayor diversidad de ambientes climáticos que funcionaron como nuevos nichos ecológicos (Sánchez-Santillán et al., 2014).

Cenozoico

La era del Cenozoico (66 millones de años) se divide en Paleógeno y Neógeno (Elías, 2012). Hace aproximadamente 100 millones de años, la concentración de CO₂ disminuyó, y con ella la temperatura, lo que permitió la formación de la Antártica hace 50 millones de años y la congelación del Polo Norte hace 10 millones de años. Estos fragmentos de hielo aumentaron el albedo, reduciendo la temperatura un poco más (Notz, 2020). En esta era, los continentes continuaron su desplazamiento hasta alcanzar su distribución actual (Sánchez-Santillán et al., 2014). El enfriamiento global provocó la formación de dos importantes capas de hielos que se instalaron en los extremos del planeta. Existe evidencia que sugiere que la formación del Tíbet ocasionó el enfriamiento y la reducción del CO₂ en la atmósfera (Raymo y Ruddiman, 1992). Es considerada la era de los mamíferos debido a la diversificación de estos tras el dominio de los dinosaurios (Rubio, 2013).

El inicio de la sucesión de glaciaciones y ciclos interglaciales, como el actual, se explica en parte por la teoría astronómica de Milankovitch, que toma en cuenta las variaciones temporales de tres parámetros de la órbita terrestre: excentricidad, precesión y oblicuidad.¹ Estos factores provocan cada cierto tiempo (aproximadamente 100 000 años) una menor cantidad de radiación solar, el consiguiente enfriamiento del océano, que a bajas temperaturas absorbe más CO₂, y la expansión de los glaciares,

¹ En el siguiente apartado de este capítulo se amplía esta información.

que aumentan el albedo, enfriando un poco más el planeta hasta alcanzar una nueva glaciación. Luego, en algún punto, la órbita de la Tierra se modifica, aumentan las temperaturas y los océanos vuelven a liberar CO₂ (Notz, 2020). En promedio, las glaciaciones duran unos 100 000 años, mientras que los ciclos interglaciales suelen durar alrededor de 10 000, con importantes variaciones.

Desde hace unos 13 000 años, disfrutamos de un clima benigno y bastante uniforme, a pesar de las continuas fluctuaciones. Las sociedades humanas son vulnerables a los cambios climáticos, algo que en la actualidad vuelve a ponerse de manifiesto con el asunto del cambio climático antropogénico (Taylor y Davies, 2004). Este último cambio climático es distinto a los otros que han acompañado al planeta. Ni la humanidad ni la biodiversidad habían sido testigos de una modificación tan abrupta, pues en unas cuantas décadas ha sucedido —y seguirá sucediendo— lo que normalmente toma cientos de miles, o al menos miles de años.

En los últimos años, se han registrado las temperaturas más elevadas desde que existen registros: el hielo del Ártico es el más bajo desde hace 1 000 años, y el nivel del mar está aumentando a una tasa de 4 mm por año, entre otros efectos. Además, existe suficiente evidencia científica para afirmar que ninguna causa natural podría haber provocado un cambio tan acelerado como del que estamos siendo testigos (Notz, 2020). El hecho de que la humanidad sea causante de las modificaciones del clima también nos convierte en los responsables del rumbo que tomará en las próximas décadas, y las consecuencias dependerán de las decisiones que tomemos.

Por esta razón, la humanidad ha intentado llegar a acuerdos ante la crisis climática actual a través de las Conferencias de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas (COP) sobre el cambio climático (ONU, 2015b). En 1992, se decidió que los países se reunirían en Río de Janeiro, Brasil, para discutir temas sobre el cambio climático, y desde entonces ha habido 28 COP en diferentes países del mundo. La primera se

celebró en Berlín, Alemania, en 1995. Se ha procurado llevar a cabo estas reuniones anualmente, aunque no siempre ha sido así. En ellas se examinan las comunicaciones nacionales e inventarios de emisiones de los países participantes. Por esta razón México genera comunicaciones nacionales, como se explica con más detalle en el apartado “Los conceptos de la ciencia del cambio climático antropogénico” de este primer capítulo.

En la COP21, celebrada en 2015, surge el Acuerdo de París, en el que se propone como meta global, dada la evidencia física de ese momento, no superar un aumento de la temperatura promedio anual global preindustrial a más de 1.5°C (Organización de las Naciones Unidas, 2015a). Si la temperatura no aumenta más de 1.5°C, el océano Ártico podría mantenerse cubierto de hielo la mayoría del tiempo y Groenlandia podría experimentar un derretimiento reversible. Sin embargo, si alcanzamos un aumento de la temperatura promedio anual global de 2°C (en comparación con la época preindustrial), el océano Ártico perderá su cobertura de hielo, se reducirá el albedo, y la temperatura de nuestro planeta aumentará aún más. Con 2°C de aumento, la probabilidad de que Groenlandia se vuelva inestable y se derrita será irreversible. Si Groenlandia se derrite, el nivel del mar podría aumentar 7 m en los próximos siglos, lo que tendría importantes consecuencias para las ciudades, países enteros y la biodiversidad (Hoegh-Guldberg et al., 2019).

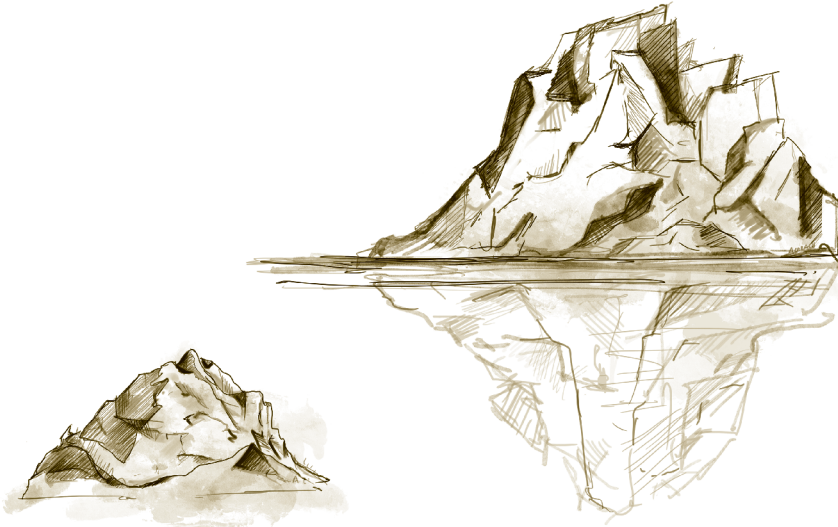
LA HISTORIA DE LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La curiosidad por los cambios climáticos a lo largo de la historia del planeta surgió a mediados del siglo XIX. El suizo Louis Agassiz (1830-1840) se percató de que explicar la topografía del planeta sin la existencia extendida de superficie de hielo en otras épocas, era prácticamente imposible (Imbrie e Imbrie, 1986). Además, comenzaron a encontrarse fósiles de especies de zonas templadas o frías en regiones cálidas, lo que reforzó la hipótesis de que la temperatura del planeta no ha sido constante a lo

largo de su historia (Barry y Gan, 2022; Lin y Qian, 2022). Sin embargo, en ese entonces todavía no lograba responder cuáles eran las causas de estos cambios climáticos. En el siglo XIX, la preocupación científica se centró en cuándo llegaría una nueva era de hielo; la evidencia mostraba que el planeta había estado cubierto de hielo durante años.

Entre finales del siglo XIX y principios del XX, surgieron dos corrientes de pensamiento científico que pretendían explicar las razones detrás del desencadenamiento de eras de hielo. Una de ellas sugería que los cambios en el clima del planeta estaban principalmente relacionados con las variaciones en la órbita de la Tierra con respecto del Sol, mientras que en la otra aumentaba debido a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. La primera corriente fue formulada matemáticamente y promovida por el científico serbio Milutin Milankovitch (Martínez et al., 2017). La segunda corriente fue impulsada por Svante Arrhenius (Crawford, 1997).

Ilustración 4. La topografía como evidencia de que hubo hielo



Autoría: Adriana Corach.

Milankovitch, nacido en 1879, se doctoró en Ciencias Técnicas por el Instituto de Ciencia y Tecnología de Viena en 1904 (Martínez et al., 2017). Posteriormente, trabajó en la Universidad de Belgrado en el campo de las matemáticas aplicadas, donde desarrolló teorías matemáticas sobre el clima basadas en cómo los diferentes tipos de movimientos de la Tierra se relacionaban con los cambios climáticos a lo largo de la historia del planeta. Aunque otros investigadores habían hecho contribuciones importantes sobre este tema décadas antes –como Joseph Alphonse Adhémar (1842), James Croll (1875) y Didier Paillard (2006) (Bol'shakov et al., 2012)– Milankovitch consolidó una teoría completa con un análisis matemático riguroso (Ateş, 2022).

En 1842, el matemático Adhémar sugirió que las glaciaciones se originaron por factores astronómicos que causaron una disminución en la cantidad de irradiación que recibía la Tierra, y Croll expuso que la excentricidad de la órbita terrestre sufría variaciones por interacciones gravitacionales (Martínez et al., 2017). Según Milankovitch, las variaciones orbitales son las causantes de los periodos glaciales (mayor distancia entre la Tierra y el Sol en verano, con débil contraste estacional) e interglaciales (menor distancia entre la Tierra y el Sol en el verano, con importantes contrastes estacionales). Para Milankovitch, existen tres parámetros básicos que modifican los movimientos de traslación y rotación: la precesión, la oblicuidad y la excentricidad. La precesión es el cambio cíclico en la orientación del eje de rotación de la Tierra. Dado que la Tierra no es una esfera perfecta (pues está achatada por los polos) y que la distribución de las masas no es equitativa (debido a la disposición de los continentes), la influencia gravitacional de otros cuerpos celestes como el Sol y la Luna afecta la orientación del eje de rotación. La oblicuidad de la Tierra se refiere a su inclinación con respecto a su órbita alrededor del Sol. Esta inclinación, también conocida como inclinación axial, tiene un ángulo de aproximadamente 23.5° entre el eje de rotación del planeta y una línea perpendicular al plano de su órbita. La oblicuidad

es responsable del cambio en las estaciones del año, ya que mientras la Tierra gira alrededor del Sol, recibe diferente cantidad de luz a lo largo de los 12 meses del año. Finalmente, la excentricidad de la órbita está relacionada con la forma en la que se mueve la Tierra alrededor del Sol. Si la Tierra fuera el único planeta, su órbita sería circular, pero la influencia gravitacional de Júpiter y Saturno provoca que se forme una elipse. Conforme más se parece a un círculo esta órbita, más suaves son los cambios estacionales (Martínez et al., 2017).

En la misma época de Milankovitch, Svante Arrhenius relacionó la cantidad de dióxido de carbono y de vapor de agua con el aumento en la temperatura (Crawford, 1997). Arrhenius, originario de Suecia, fue un investigador en física conocido por importantes contribuciones en su campo (como la disociación de electrolitos en iones con cargas positivas y negativas). Sin embargo, es principalmente reconocido por dos trabajos: uno publicado en la revista *Supplement to the Proceedings of the Royal Swedish Academy of Sciences* y otro en *Philosophical Magazine* (Crawford, 1997). Los trabajos científicos más importantes de la época debían publicarse en inglés y alemán para alcanzar una mayor audiencia entre los grupos de investigación.

En su artículo publicado en *Philosophical Magazine*, Arrhenius explica la relación entre la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y la temperatura del planeta, así como su contribución a los distintos cambios climáticos que la Tierra había experimentado. Destacó que estas modificaciones en la concentración de CO_2 eran la principal causa de las eras del hielo por las que había atravesado el planeta. Arrhenius se basó en el trabajo de John Tyndall, quien fue reconocido durante muchos años como el descubridor de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, ahora sabemos que fue Eunice Foote (1856), y no Tyndall, quien hizo este importante descubrimiento (Jackson, 2019).

Eunice Foote es considerada la “madre” del cambio climático. Se cree que sus hallazgos fueron poco conocidos durante años debido a que era

una investigadora *amateur* de origen estadounidense, en un momento en que los grupos de investigación más influyentes estaban en Europa. En 1856 un colega de Foote le ayudó a presentar sus resultados en la *American Association for the Advancement of Science* (AAAS). Aunque no estaba prohibido que las mujeres expusieran, era poco común. Ese mismo año, su trabajo fue publicado en *The American Journal of Science and Arts* bajo el título “Circumstances Affecting the Heat of the Sun’s Rays” (Jackson, 2019). El experimento de Foote consistió en exponer tubos de vidrio con diferentes gases a la radiación solar y a la sombra. Reportó que aquellos tubos con dióxido de carbono y vapor de agua se calentaban más que los otros. Es decir, descubrió la capacidad de absorción de radiación solar por parte de los gases. Además, relacionó sus resultados con la posibilidad de que las concentraciones de estos gases en la atmósfera fueran la principal causa de cambios climáticos en el planeta.

Aunque Tyndall no fue el primero en descubrir los gases de efecto invernadero, sí hizo una importante contribución al conocimiento en esta área. Sus experimentos permitieron diferenciar la radiación solar de aquella radiación infrarroja de onda larga proveniente de la superficie terrestre, en lugar de venir directamente del Sol. Son estas ondas largas las que no logran salir al espacio debido a los aumentos en la concentración de CO₂ en la atmósfera, reteniendo más energía en el planeta. Esta característica y diferencia entre los tipos de radiación es lo que le da más sentido al efecto invernadero. La diferencia entre tipos de radiación y su relación con los gases de efecto invernadero se pudo evaluar gracias a la creatividad de Tyndall y a un aparato que él mismo solicitó construir, capaz de diferenciar las ondas infrarrojas largas de la radiación solar. Tyndall, irlandés de nacimiento, terminó el doctorado en la Universidad de Marburg y trabajó en esta institución, así como en Berlín y Londres. A mediados y finales del siglo XIX, Reino Unido y Alemania eran las grandes potencias en ciencia, especialmente en física. En contraste, las sociedades científicas en los Estados Unidos apenas se formaban y eran poco

conocidas en el mundo académico europeo. Tyndall siempre estuvo cerca de los grandes físicos experimentales de su época y estaba convencido de que no sólo la composición física de los materiales podía influir en la absorción del calor, sino también en su composición química.

Al igual que Tyndall y Foote, en esa época había otras personas evaluando la capacidad de absorción de los gases, como los alemanes Rudolf Franz y Gustav Magnus. Tyndall publicó dos grandes trabajos sobre este tema, uno en 1859 y otro en 1861. En este último citó y criticó el trabajo de Franz. No había notado el trabajo de Magnus hasta que él le escribió en 1861. No existe evidencia de que ninguno de estos tres autores tuviera conocimiento de la importante contribución que había hecho Foote unos años antes. No hubo republicaciones del trabajo de Foote de 1856 en revistas europeas, aunque sí lo hicieron ese mismo año con un texto de su esposo, Elisha Foote, cuya contribución al conocimiento era mucho menor. En 1857, otra investigación de Eunice Foote fue publicada en *Philosophical Magazine*. En revistas alemanas no se publicó su trabajo completo, pero sí un resumen. En uno de estos textos se atribuye equivocadamente la contribución a su marido. En ambos casos, no se mencionó que Foote propuso una conexión con el cambio climático.

Unos días después de los primeros experimentos realizados por Tyndall, él comprendió la relevancia de sus hallazgos. De manera casi inmediata notificó a la Royal Society (Real Sociedad de Londres para el Mejoramiento del Conocimiento Natural, una de las instituciones científicas más antiguas y prestigiosas del mundo) y pronunció un discurso en la Royal Institution (Real Institución de Gran Bretaña, una organización británica dedicada a fomentar la ciencia y su divulgación) para establecer su prioridad como descubridor de este fenómeno. Sin embargo, en su primer escrito y ponencia, no relacionó sus descubrimientos con el clima. Esta conexión la hizo hasta su artículo de 1861, aunque le dio muy poco énfasis.

Gracias los trabajos de Tyndall y de Foote (aunque su contribución aún no era ampliamente reconocida), Arrhenius pudo profundizar en

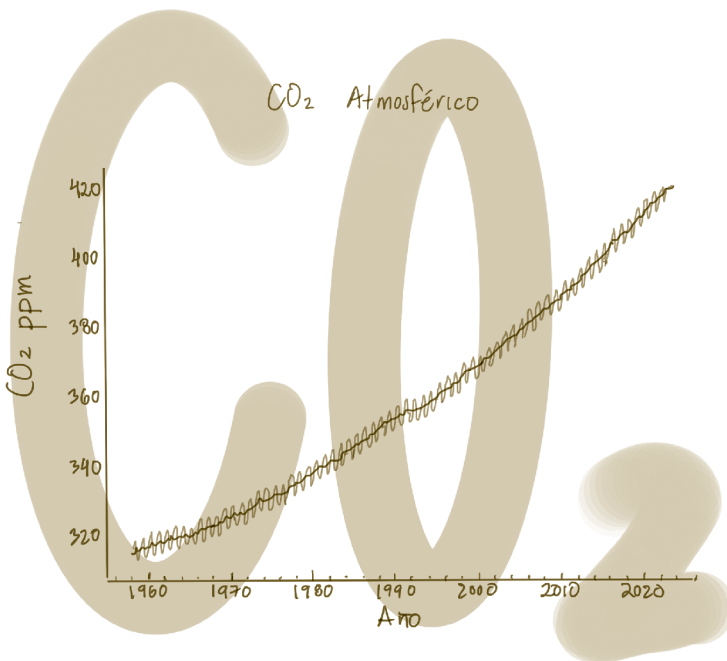
cómo la concentración de CO_2 y el vapor de agua influían en la temperatura del planeta. Representó y demostró su hipótesis mediante ecuaciones matemáticas que mostraban cómo las variaciones de CO_2 eran la causa de los cambios climáticos en la Tierra y de las eras del hielo (Crawford, 1997). Posteriormente, se aventuró a calcular la cantidad de años que tardaría la humanidad en duplicar la concentración de CO_2 en la atmósfera debido a la quema de combustible fósil y lo que eso ocasionaría. Se dio cuenta de que el planeta estaba en una tendencia al calentamiento, en lugar de acercarse a una nueva era de hielo. Arrhenius percibió esta situación de manera optimista, pensando que un aumento de $3\text{--}4^\circ\text{C}$ en la temperatura promedio anual del planeta podría tener consecuencias positivas sobre el equilibrio de la Tierra.

Gracias a las y los investigadores del siglo xix , la humanidad pudo percatarse de que, en lugar de estar cerca de una era de hielo, nos estábamos calentando por el aumento artificial en la concentración de CO_2 en la atmósfera causado por la quema de combustibles fósiles. A pesar de la evidencia y las demostraciones matemáticas logradas a finales del siglo xix y principios del xx , las décadas siguientes estuvieron marcadas por escepticismo en cuanto a la influencia humana sobre el sistema climático. De 1900 a 1940, hubo poco avance en la ciencia de esta materia, hasta que Guy Stewart Callendar retomó el tema en 1938. Para ese entonces, se calculaba que la humanidad había arrojado a la atmósfera 150 000 millones de toneladas de CO_2 , y que aproximadamente el 75% permanecía en la atmósfera. Callendar analizó el efecto de esta cantidad de CO_2 artificial sobre la radiación del cielo y calculó que el planeta podría estar calentándose a una tasa de 0.003°C al año. En esos años, y con esa tasa de calentamiento, no parecía que las consecuencias del aumento de temperatura fueran graves. Al contrario, se pensó que podría llegar a tener beneficios para la agricultura (Callendar, 1938).

A partir de la importante publicación de Callendar, la comunidad científica comenzó a monitorear el aumento de la concentración de CO_2 .

Con la curva de Keeling, obtenida a través de un monitoreo de 13 años (1958-1971) (Howe, 2015), se demostró que la tasa de incremento de CO_2 era casi la esperada por la quema de combustibles fósiles, pero que cada año había un incremento y una disminución en estas concentraciones. Fue entonces cuando la teoría de George Evelyn Hutchinson cobró sentido (Hutchinson, 1954), al demostrar al mundo que no sólo los humanos influimos en el clima del planeta, sino también la biota. La deforestación y el cambio de uso de suelo contribuyen a la emisión de CO_2 a la atmósfera. Esta es la razón por la que hay ciclos de CO_2 cada año, debido a la caída y el nacimiento de hojas, o, mejor dicho, por las estaciones del año que ocasionan cambios fenológicos en la vegetación del planeta.

Ilustración 5. Monitoreo del dióxido de carbono



Autoría: Adriana Corach.

En 1978, Minze Stuiver demostró con cálculos matemáticos que alrededor de la mitad del CO₂ emitido a la atmósfera entre 1850 y 1950 había sido absorbido por el océano. Sin embargo, dos tercios de CO₂ de esos 100 años provenían de la biósfera a través de la tala y el cambio de uso de suelo, y sólo un tercio provenía de la quema de combustible fósil (Stuiver, 1978).

En 1987, una investigación en Vostok, Rusia, (Barnola et al., 1987) permitió la obtención de un núcleo de hielo (> 2 m), cuyas burbujas de aire contenían el perfil de la composición de la atmósfera a través de 160 000 años. Se correlacionó la concentración de CO₂ con la temperatura del planeta en diferentes etapas de la historia de la Tierra, y se encontró una relación significativa. Esta evidencia fue contundente para probar todas las hipótesis: el CO₂ estaba vinculado con la temperatura del planeta y lo había estado durante mucho tiempo. Casi 150 años después del descubrimiento de Eunice Foote, se obtuvo evidencia irrefutable de que el clima en el planeta estaba cambiando y que el origen era antrópico. Aun así, persistía el escepticismo en ciertos grupos con conflictos de intereses. Este escepticismo se fue eliminando gracias a la evidencia que recolectó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que ha seguido recopilando datos hasta la fecha. El IPCC fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El objetivo del panel era evaluar de manera objetiva, científica y técnica la información relevante sobre el cambio climático (Hulme y Mahony, 2010). Desde su establecimiento, el IPCC ha desempeñado un papel crucial en la síntesis y divulgación del conocimiento científico relacionado con el cambio climático, proporcionando informes de evaluación periódicos (publicados en 1990, 1995, 2001, 2007, 2014, 2022) que facilitan a los gobiernos y al público en general información de calidad sobre la evolución del clima y sus posibles impactos.

LOS CONCEPTOS DE LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPOGÉNICO

Desde la fundación del IPCC, se estableció un marco conceptual que ha sido fundamental para generar conocimiento en torno al cambio climático antropogénico. Es importante comprender estos conceptos, ya que serán referidos en los siguientes capítulos, donde se revisará la literatura en función del avance de la ciencia del clima en México, con un enfoque en el bienestar humano y ecosistémico en torno a tres conceptos clave: impactos, adaptación y mitigación.

Los impactos en la ciencia del cambio climático se definen como las consecuencias de los peligros climáticos, la adaptación como la capacidad de lidiar con estos peligros, y la mitigación como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero o la creación de sumideros de carbono. Estos tres conceptos están vinculados con otros cuatro: riesgo, vulnerabilidad (que depende de la sensibilidad y la capacidad adaptativa), exposición y peligro. Antes de que se incorporara el riesgo y el peligro en el mapa conceptual de la ciencia del clima (previo al IPCC 2014), se tenía un mapa constituido sólo por la vulnerabilidad que estaba en función de la sensibilidad, la exposición y la capacidad adaptativa. La vulnerabilidad de un sistema se definía como la susceptibilidad de no estar preparado para enfrentar impactos adversos del clima. Identificar sistemas más vulnerables permite enfocar esfuerzos y recursos para evitar pérdidas en vidas humanas, biodiversidad, alimentos y economía. Para calcular índices de vulnerabilidad, es necesario conocer la sensibilidad (características de un sistema que lo hacen susceptible a cambios climáticos), la capacidad adaptativa (características que le permiten lidiar con esos cambios) y la exposición (presencia de un sistema en áreas susceptibles a fenómenos climáticos): $\text{vulnerabilidad} = F(\text{sensibilidad, capacidad adaptativa, exposición})$ (IPCC, 2007).

En el marco conceptual más reciente de la ciencia del cambio climático (IPCC, 2014) se integran dos nuevos conceptos: riesgo y peligro. El

riesgo se presenta en función de la vulnerabilidad (sensibilidad, capacidad adaptativa), la exposición y el peligro: $\text{riesgo} = F [\text{vulnerabilidad} = F (\text{sensibilidad, capacidad adaptativa}), \text{exposición, peligro}]$.

La exposición se desvinculó del concepto de vulnerabilidad para considerarse un elemento del riesgo, y se generó una definición del peligro. En este nuevo marco, el riesgo se entiende como la probabilidad de que un peligro climático cause un evento con consecuencias negativas (IPCC, 2018). Finalmente, el peligro se define como un fenómeno que puede dañar un sistema social o biológico.

En México, los primeros estudios sobre el cambio climático se enfocaron en los impactos potenciales en sistemas sociales (salud, bienestar, bienes económicos, culturales, servicios e infraestructura) y biológicos (especies y ecosistemas). En la ciencia del clima, un impacto negativo se define como las consecuencias de los peligros potenciales. Estos impactos se pueden traducir en costos económicos (Estrada et al., 2013), pero también incluyen pérdidas no necesariamente relacionadas con dinero, como la pérdida de biodiversidad (Pecl et al., 2017), el trauma por sufrir un evento extremo como un huracán o la erosión cultural (Doloisio y Vanderlinden, 2020). Los impactos pueden ocurrir por eventos extremos, como olas de calor y tormentas, o por fenómenos de evolución lenta, como el aumento en el nivel del mar y su acidificación. En México, existen varios estudios que muestran impactos potenciales por el cambio climático en sistemas sociales y biológicos. En los siguientes capítulos se abordarán con mayor detalle algunos ejemplos de los impactos del clima en la seguridad alimentaria, la salud y la biodiversidad.

En los últimos cinco años, la comunidad científica ha discutido la importancia de dirigir los estudios hacia la propuesta de medidas adaptativas o de mitigación que conduzcan a generar estrategias para reducir los impactos potenciales. Una revisión de la literatura científica sobre los impactos del cambio climático en sistemas sociales y biológicos revela que el número de estudios enfocados en los impactos es de más del doble

que aquellos que buscan alternativas de adaptación, y aún menos son los estudios centrados en la mitigación.

La adaptación es un proceso de ajuste que reduce el riesgo y los impactos negativos. Existen dos perspectivas de la adaptación: motores asociados a la generación de medidas y estrategias (conjunto de medidas adaptativas), y aumento en la resiliencia (Martínez, 2020). La resiliencia se define como la capacidad de los sistemas biológicos y sociales para resistir perturbaciones sin cambiar el punto de equilibrio; es decir, la capacidad de regresar al punto de equilibrio posterior a una perturbación (Eakin et al., 2016, como se citó en Martínez, 2020). Por lo tanto, la resiliencia es de alguna manera opuesta a la sensibilidad, componente fundamental de la vulnerabilidad. Cuanto más resiliente es un sistema, mayor es su capacidad adaptativa. En cambio, cuanto más sensible es un sistema, más vulnerable es y, por lo tanto, está en mayor riesgo. Cuando un sistema es poco resiliente, la intervención humana puede ayudar a moderar sus daños. Las soluciones de adaptación pueden darse de muchas formas y modalidades, y dependen en gran medida de las características y necesidades de cada localidad. Las medidas y estrategias adaptativas dependen de una participación activa y sostenida de las personas que las están implementando, así como de una coordinación por parte de los gobiernos. Las medidas adaptativas son acciones específicas que permiten lidiar con un problema particular derivado del cambio climático, mientras que las estrategias adaptativas son un conjunto de medidas que requieren de planeación e implementación de diversos actores, con la finalidad de incrementar la resiliencia de los sistemas. La adaptación de los sistemas puede ser gradual o transformativa. La adaptación gradual se centra en mantener la esencia de un sistema a una escala determinada, mientras que la adaptación transformativa cambia la esencia de los sistemas y los transforma para reducir impactos potenciales del cambio climático (Termeer et al., 2017; Tàbara et al., 2018).

Además de generar medidas y estrategias adaptativas, es necesario desarrollar también medidas de mitigación. La mitigación es la

intervención humana que facilita la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero o la generación de sumideros de dichos gases, con el fin de reducir los impactos potenciales del cambio climático (INECC, 2021; IPCC, 2018 y 2021). La mitigación tiene como principal propósito no sobrepasar un umbral de temperatura que podría traer consigo consecuencias más graves. En el contexto del cambio climático, la mitigación se refiere a las acciones y políticas destinadas a reducir o evitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera para disminuir la magnitud del cambio climático. Estas acciones pueden incluir una variedad de enfoques, como la transición a fuentes de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética, la conservación y reforestación de los bosques, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la implementación de tecnologías para captura y almacenamiento de carbono, entre otros. La mitigación es fundamental para limitar el calentamiento global y reducir los impactos adversos del cambio climático en el medio ambiente, la sociedad y la economía. El Acuerdo de París y otros tratados internacionales sobre cambio climático incluyen objetivos de mitigación que requieren acciones concretas por parte de los países para reducir sus emisiones de GEI y limitar el aumento de la temperatura global.

LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

TIEMPO Y CLIMA

El ser humano, por naturaleza, siempre ha tenido la necesidad de prever cómo los eventos ambientales y sociales pueden afectar sus actividades en el futuro cercano. Por ejemplo, hoy en día todos estamos atentos a los eventos que pueden afectar el tráfico vehicular o el transporte público, lo que nos lleva a consultar momentos antes de salir de casa cualquier información que nos alerte y nos permita tomar medidas para prevenir retrasos en nuestro camino. En este aspecto, el clima no es la excepción,

sobre todo porque una gran cantidad de actividades humanas dependen de las variaciones climáticas o pueden verse afectadas por ellas. De la misma manera que consultamos el tráfico vehicular, tendemos a escuchar el pronóstico del clima, que nos indica las probabilidades de tener un día caluroso o frío, lluvioso o seco. Esta información nos permite salir preparados ante cualquier posible situación. Es importante hacer una aclaración: cuando escuchamos el pronóstico del clima, lo que en verdad estamos consultando es el pronóstico del tiempo o, más precisamente, del tiempo meteorológico. Pero, ¿qué significa este término y por qué es importante diferenciar entre “tiempo” y “clima”?

Comencemos con las definiciones. *Tiempo meteorológico* se refiere al estado de la atmósfera en un momento y lugar específicos, y se percibe a través de variables como temperatura, humedad, lluvia, nubosidad y viento. Además, puede cambiar en cuestión de minutos, horas o días (Moore et al., 2010; Torres-Puente, 2019). En cambio, *clima* se define como la representación estadística del tiempo meteorológico a lo largo de un periodo determinado, generalmente de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Arguez y Vose, 2011). Se representa en términos de promedios, variabilidad o valores extremos de las variables meteorológicas, como la temperatura (IPCC, 2007; Torres-Puente, 2019). Por lo tanto, se puede decir que el tiempo describe la actividad atmosférica a corto plazo, abarcando fenómenos que ocurren en intervalos de horas a días, mientras que el clima se refiere a los valores promedio de la actividad atmosférica sostenidos en el tiempo, abarcando fenómenos que varían en escalas de años a décadas.

Ahora bien, ¿por qué es importante diferenciar entre tiempo y clima? Los eventos meteorológicos a los que hacen referencia ambos conceptos nos afectan de maneras diferentes. El estado del tiempo nos indica cómo las condiciones meteorológicas cambian a lo largo del día; por ejemplo, podemos empezar la mañana con frío y, a medida que avanza el día, la temperatura puede aumentar hasta alcanzar una tarde calurosa. En

otros casos, podemos comenzar con una mañana soleada y, para la tarde, puede nublarse e incluso llover. Estos cambios afectan nuestras actividades diarias: si tenemos eventos al aire libre y no esperábamos un día frío, o si una lluvia inesperada cambia el comportamiento del tráfico vehicular, si una ola de calor impacta negativamente nuestro trabajo en un lugar cerrado con poca ventilación.

En cuanto al clima, este alude a condiciones sostenidas en el tiempo, reflejando eventos meteorológicos que han sido observados durante largos periodos. Por ejemplo, cuando decimos que mayo es el mes más caluroso del año, o que la época de lluvias termina en octubre. Además, el clima nos permite delimitar estaciones del año, identificar regiones con climas templados, tropicales o áridos. De esta forma, la influencia del clima en nuestras actividades se manifiesta principalmente en planes a mediano y largo plazo, en contraste con el tiempo, que afecta nuestras actividades a corto plazo, de horas a días. Las actividades agropecuarias, por ejemplo, están estrechamente ligadas al clima, como lo observamos desde los orígenes de la civilización humana, cuando se identificaron y documentaron los periodos adecuados para iniciar las actividades agrícolas. Los mexicas, por ejemplo, desarrollaron el *Xiuhpohualli*, un calendario que les indicaba el momento adecuado para realizar agricultura de riego o temporal.

El clima también determina diferentes procesos en los ecosistemas, como el inicio de la reproducción de animales vertebrados e invertebrados, y la época de floración y fructificación de las plantas. Estos procesos biológicos proporcionan al ser humano acceso a recursos necesarios para su supervivencia, como alimentos (frutos y carne) o materiales (leña o forraje). Estos bienes que aprovechamos de la naturaleza son llamados “servicios ecosistémicos” y están fuertemente ligados al clima.

Como hemos visto, es crucial tener clara la diferencia entre tiempo y clima, así como su impacto en nuestras vidas. Los cambios atmosféricos a corto plazo se refieren al tiempo, pero a menudo se confunden con

cambios climáticos, lo que genera malentendidos sobre el significado de “cambio climático”. Si en mayo tenemos un día frío o lluvia en diciembre, estos son sólo variaciones del tiempo que pueden afectar nuestra actividad diaria, pero no representan necesariamente un cambio en el clima. Si comenzamos a observar que la temporada de lluvias cambia en su inicio, duración o finalización, y estos cambios se sostienen en el tiempo, entonces podríamos estar experimentando un cambio climático, cuyos efectos se reflejarán en el mediano y largo plazo.

Por lo tanto, los cambios en el tiempo son percibidos cotidianamente, como un día lluvioso o una ola de calor, mientras que los cambios climáticos son más difíciles de detectar, ya que requieren escalas de tiempo mayores, como un cambio sostenido en los regímenes de lluvias o en la duración de las estaciones del año.

Retomando la idea de prever los posibles cambios meteorológicos y su efecto en el ser humano, para el tiempo meteorológico se realizan pronósticos basados en variables como temperatura, presión atmosférica, nubosidad y viento a nivel de mesoescala (Magaña et al., 2013). A través de métodos numéricos que integran observaciones recientes de estas variables, se genera un pronóstico de las posibles temperaturas y precipitaciones esperadas en un lapso de hasta cinco días, con resoluciones espaciales de hasta 20km. En contraste, para el clima se requieren métodos numéricos que integran factores geográficos, atmosféricos y biológicos a un nivel de macroescala, es decir, extensiones continentales y ventanas temporales de cientos de años. Con esta información, se puede construir un modelo climático que permita caracterizar el cambio observado y, de esta forma, generar un escenario basado en las modificaciones esperadas en uno o varios de los factores que modulan el clima. Estos escenarios cobran relevancia cuando se busca evaluar cómo un cambio climático puede afectar nuestras actividades a mediano y largo plazo, así como la reducción o pérdida de servicios ecosistémicos.

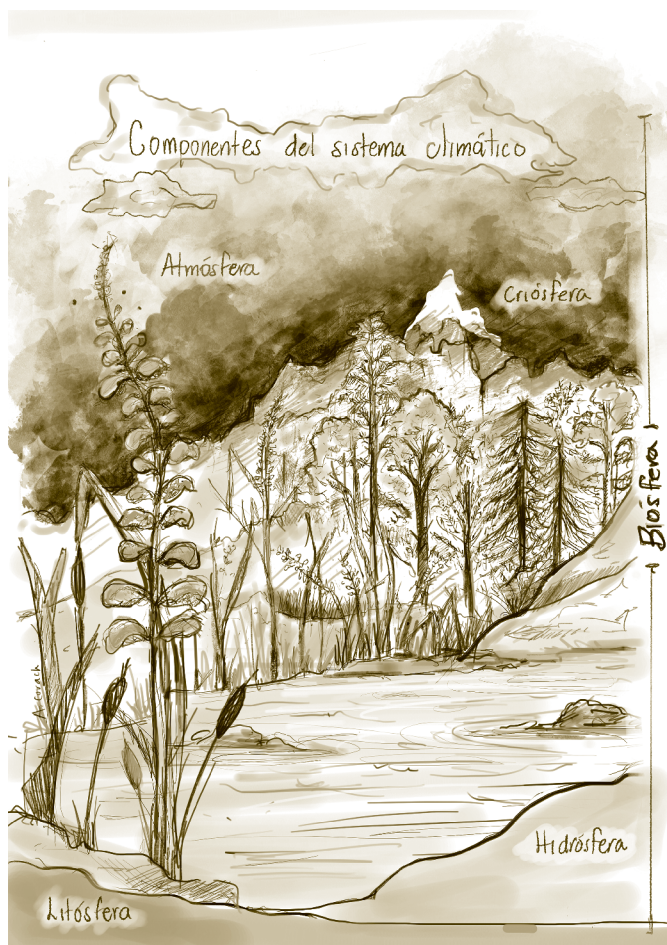
MODELOS CLIMÁTICOS

Antes de abordar cómo se generan los escenarios de cambio climático, es importante revisar algunos conceptos clave: *sistema climático* y *modelos climáticos*. Como se mencionó anteriormente, el clima se define como la representación estadística del tiempo a lo largo de un periodo de 30 años. Sin embargo, el hecho de que en algunas regiones este promedio indique climas fríos o cálidos está relacionado con la interacción de un gran número de factores. El sistema climático está compuesto por cinco componentes: la atmósfera (la capa de aire que cubre al planeta), la hidrósfera (formada por el manto líquido de ríos, lagos, mares y océanos), la criósfera (conformada por los hielos polares y de montaña), la litósfera (capa terrestre de suelo continental y oceánico), y la biósfera (constituida por los ecosistemas). La interacción entre estos componentes determina el clima en una región particular.

Además, el sistema climático cambia de forma natural debido a la dinámica interna de sus componentes: ya sea por forzamientos externos como las erupciones volcánicas y variaciones solares, o, como se mencionó anteriormente, por forzamientos antropogénicos como los cambios en el uso de suelo y modificación en la composición de la atmósfera (IPCC, 2007). Existe, asimismo, una importante conectividad del sistema climático entre regiones del planeta. Por ejemplo, el calentamiento (El Niño) o enfriamiento (La Niña) del Pacífico ecuatorial tiene efectos globales en cuanto a lluvia, temperatura y eventos climáticos extremos. También, las variaciones en la presión atmosférica entre Islandia y las Azores afectan el clima de Europa y América del Norte (Oscilación del Atlántico Norte), y la circulación de agua profunda y superficial que conecta todos los océanos del mundo regula el clima a través de la redistribución del calor (circulación termohalina), por mencionar algunos ejemplos.

La complejidad del sistema climático es evidente; el reto es establecer las bases para construir un modelo que permita caracterizar y cuantificar las interacciones entre sus componentes y cómo éstas pueden cambiar y originar climas nuevos ante una serie de eventos modificadores.

Ilustración 6. Componentes del sistema climático



Autoría: Adriana Corach.

Con el fin de entender y prever la trayectoria que seguirá el clima ante diferentes forzadores climáticos, se han desarrollado los llamados “modelos climáticos”. Estos pueden definirse como representaciones numéricas del sistema climático, basadas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes y en sus interacciones (IPCC, 2007). Los modelos pueden abarcar una región particular o utilizar sólo algunos de los componentes del sistema climático (por ejemplo, la atmósfera), hasta los que simulan la atmósfera, hidrósfera, criósfera y litósfera de todo el planeta. Esto nos proporciona una gama de modelos con diferente complejidad y, por lo tanto, diferentes requerimientos computacionales para su implementación.

Considerando la complejidad del sistema climático, no existen modelos que puedan capturar todos sus procesos e interacciones de sus componentes. En estos modelos, se toma la atmósfera como el sistema principal, seguido de los océanos como el segundo subsistema más relevante, debido al fuerte acoplamiento entre ambos, fundamental para obtener una modelización precisa. La contribución de los otros subsistemas se integra mediante parametrizaciones, es decir, algoritmos que describen procesos específicos a partir de variables fundamentales que ocurren a menor escala y no pueden ser resueltas por medio de simulaciones en modelos globales. Estos parámetros provienen de datos observados y evidencia empírica, como las corrientes convectivas o la representación de nubes (Llebot, 2009).

Los modelos climáticos están clasificados de acuerdo con su complejidad, tipo y grado de resolución. A continuación, se describen los distintos modelos.

1. Modelos de balance de energía: son considerados los modelos de mayor simplicidad desde el punto de vista conceptual. Se basan en que la temperatura de la Tierra puede explicarse por el balance entre la energía solar que llega a la superficie terrestre y el calor

que es liberado de regreso al espacio (Budyko, 1969; Lohmann, 2020). En estos modelos, la única dimensión representada es la variación con la latitud, y la atmósfera se integra verticalmente en dirección este-oeste (Harvey et al., 1997). Los parámetros importantes que utilizan son la radiación del Sol, el albedo (fracción de radiación solar reflejada por una superficie), los efectos de las nubes, los aerosoles, la superficie de hielo, la radiación infrarroja absorbida por la atmósfera y la distribución de la temperatura media en la dirección norte-sur (Llebot, 2009). Estos modelos se utilizan para entender la sensibilidad del clima a cambios sobre la constante solar o el albedo planetario. Si el balance es positivo, se produce un calentamiento; si es negativo, un enfriamiento. Este balance, promediado a nivel mundial y durante largos periodos, ha de ser igual a cero (IPCC, 2007). Aunque los modelos de balance de energía son considerados simples, puesto que se limitan únicamente a calcular la temperatura, también son considerados una herramienta importante para el estudio y entendimiento de los cambios climáticos, por su facilidad para entender los procesos que simulan (Lohmann, 2020).

2. Modelos radiativos-convectivos: son modelos unidimensionales que determinan la distribución vertical de la media global de la temperatura de la atmósfera y la superficie terrestre. Estos modelos se integran horizontalmente a nivel global y tratan con mucho detalle los procesos relacionados con la transferencia de radiación infrarroja y solar en la atmósfera. Simulan la transferencia de energía, a través de la altura de la atmósfera bajo la suposición de equilibrio radiativo-convectivo. Pueden calcular la temperatura y la humedad de diferentes capas de la atmósfera (Harvey et al., 1997; Llebot, 2009).
3. Modelos de circulación general: los GCM (por sus siglas en inglés) son modelos globales tridimensionales en los que las variables

dependen de las coordenadas horizontales, la latitud, la longitud y la altura. Estos modelos simulan el clima usando técnicas numéricas de la predicción meteorológica, pero de manera más compleja (Harvey et al., 1997). Existen tres categorías: 1) modelos de circulación general de la atmósfera (AGCM), que incluyen sólo la interacción de la atmósfera con la superficie terrestre; 2) modelos acoplados atmósfera-océano (AOGCM), los más complejos al intentar simular los sistemas de circulación en la atmósfera y en el océano, que contribuyen al transporte horizontal y vertical del calor y del vapor de agua, entre otros parámetros climáticos; 3) modelos del sistema terrestre (ESM), que incluyen ciclos e interacciones, así como cambios de vegetación y uso de suelo, que afectan la forma en que el clima responde a las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por los humanos.

Los GCM parten de una estructura atmosférica dada, como la composición atmosférica al inicio de la Revolución industrial, y simulan la evolución de la circulación general en la atmósfera por décadas e incluso siglos (Harvey et al., 1997). Estos modelos han sido desarrollados para representar las propiedades estadísticas de la atmósfera en grandes escalas de tiempo y espacio, y son los modelos que se utilizan principalmente para simular “escenarios de cambio climático”.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El desarrollo de los modelos climáticos, y en particular los GCM, nos ha llevado al siguiente paso: plantear escenarios de cambio climático. Estos escenarios son herramientas fundamentales para establecer medidas de mitigación al cambio climático antropogénico y de adaptación a sus posibles consecuencias. Una de las primeras preguntas que surgió respecto a estos escenarios es si deben considerarse como pronósticos del

clima futuro. La respuesta es no. Un escenario de cambio climático es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de una posible evolución futura del clima. Es decir, no son predicciones, sino posibilidades, que dependen de factores cuyo desarrollo no siempre se puede prever, como eventos naturales extremos, el impacto de actividades antrópicas y la variabilidad interna propia del clima (Gaertner et al., 2011; Harvey et al., 1997; IPCC, 2007). Los escenarios constituyen un instrumento heurístico para abordar preguntas sobre cómo afectarán diversos factores al clima y cuáles podrían ser las consecuencias sobre los sistemas humanos y naturales (Escoto Castillo et al., 2017).

En el caso del cambio climático antropogénico, uno de los elementos clave es la creciente acumulación de gases de efecto invernadero (GEI). La evolución futura en la concentración de los GEI depende de muchos factores, tanto económicos como sociales (Gutiérrez Escajeda et al., 2016). La trayectoria que seguirán estos desarrollos dependerá de múltiples elementos, como el crecimiento económico, las innovaciones tecnológicas y la demografía. Ante esta dificultad, se han desarrollado escenarios de emisiones antropogénicas de GEI, considerando diversos supuestos sobre el futuro desarrollo demográfico y socioeconómico a nivel mundial. De este modo, al integrar estos escenarios de emisiones en un modelo climático, se generan proyecciones del clima futuro, considerando las diferentes trayectorias de concentración de GEI. Como resultado, se obtiene una serie de posibles futuros para el clima, de acuerdo con la información disponible. Todos los escenarios propuestos están condicionados a una gran cantidad de factores, como supuestos, parametrizaciones, simplificaciones, datos, capacidad de modelación y el conocimiento disponible.

Hasta la fecha se han generado cuatro conjuntos de escenarios de cambio climático, publicados por el IPCC. El primer conjunto de escenarios, denominado IS92, se publicó en 1992 y representó un avance significativo al mostrar los primeros escenarios mundiales que

proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero (Leggett et al., 1992). Para el tercer informe del IPCC, en el año 2000, se publicó una segunda generación de escenarios descritos en el Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES, por sus siglas en inglés). Estos escenarios representan situaciones futuras posibles, organizadas en cuatro familias básicas de emisiones de GEI. Las emisiones están determinadas por posibles realidades sobre el desarrollo demográfico, económico, uso de energía y sostenibilidad al finalizar el siglo XXI. Estas familias son:

1. Familia A. Economía no influenciada por la sostenibilidad; prevalecen las actividades antropogénicas alejadas del cuidado del medio ambiente, sin restricción en las emisiones de contaminantes al aire y al agua.
2. Familia B. Economía orientada a la sostenibilidad ambiental.
3. Familia 1. La población mundial disminuye después de un máximo en 2050.
4. Familia 2. La población mundial sigue creciendo (IPCC, 2007).

La combinación de estas familias genera cuatro líneas evolutivas: A1, A2, B1 y B2. Cada una describe diferentes trayectorias de desarrollo social, económico, demográfico, tecnológico y ambiental. Los escenarios A2 y B2 representan situaciones extremas con un desarrollo social y económico no sostenible. Esta generación de escenarios se distinguió por representar un mayor número y variedad de trayectorias de desarrollo socioeconómico y de uso de recursos naturales, además de redefinir las principales fuerzas motoras que impactan las emisiones de GEI, haciendo explícita la modelación de los cambios esperados en las sociedades humanas (Escoto Castillo et al., 2017).

En 2014, en su quinto informe de evaluación, el IPCC presentó nuevos escenarios llamados trayectorias de concentración representativa

(Representative Concentration Pathways, RCP). Los RCP son un conjunto de proyecciones que se centran únicamente en los componentes de forzamiento radiativo (la diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra y la devuelta al espacio), que sirven como insumos para la modelación climática. Estos escenarios se nombran según el nivel de forzamiento radiativo proyectado para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m². Los cuatro RCP comprenden: un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (Van Vuuren et al., 2011).

Para su sexto informe, el IPCC presentó nuevos escenarios que combinan las trayectorias de concentraciones representativas con cinco escenarios de trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). Los SSP describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico y condiciones ambientales, representados a través de narrativas y variables cuantitativas, que muestran cómo podría evolucionar el mundo en las próximas décadas y los desafíos que estos cambios suponen para implementar políticas de mitigación y adaptación. Las cinco narrativas son:

- Mundo sostenible (SSP1). Describe un mundo con una alta cooperación internacional, preservación de bienes comunes globales y metas centradas en el bienestar humano más que en el crecimiento económico. Se incrementa la inversión en salud y educación, reduciendo las desigualdades. Hay una mejora en la conciencia ambiental y respeto por la naturaleza, con un consumo orientado a minimizar el uso de recursos materiales y energía. Este escenario representa bajos desafíos para alcanzar medidas de mitigación y adaptación.
- A medio camino (SSP2). Describe un mundo donde el desarrollo socioeconómico y tecnológico no se desvía significativamente

de los patrones actuales. El crecimiento económico varía entre países, algunos avanzan significativamente y otros quedan rezagados, manteniendo desigualdades y diferencias en la capacidad para responder a los cambios sociales y ambientales. Hay cierta cooperación internacional, pero limitada a la búsqueda de los objetivos de desarrollo sostenible, lo que conlleva al deterioro continuo de los sistemas naturales. Este escenario enfrenta desafíos moderados para lograr medidas de mitigación y de adaptación, que varían entre y dentro de los países.

- Mundo fragmentado (SSP3). Describe un mundo con baja cooperación internacional, donde se priorizan las metas nacionales sobre las globales. La inversión en salud y educación disminuye, y la desigualdad aumenta. El progreso económico es gradual y el uso intensivo de los recursos naturales se mantiene, lo que, junto con una baja prioridad por resolver los problemas ambientales, conduce a una continua degradación ambiental. Este escenario presenta pocas opciones para medidas de mitigación debido al uso intensivo de recursos naturales, la dependencia de combustibles fósiles y la falta de cooperación internacional. El limitado desarrollo humano y el bajo crecimiento económico implican grandes desafíos para lograr medidas de adaptación.
- Inequidad (SSP4). Describe un mundo donde la brecha entre países desarrollados y en desarrollo se amplía debido a una reducida cooperación internacional. Las diferencias de inversión en capital humano y oportunidades económicas contribuyen a incrementar la desigualdad y la estratificación social tanto entre países como dentro de ellos. La cohesión social se deteriora y los conflictos e inestabilidad se vuelven más comunes. El sector energético se diversifica e invierte tanto en combustibles intensivos en carbono (por ejemplo, petróleo), como en fuentes de energía bajas en este elemento. Las estrategias ambientales se centran en

los problemas de las regiones de ingresos medios y altos. Este escenario representa pocas opciones en mitigación y grandes desafíos para alcanzar medidas de adaptación.

- Desarrollo impulsado por combustibles fósiles (SSP5). Describe un mundo donde los mercados globales se vuelven más integrados, con alta cooperación internacional y mejoras tecnológicas. Hay inversiones significativas en desarrollo social y crecimiento económico, como en educación y salud. Sin embargo, el crecimiento socioeconómico está ligado a la sobreexplotación de combustibles fósiles y a un estilo de vida altamente demandante de energía. En consecuencia, los esfuerzos para implementar medidas de mitigación son elevados. Aunque las mejoras tecnológicas manejan eficientemente los problemas ambientales, sólo se consideran los retos actuales, sin planes de acción a futuro.

Las narrativas de los SSP los convierten en una herramienta para modelar las interacciones entre el desarrollo socioeconómico, las dinámicas demográficas y el cambio climático. Es importante destacar que estas narrativas no integran efectos del cambio climático, ya que no incluyen variables meteorológicas ni políticas climáticas sobre mitigación y adaptación. Si queremos imaginar un futuro dentro de una narrativa y cómo ésta podría modificarse para llegar a condiciones distintas de emisiones y, por lo tanto, a distintos futuros en términos de clima, los SSP se combinan con los modelos climáticos RCP, asociando así diferentes niveles de forzamiento radiativo. Las combinaciones posibles entre los RCP y las SSP dependerán de la congruencia de los niveles de emisiones y el funcionamiento interno de las narrativas (Escoto Castillo et al., 2017; Van Vuuren et al., 2011).

Tabla 1. Combinaciones plausibles de los escenarios SSP y RCP

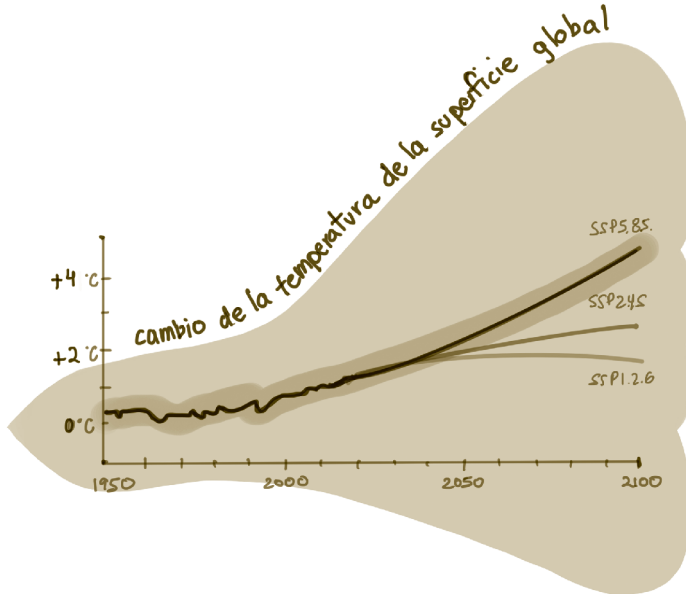
Forzamiento radiativo (w/m²)	8.5					SSP5-8.5	RCP8.5	Trayectorias de concentraciones representativas (CMIP5)
	7.0			SSP3-7.0				
	6.0				SSP4-6.0		RCP6.0	
	4.5		SSP2-4.5				RCP4.5	
	3.4				SSP4-3.4	SSP5-3.4		
	2.6	SSP1-2.6					RCP2.6	
	1.9	SSP1-1.9						
		SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	Trayectorias socioeconómicas compartidas (CMIP6)	

Fuente: modificado a partir de O'Neill y colaboradores (2016).

Como hemos podido ver, simular las posibles trayectorias que seguirá el clima ante distintos forzadores demanda procesos computacionalmente complejos, que resuelvan las interacciones entre los componentes del sistema climático y las distintas narrativas de desarrollo socioeconómico y demográfico. Estas simulaciones pueden llevar meses para un solo modelo global en un tiempo determinado. Ante esto, y con la finalidad de obtener la mayor cantidad de simulaciones posibles, los distintos centros de modelación climática han acordado poner disponibles sus simulaciones a través del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP), el cual inició en 1995 y cuenta con cinco fases: CMIP1, CMIP2, CMIP3, CMIP5 y CMIP6. En el CMIP5 se presentaron los escenarios RCP y en el actual CMIP6 se pusieron disponibles los escenarios SSP en combinación con los RCP correspondientes. Dentro de estas combinaciones se ha observado que sólo para los

escenarios SSP1-2.6 se logra mantener el incremento de temperatura por debajo del 1.5°C, conforme al Acuerdo de París. En los otros escenarios se rebasa ese incremento, siendo el SSP5-8.5 el escenario más extremo.

Ilustración 7. Aumento de temperatura simulado por tres diferentes escenarios (SSP)



Autoría: Adriana Corach.

LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO

La ciencia del cambio climático antropogénico, tal como la entendemos en la actualidad, está compuesta por varias disciplinas científicas. Su estudio involucra una variedad de campos que pueden trabajar de manera sinérgica o independiente para proporcionar una comprensión basada en la ciencia. Las ciencias atmosféricas, por ejemplo, se ocupan de todo lo relacionado con la atmósfera, abordando desde problemas locales como

la contaminación del aire en zonas urbanas hasta fenómenos globales inducidos por el ser humano, como el cambio climático (Zillman, 1997).

La climatología, una de las disciplinas más conocidas, se centra en el análisis de los patrones climáticos a lo largo del tiempo, utilizando datos meteorológicos y modelos climáticos. Estos modelos se basan en ecuaciones fundamentales de la física que ayudan a describir los procesos atmosféricos, oceánicos y terrestres (Rohli y Vega, 2017), mientras que la meteorología se enfoca en los fenómenos atmosféricos a corto plazo y contribuye a la comprensión de eventos climáticos extremos. La oceanografía desempeña un papel esencial al examinar las interacciones entre los océanos y la atmósfera, influyendo en la circulación oceánica y los patrones climáticos (Wallace y Hobs, 2006). Además, disciplinas como la biología y la agronomía son fundamentales para entender cómo el cambio climático afecta a los socioecosistemas y a las especies, desde la migración de animales hasta los patrones de floración de las plantas y la producción de alimentos (Hannah, 2015).

No son sólo las ciencias duras las que estudian el cambio climático; las ciencias sociales, como la sociología, la economía y la geografía humana, también son cruciales para comprenderlo (Barnes et al., 2013; Ford et al., 2016; Yearley, 2009). Estas disciplinas exploran cómo las comunidades humanas interactúan con el medio ambiente y cómo el cambio climático puede afectar los patrones sociales y económicos. Por ejemplo, se investiga la afectación por los impactos del cambio climático en la actividad económica de diferentes países (Yearley, 2009). Además, se analiza la incorporación de los conocimientos de los pueblos originarios en los informes nacionales, como las comunicaciones nacionales e internacionales, y los reportes del IPCC (publicados en 1990, 1995, 2001, 2007, 2014, 2022).

La ingeniería y las tecnologías también desempeñan un papel crucial al desarrollar soluciones para hacer frente al cambio climático. Los diseños orientados a aumentar la eficiencia energética, la gestión sostenible de desechos industriales, así como el desarrollo de soluciones

tecnológicas son formas en las que la ingeniería contribuye a mitigar los efectos del calentamiento global. Asimismo, existen ideas más radicales dentro de la ingeniería, vinculadas al campo de la geoingeniería, las cuales exploran la manipulación a gran escala del medio terrestre con el objetivo de contrarrestar algunos de los efectos del cambio climático (Augustine et al., 2019; Morrison et al., 2022). Aunque la geoingeniería, mediante la gestión de la radiación o la captura de dióxido de carbono, podría reducir los gases con efecto invernadero en la atmósfera, existen riesgos e incertidumbre, ya que ninguna de las técnicas propuestas ha demostrado funcionar y el beneficio puede ser mayor al costo económico y ambiental (Shepherd, 2009).

Ilustración 8. Disciplinas que participan en el estudio del cambio climático



Autoría: Adriana Corach.

En este contexto, la ciencia del cambio climático emerge como un campo crucial para comprender los fenómenos que afectan a nuestro planeta. En México, las instituciones encargadas de impulsar el progreso científico en este ámbito se concentran en organismos académicos, públicos, paraestatales y gubernamentales, constituyendo el 90% de la investigación total (Tejeda-Martínez y Rodríguez Viqueira, 2007). A partir de revisiones de la literatura sobre el estado del conocimiento de la ciencia del cambio climático, es posible observar que varias instituciones han contribuido al desarrollo científico sobre el cambio climático en nuestro país, en el que resalta el papel de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Entre sus entidades se destacan el Instituto de Geografía y el actual Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, los cuales tienen como misión principal fomentar la investigación, la difusión del conocimiento y la formación de recursos humanos en diversas disciplinas relacionadas con el cambio climático. El Instituto de Geografía se enfoca en estudiar la geografía básica y aplicada al territorio y sus recursos naturales, sociales y económicos, mientras que el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático se dedica al estudio de la física detrás de las ciencias atmosféricas y, recientemente, a estudiar los impactos potenciales del cambio climático sobre distintos sistemas sociales y biológicos como la economía del país, la agricultura, las enfermedades, las especies silvestres y los ecosistemas.

Otras instituciones de la UNAM que han desarrollado investigaciones enfocadas a entender la respuesta de las especies y los ecosistemas frente al cambio climático son el Instituto de Biología y el Instituto de Ecología. El primero alberga las colecciones nacionales y realiza estudios para el descubrimiento, descripción y documentación de la biodiversidad, mientras que el segundo realiza estudios de sostenibilidad, evolución, genética y ecosistemas. Ambos generan información para la conservación, restauración y uso sostenible de la biodiversidad, con el propósito de mejorar el bienestar de las personas.

Entre otras instituciones que han contribuido al desarrollo y crecimiento de la ciencia del cambio climático en el país se encuentra el Instituto Politécnico Nacional (IPN), con sus diversos centros de investigación, además de los centros públicos de investigación, como el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en Baja California y el Instituto de Ecología, A.C.

En el caso de organismos paraestatales y gubernamentales, existen entidades adscritas a la Secretaría de Medio Ambiente que se enfocan en el desarrollo y aplicación de la ciencia del cambio climático. Entre ellas, destacan el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). También es relevante el papel de instituciones como la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), que desempeñan un papel importante al impulsar el desarrollo científico del país en el área del cambio climático antropogénico.

Sin duda, muchas instituciones han contribuido a ampliar nuestro entendimiento sobre el origen, impacto, adaptación y mitigación del cambio climático antropogénico en México. Esto es sólo una muestra de aquellas que históricamente han aportado en este campo. Los resultados del conocimiento generado por estas instituciones y las diversas disciplinas que desarrollan han fortalecido el conocimiento científico del país, respaldando así la toma de decisiones informadas.

Es crucial reconocer que el cambio climático no sólo es un fenómeno ambiental, sino también un desafío socioeconómico que afecta de manera desproporcionada a comunidades vulnerables. En México, donde la dependencia de actividades como la agricultura es alta, las variaciones en los patrones climáticos pueden tener consecuencias directas en la seguridad alimentaria y en la economía local. La ciencia del cambio climático, por lo tanto, no sólo busca entender los mecanismos detrás de estos

cambios, sino también proporcionar herramientas para la planificación y la toma de decisiones informadas. La creación de modelos climáticos regionales más precisos, la identificación de áreas de mayor riesgo y la promoción de prácticas de mitigación son áreas clave de investigación que pueden guiar las políticas y las acciones concretas.

La conexión entre la ciencia del cambio climático y las políticas públicas es cada vez más evidente. México ha adoptado un papel activo en la búsqueda de soluciones a nivel internacional, comprometiéndose a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo prácticas sostenibles (Gay et al., 1995; INECC, 2018). Sin embargo, la traducción efectiva de la ciencia en políticas concretas sigue siendo un desafío, y es esencial que la sociedad en su conjunto comprenda la importancia de actuar de manera coordinada.

En 1995 se llevó a cabo el primer Estudio de País: México ante el Cambio Climático (Gay et al., 1995), liderado en aquel entonces por el Instituto Nacional de Ecología, actualmente el INECC, que dio pie a la participación de México en el desarrollo de las comunicaciones nacionales. Éstas se refieren a informes presentados por los países a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en cumplimiento de sus obligaciones bajo el artículo 12 del Acuerdo de la CMNUCC. La CMNUCC establece un marco para las negociaciones sobre el cambio climático y sienta las bases para otros acuerdos y protocolos relacionados. Dentro de los compromisos de la CMNUCC se acordó la realización anual de la Conferencia de las Partes (Conference of the Parties, COP). Durante esta reunión se llevan a cabo negociaciones con el fin de progresar en el logro de los objetivos establecidos por la CMNUCC. Desde la primera COP, México ha participado de manera activa y constante en este foro internacional, apoyado en diversas ocasiones por información científica desarrollada en el país.

Las comunicaciones nacionales proporcionan detalles sobre las políticas, programas y medidas que un país ha implementado para abordar el

cambio climático. Esto incluye información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las medidas para mitigar estas emisiones, los recursos movilizados y las acciones para adaptarse a los impactos del cambio climático. También incorpora evaluaciones de la vulnerabilidad de los sistemas humanos y ecológicos a los impactos del cambio climático, así como estrategias para enfrentar esos desafíos (ONU, 1992). La información contenida en estos informes reúne el conocimiento científico y tecnológico desarrollado por los países miembros, y muestra el avance del desarrollo en el conocimiento científico del país; es esencial para la transparencia y rendición de cuentas en el marco internacional para abordar el cambio climático; facilitan la evaluación global de los esfuerzos realizados por los países para enfrentar el cambio climático y ayudan a dar forma a las estrategias futuras para abordar este problema global.

Desde la implementación de esta iniciativa en México, se han elaborado seis comunicaciones nacionales (INECC, 2018). La primera de ellas fue publicada en 1997, y destacaba a México como uno de los primeros países en vías de desarrollo en presentar una comunicación de este tipo. El propósito de este documento fue proporcionar una visión integral de la situación de México frente al cambio climático antropogénico, y presentar el primer Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, con datos correspondientes al año 1991 (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [Semarnat], 1997). En dicho trabajo se abordaron los primeros estudios relacionados con la evaluación de la vulnerabilidad del país ante el cambio climático. Con esta información se marcó el comienzo de la manipulación y ajuste de los modelos de circulación general, destinados a representar la variación de las condiciones climáticas futuras.² Los primeros análisis de vulnerabilidad potencial se enfocaron en sectores clave como la agricultura, la desertificación y la sequía, los asentamientos humanos,

² Para más información sobre los modelos de circulación general (MCG), lea el apartado “Los escenarios del cambio climático” en este capítulo.

la hidrología, el sector de energía e industria, así como zonas costeras y ecosistemas forestales. Adicionalmente, se llevó a cabo una evaluación de la política energética del país, generando una serie de recomendaciones de mitigación. Estas sugerencias se centraron en la reducción de la quema de combustibles fósiles, la mejora de su calidad, así como en la promoción del ahorro y el uso eficiente de la energía (Semarnat, 1997).

La Segunda Comunicación Nacional, publicada en 2001, apareció un año después de la ratificación del Protocolo de Kioto en el Senado de la República. En este documento se actualizó el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, abarcando el periodo de 1994 a 1998. Este informe describe el impacto de las actividades productivas en sectores clave como la agricultura, el transporte, los desechos y la industria, y destaca su contribución al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, se presentaron políticas de mitigación, centradas principalmente en el sector energético, con un análisis sobre el uso eficiente de la energía en diversos sectores. Además, se examinaron políticas de mitigación en el ámbito forestal, con especial énfasis en la protección de los sumideros de carbono. En esta comunicación se incluyeron investigaciones sobre la calidad del aire y sus efectos en la salud de la población, particularmente en la zona metropolitana del Valle de México. Este enfoque sentó un precedente significativo para la formulación de políticas urbanas y se erigió como un referente clave en el diseño de políticas públicas a nivel internacional (Semarnat, 2001).

En 2006, se publicó la Tercera Comunicación Nacional, la primera que contó con el respaldo financiero del Fondo para el Medio Ambiente (Global Environment Facility, GEF). Este informe actualizó el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para 2002. Sin embargo, se implementó una nueva metodología que implicó recalcular las cifras correspondientes a los años 1990, 1992, 1994, 1996, 1998 y 2000. También se actualizaron las cifras relacionadas con el uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura para el periodo comprendido entre 1993

y 2002. En colaboración con el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM, se realizaron actualizaciones en los modelos prospectivos de cambio climático (INE y Semarnat, 2006).

En el contexto de esta comunicación se informó sobre el establecimiento de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), cuyo objetivo es coordinar las acciones de las dependencias y entidades de la administración pública federal en relación con la formulación e implementación de políticas nacionales destinadas a mitigar las emisiones de GEI y a adaptarse a los efectos del cambio climático. La comisión busca fomentar el desarrollo de programas y estrategias de acción climática en cumplimiento de los compromisos suscritos por México en la CMNUCC. Está conformada por los titulares de las secretarías de Relaciones Exteriores, Desarrollo Social, Energía, Economía, Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca, Comunicaciones y Transportes, y es coordinada, dentro de sus respectivas competencias, por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE y Semarnat, 2006).

En esta comunicación se detallan los resultados de un seminario coordinado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) para analizar las prioridades nacionales de investigación en cambio climático. El seminario estuvo conformado por un grupo selecto de especialistas y representantes de sectores con interés en los resultados de los estudios. Las conclusiones destacaron la necesidad de respaldar el desarrollo de capacidades y la integración de redes multidisciplinarias. Además, se subrayó la importancia de que el tema del cambio climático ocupara un lugar central en la investigación ambiental, y de que se promoviera el intercambio técnico e informativo con comunidades científicas de otros países. También se abogó por la generación de recursos nacionales destinados a impulsar la investigación en esta temática. Otro resultado importante es el aumento del 30% en el número de personas expertas o especialistas que trabajan en México en el ámbito del cambio climático, así como el surgimiento de nuevas instituciones dedicadas al desarrollo de trabajos en esta área (INE y Semarnat, 2006).

La Cuarta Comunicación Nacional, publicada en 2009, continúa la línea de los informes anteriores; actualiza el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero hasta el año 2006, en reemplazo de las cifras del inventario de la comunicación anterior. Es importante resaltar que, en 2009, se interrumpió la producción de aluminio, lo que resultó en la ausencia de emisiones de perfluorocarbonos desde 2004. Si bien hubo esta disminución, se informó sobre un aumento de aproximadamente el 40% en las emisiones de otros GEI durante el periodo de 1990 a 2006, lo que equivale a una tasa media anual del 2.1%. Cabe resaltar que este crecimiento fue inferior al desarrollo económico, indicando un desacoplamiento entre el crecimiento económico de México y las emisiones de GEI (INE y Semarnat, 2009).

En esta comunicación también se resaltaron los estudios sobre impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, con un enfoque especial en la construcción de nuevos escenarios que consideraran la actualización de las proyecciones de cambios en temperatura y precipitación realizadas por los científicos que trabajan del IPCC. Estos estudios resaltaron la escasez crítica de agua en algunos estados, el aumento de casos de dengue y la gradual disminución de la biodiversidad en extensas áreas del centro y norte del país. Se observó que estos fenómenos afectan no sólo la disponibilidad de agua y la productividad agrícola, sino que también tienen repercusiones en la salud humana y los ecosistemas forestales (INE y Semarnat, 2009).

En el análisis del panorama de expertos e instituciones científicas y técnicas en cambio climático realizado en esta comunicación, se registró un total de 858 especialistas, marcando un incremento notable del 150% en comparación con 2005. Este aumento revela un fortalecimiento en la capacidad de investigación y conocimiento en el país en el ámbito del cambio climático. La mayoría de este potencial de investigación, alrededor del 62%, se distribuyó en universidades, institutos y centros de investigación estatales, aunque destaca el papel que desempeñaron

las instituciones técnicas de las diferentes secretarías (INE y Semarnat, 2009).

En cuanto al desarrollo de políticas públicas e instrumentos de planificación, esta comunicación destaca la creación del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012, que por primera vez incorpora acciones específicas relacionadas con la mitigación y adaptación al cambio climático (INE-Semarnat, 2009). Adicionalmente, el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales estableció como meta la formulación e implementación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, que, junto con la publicación del Programa Especial de Cambio Climático (2009-2012), buscaba contribuir al cumplimiento de los objetivos del PND.

La Quinta Comunicación Nacional de México sobre Cambio Climático, publicada en 2012, presenta la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para el periodo de 1990-2010. En esta ocasión, se incorpora un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG), tanto para el futuro cercano (2015-2039) como para el futuro lejano (2075-2099).

La comunicación destaca la promulgación, en el mismo año, de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que convierte a México en el primer país en desarrollo en contar con una legislación integral sobre cambio climático. Las leyes generales, derivadas del Congreso de la Unión y basadas en cláusulas constitucionales, deben ser implementadas por las autoridades federales y locales. Su objetivo es consolidar el principio de corresponsabilidad entre el Estado y la sociedad en general, integrando el tema en diversas agendas de desarrollo sustentable, mediante la participación de los sectores público, privado, académico y de la sociedad civil.

La LGCC estableció la creación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) con el propósito de generar e integrar investigación en el ámbito de, justamente, la ecología y el cambio climático. Esta iniciativa tiene como finalidad respaldar la toma de decisiones. A partir

de su creación, el INECC fue designado como el ente responsable de llevar a cabo las subsiguientes comunicaciones nacionales.

En el ámbito de investigación y desarrollo tecnológico, la comunicación destaca que la mayoría de las investigaciones continúan enfocándose en aspectos de vulnerabilidad, impacto y riesgo. Por ello, se subrayó la imperiosa necesidad de fortalecer las investigaciones en dimensiones sociales, económicas e internacionales. A pesar de un aumento en el número de estudios e investigaciones en diversas instituciones nacionales durante este periodo y de una distribución en varias regiones del país, la Ciudad de México mantuvo su predominio.

Enfocándose en el periodo 2009-2012, la comunicación resalta la importancia de la educación en el cambio climático, abogando por su difusión entre la población infantil y juvenil. En la revisión de los programas de posgrado de diversas instituciones, se identificaron 67 que cuentan con estudios relacionados con medio ambiente y desarrollo sustentable, incluyendo posgrados específicamente enfocados en cambio climático. A pesar de este avance, la comunicación subraya la necesidad de fortalecer la capacitación y ofrecer cursos de posgrado para incrementar el número de profesionales cualificados en este ámbito, y mejorar así los esfuerzos nacionales para abordar los impactos del cambio climático.

La Sexta Comunicación Nacional de México sobre Cambio Climático, publicada en 2018, actualiza integralmente el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, cubriendo los sectores de energía, procesos industriales y uso de productos, agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, así como residuos, para el periodo de 1990 a 2015. El análisis del inventario revela un aumento sostenido de las emisiones, con una tasa media anual del 1.8% durante este periodo. Los sectores que más incrementaron sus emisiones fueron los de procesos industriales y uso de productos, junto con el sector energético. En cuanto a la emisiones por tipo de gas, destaca que tanto el dióxido de carbono (CO₂) como el metano registraron incrementos superiores al 1.5%

anual. Este aumento en las emisiones de CO₂ se atribuye principalmente al mayor uso de combustibles fósiles, mientras que el incremento en las emisiones del metano se relaciona con la gestión de residuos sólidos en rellenos sanitarios (INECC y Semarnat, 2018).

La comunicación también describe las estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en todos los ámbitos, enfocándose en avances tecnológicos, la promoción de alternativas energéticas y la implementación de regulaciones que promuevan el logro de las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC por sus siglas en inglés). Las NDC representan compromisos nacionales para reducir las emisiones y limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2°C, además de mejorar la capacidad de adaptación al cambio climático (Gobierno de México 2014, INEEC y Semarnat, 2018).

El concepto de las NDC surgió en 2013 durante la COP19, como parte del Acuerdo de París, donde los países se comprometieron a presentar sus propias estrategias para abordar el cambio climático. Ante la CMNUCC, México presentó sus contribuciones previstas y determinadas a nivel nacional, basadas en la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero de 2013. En 2022, las NDC se actualizaron para cumplir con la Ley General de Cambio Climático, estableciendo nuevos compromisos de mitigación y adaptación, basados en la información científica disponible en la Sexta Comunicación Nacional.³

La Sexta Comunicación también desarrolla un marco conceptual para establecer parámetros que midan la vulnerabilidad de diversos sectores ante el cambio climático. Este marco, basado en los elementos de

³ Para obtener más información sobre las NDC, sus ejes, líneas de acción y cómo se relacionan con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como el progreso que México ha logrado para alcanzar sus compromisos para el 2030, se recomienda visitar el sitio México ante el Cambio Climático, en el siguiente enlace: <https://cambioclimatico.gob.mx/NDC/index.html>.

vulnerabilidad propuestos por el IPCC en 2007, consiste en la construcción de un índice que integre la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa del sistema evaluado. Diversas dependencias del gobierno mexicano, en colaboración con universidades y centros de investigación, han producido información sobre los aspectos de la vulnerabilidad frente al cambio climático (INECC y Semarnat, 2018).

El desarrollo de este marco conceptual refleja el compromiso de México con la evaluación rigurosa y la gestión efectiva de los impactos del cambio climático. Esta herramienta facilita la identificación de áreas vulnerables y la implementación de medidas de adaptación adecuadas. Una de sus virtudes es la capacidad para evaluar cada componente de forma independiente, lo que permite identificar los factores que inciden en la vulnerabilidad. A partir de este marco se han desarrollado estudios para evaluar la sensibilidad en sistemas sociales, agrícolas y biológicos aplicables a diferentes niveles de análisis territorial (INECC y Semarnat, 2018). Un ejemplo concreto de su aplicación es el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC), que orienta las acciones de adaptación a nivel nacional (INECC, 2019).

En cuanto a la investigación, se destaca que en 2013 el Programa de Investigación sobre Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (PINCC-UNAM) generó el Reporte Mexicano de Cambio Climático en 2015. Este informe recopila el estado del arte en torno a la investigación en México sobre la vulnerabilidad, adaptación, emisiones y mitigación del cambio climático (INECC y Semarnat, 2018). La comunicación ofrece un breve resumen organizado en cuatro temas: impacto, proyecciones climáticas, adaptación, emisiones y mitigación.

El tema más estudiado corresponde al impacto del cambio climático sobre los ecosistemas y su biodiversidad. En cuanto a las proyecciones climáticas, se abordan estudios relacionados con simulaciones para periodos históricos (paleoclimas), escenarios futuros y eventos extremos. Respecto al tema de adaptación, la comunicación destaca que es un área

emergente, con menos de 80 publicaciones hasta la fecha del reporte. Estos estudios se centran en sistemas rurales, como la pesca programada y la tala sostenible.

Asimismo, el tema de emisiones y mitigación es el segundo más estudiado después del de impactos. La comunicación resalta que la mitigación en ecosistemas es el tema predominante, seguido por la mitigación mediante el uso de energías alternativas, y, finalmente, los estudios relacionados con la determinación de factores de emisión generados por diversas fuentes (INECC y Semarnat, 2018).

La comunicación concluye esta sección proponiendo una agenda de investigación sobre el cambio climático en México. Destaca la necesidad de realizar más estudios sobre la adaptación en diversos sectores, y enfatiza la importancia de incluir el tema de la contaminación atmosférica y su relación con el cambio climático en la agenda científica. El objetivo es comprender los beneficios de la mitigación en términos de salud humana, preservación de ecosistemas y productividad agrícola.

En 2023 se publicó el libro *Estado y perspectivas del cambio climático en México: un punto de partida*, cuyo objetivo es resaltar la importancia de construir políticas públicas y otros instrumentos que permitan a México hacer frente al cambio climático. Al igual que las comunicaciones nacionales, este documento está principalmente dirigido a los tomadores de decisiones y, hasta el momento, representa una visión actualizada sobre el cambio climático en el país. Las contribuciones de este proyecto están organizadas en cuatro temas: 1) cambio climático en México: observaciones y proyecciones, 2) impactos en sistemas humanos y naturales de México: diagnósticos y proyecciones, 3) emisiones y políticas de mitigación en México, y 4) herramientas y recursos digitales (PINCC-UNAM, 2023).

En la línea de las comunicaciones nacionales, este reporte proporciona observaciones y proyecciones del cambio climático en México, abordando cambios en el clima, eventos extremos y el aumento del nivel del

mar. Asimismo, evalúa los impactos del cambio climático en diversos sectores del país, como la agricultura, la biodiversidad, los recursos hídricos y la salud humana. Ofrece un inventario exhaustivo de emisiones y analiza la política nacional de México para mitigar y adaptarse al cambio climático. Además, ofrece una visión integral del estado de la investigación sobre salud y cambio climático, destacando la identificación de enfermedades zoonóticas como efecto del cambio climático en la salud. Por último, incorpora una sección de herramientas y recursos digitales para la investigación del cambio climático (PINCC-UNAM, 2023).

A partir de la información de esta sección, es posible destacar que el análisis del cambio climático en México revela una estrecha interacción entre la ciencia y las políticas públicas. A lo largo de los años, México ha demostrado un compromiso activo en la búsqueda de soluciones a nivel internacional, reflejado en la presentación de sus contribuciones determinadas a nivel nacional ante la CMNUCC. Estas aportaciones se apoyan en el robusto trabajo científico llevado a cabo en el país, como lo demuestran las seis comunicaciones nacionales publicadas hasta la fecha. En conjunto, estos esfuerzos reflejan un compromiso continuo para la mitigar y adaptarse al cambio climático, y hacen un llamado a la acción concertada a nivel nacional e internacional para abordar este desafío global. Sin embargo, tanto a nivel nacional como internacional, persisten retos en la implementación efectiva de la ciencia en las políticas públicas, en algunos casos asociados a la falta de información sobre los impactos, la adaptación y las mitigaciones de los sectores más vulnerables al cambio climático.

REFERENCIAS

- Arguez, A. y Vose, R. S. (2011). The Definition of the Standard wmo Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6), 699-704. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2955.1>
- Ateş, M. E. (2022). Pioneers of the Ice Age Models: A Brief History from Agassiz to Milankovitch. *History of Geo-and Space Sciences*, 13(1), 23-37. <https://doi.org/10.5194/hgss-13-23-2022>
- Augustine, G., Soderstrom, S., Milner, D. y Weber, K. (2019). Constructing a Distant Future: Imaginaries in Geoengineering. *Academy of Management Journal*, 62(6), 1930-1960. <https://doi.org/10.5465/amj.2018.0059>
- Barnes, J., Dove, M., Lahsen, M., Mathews, A., McElwee, P., McIntosh, R., Moore, F., O'Reilly, J., Orlove, B., Puri, R., Weiss, H. y Yager, K. (2013). Contribution of anthropology to the Study of Climate Change. *Nature Climate Change*, 3(6), 541-544. <https://doi.org/10.1038/nclimate1775>
- Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich, Y. S. y Lorius, C. (1987). Vostok Ice Core Provides 160,000-Year Record of Atmospheric CO₂. *Nature*, 329(6138), 408-414. <https://doi.org/10.1038/329408a0>
- Barry, R. G. y Gan, T. Y. (2022). *The Global Cryosphere: Past, Present, and Future*. Cambridge University Press.
- Becker, R. T., Marshall, J. E. A., Da Silva, A. C., Agterberg, F. P., Gradstein, F. M. y Ogg, J. G. (2020). The Devonian Period. En F. M. Gradstein, J. G. Ogg, M. Schmitz y G. M. Ogg, (eds.), *Geologic Time Scale 2020* (pp. 733-810). Elsevier.
- Bol'shakov, V. A., Kapitsa, A. P. y Rees, W. G. (2012). James Croll: a Scientist Ahead of His Time. *Polar Record*, 48(2), 201-205. <https://doi.org/10.1017/S0032247411000301>
- Budyko, M. I. (1969). The Effect of Solar Radiation Variations on the Climate of the Earth. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 21(5), 611-619. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v21i5.10109>

- Callendar, G. S. (1938). The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 64(275), 223-240. <https://doi.org/10.1002/qj.49706427503>
- Cocks, L. R. M. y Torsvik, T. H. (2021). Ordovician Palaeogeography and Climate Change. *Gondwana Research*, 100, 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.09.008>
- Crawford, E. (1997). Arrhenius' 1896 Model of the Greenhouse Effect in Context. *Ambio*, 26(1), 6-11. <http://www.jstor.org/stable/4314543>
- Doloisio, N. y Vanderlinden, J. P. (2020). The Perception of Permafrost Thaw in the Sakha Republic (Russia): Narratives, Culture and Risk in the Face of Climate Change. *Polar Science*, 26, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100589>
- Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L. y Gachuz Delgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (ssp): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669-693. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Estrada, F., Papyrakis, E., Tol, R. S. y Gay-García, C. (2013). The Economics of Climate Change in Mexico: Implications for National/Regional Policy. *Climate policy*, 13(6), 738-750. <https://doi.org/10.1080/14693062.2013.813806>
- Ford, J. D., Cameron, L., Rubis, J., Maillet, M., Nakashima, D., Willox, A. C. y Pearce, T. (2016). Including Indigenous Knowledge and Experience in IPCC Assessment Reports. *Nature Climate Change*, 6, 349-353. <https://doi.org/10.1038/nclimate2954>
- Gaertner, M. Á., Gutiérrez, J. M. y Castro, M. (2011). Escenarios regionales de cambio climático. *Revista Española de Física*, 26(2), 34-41. <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/1331>
- Gay, C., Ruiz, L., Imaz, M., Conde, C. y Mar, B. (1995). *Memorias del Segundo Taller del Estudio del País: México ante el cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología. https://www.researchgate.net/publication/288567524_Memorias_del_Segundo_Taller_del_Estudio_del_Pais_Mexico_ante_el_cambio_climatico
- Gutiérrez Escajeda, M. T., Medellín Milán, P. y Ábrego Góngora, C. J. (2016). Factores determinantes de las emisiones de CO₂ asociadas al uso de

- combustibles en el sector industrial de San Luis Potosí. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 22-28. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67448742003.pdf>
- Hannah, L. (2015). Chapter 1-A New Discipline: Climate Change Biology. En L. Hannah (ed.). *Climate Change Biology* (pp. 3-11). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00001-9>
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Griggs, D. J. y Maskell, K. (eds.) (1997). *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC*. Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático. <https://archive.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf>
- Hearing, T. W., Harvey, T. H., Williams, M., Leng, M. J., Lamb, A. L., Wilby, P. R., Gabbott, S. E., Phol, A. y Donnadieu, Y. (2018). An Early Cambrian Greenhouse Climate. *Science advances*, 4(5). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5690>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Guillén Bolaños, T., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. A., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Hope, C. W., Payne, A. J., Pörtner, H.-O., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R. y Zhou, G. (2019). The Human Imperative of Stabilizing Global Climate Change at 1.5 °C. *Science*, 365(6459). <https://doi.org/10.1126/science.aaw6974>
- Hoffman, P. F. y Schrag, D. P. (2002). The Snowball Earth Hypothesis: Testing the Limits of Global Change. *Terra nova*, 14(3), 129-155. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00408.x>
- Howe, J. (2015). This is Nature; This is Un-Nature: Reading the Keeling Curve. *Environmental History*, 20(2), 286-293. <https://doi.org/10.1093/envhis/emv005>
- Hulme, M. y Mahony, M. (2010). Climate Change: What do We Know About the IPCC? *Progress in Physical Geography. Earth and Environment*, 34(5), 705-718. <https://doi.org/10.1177/0309133310373719>
- Hutchinson, G. E. (1954). The Biochemistry of the Terrestrial Atmosphere. *The Earth as a Planet*, (371-433). <https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1954eap..book..371H/0000371.000.html>

- Imbrie, J. e Imbrie, K. P. (1986). *Ice Ages: Solving the Mystery*. Harvard University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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*. https://www.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). *Glosario. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- Jackson, R. (2019). Eunice Foote, John Tyndall and A Question of Priority. *The Royal Society*, 74(1), 105-118. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0066>
- Landwehrs, J., Feulner, G., Petri, S., Sames, B. y Wagreich, M. (2021). Investigating Mesozoic Climate Trends and Sensitivities with a Large Ensemble of Climate Model Simulations. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36(6). <https://doi.org/10.1029/2020pa004134>
- Le Hir, G., Donnadieu, Y., Godd  ris, Y., Meyer-Berthaud, B., Ramstein, G. y Blakey, R. C. (2011). The Climate Change Caused by the Land Plant Invasion in the Devonian. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4), 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.08.042>

- Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J. A., Meira Filho, L. G., Meira, Mintzer, I., Wang, M.-X. y Wasson, J. (1992). Emissions Scenarios for the IPCC : an Update. En J. T. Houghton, B. A. Callender y S. K. Varney (eds.), *Climate Change: 1992 The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* (pp. 71-95). Cambridge University Press.
- Lin, J. y Qian, T. (2022). Earth's Climate History From 4.5 Billion Years to One Minute. *Atmosphere-Ocean*, 60(3-4), 188-232. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2082914>
- Llebot, J. E. (2009). Un breve relato sobre cómo podemos saber si cambia el clima. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), 128-140. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3309106>
- Lohmann, G. (2020). Temperatures from Energy Balance Models: the Effective Heat Capacity Matters. *Earth System Dynamics*, 11(4), 1195-1208. <https://doi.org/10.5194/esd-11-1195-2020>
- Magaña, V., López, L. C. y Vázquez, G. (2013). El pronóstico de lluvias intensas para la Ciudad de México. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 16(1), 18-25. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2013000100002
- Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2006). *México. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc3.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2009). *México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/666958/cuarta_Comunicacion.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2018). *México y las Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Resumen Informativo.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2019). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México*. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2021). *México ante el cambio climático*. <https://cambioclimatico.gob.mx/mitigacion-del-cambio-climatico/>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2018). *México. Sexta Comunicación Nacional y segundo informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/introduccion.php>
- Martínez, M., Lorenzo, E. y Álvarez, A. (2017). Los Ciclos de Milankovitch: Origen, Reconocimiento, Aplicaciones en Cicloestratigrafía y el estudio de Sistemas Petroleros. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 56-65. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.281>
- Melchin, M. J., Sadler, P. M. y Cramer, B. D. (2020). The Silurian Period. En F. M. Gradstein, J. G. Ogg, M. D. Schmitz y G. M. Ogg (eds.), *Geologic Time Scale 2020* (pp. 733-810). Elsevier.
- Moore, R. D., Spittlehouse, D. L., Whitfield, P. H. y Stahl, K. (2010). Weather and Climate. En R. G. Pike, T. E. Redding, R. D. Moore, R. D., Winkler y K. D. Bladon (eds.), *Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia* (pp. 47-82). Forrex.
- Morrison, T. H., Adger, W. N., Agrawal, A., Brown, K., Hornsey, M. J., Hughes, T. P., Jain, M., Lemos, M. C., McHugh, L. H., O'Neill, S. y Van Berkel, D. (2022). Radical Interventions for Climate-Impacted Systems. *Nature Climate Change*, 12(12), 1100-1106. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01542-y>
- Notz, D. (2020). A Short History of Climate Change. *EPJ Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600002>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K. y Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project

- (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/>
- Orndorff, R. C., Stamm, N., Craig, S., Edwards, L. E., Fullerton, D., Murchey, B., D'Erchia, T., Ruppert, L., Soller, D. y Tew Jr., B. (2007). Divisions of Geologic Time-Major Chronostratigraphic and Geochronologic Units. *Stratigraphy*, 6(2), 90-92. <https://pubs.usgs.gov/fs/2007/3015/fs2007-3015.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015a). *Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 21er período de sesiones, celebrado en París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015*. *United Nations Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015b). *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Paillard, D. (2006). What Drives the Ice Age Cycle? *Science*, 313(5786), 455-456. <https://doi.org/10.1126/science.1131297>
- Pech, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Chen, I.-C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H. I., Martin, V. y Williams, S. E. (2017). Biodiversity Redistribution under Climate Change: Impacts on Ecosystems and Human Well-Being. *Science*, 355(6332). <https://doi.org/10.1126/science.aai9214>
- Peng, S. C., Babcock, L. E. y Ahlberg, P. (2020). The Cambrian Period. En F. M. Gradstein, J. G. Ogg, M. Schmitz y G. M. Ogg (eds.), *Geologic Time Scale 2020* (pp. 733-810). Elsevier.
- Preto, N., Kustatscher, E. y Wignall, P. B. (2010). Triassic Climates State of the Art and Perspectives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 290 (1-4), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.015>

- Programa de Investigación sobre Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (PINCC-UNAM) (2015). *Reporte Mexicano de Cambio Climático*. <https://www.pincc.unam.mx/publicaciones/reportes-mexicano/>
- Programa de Investigación sobre Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (PINCC-UNAM) (2023). *Estados y Perspectivas del cambio climático en México: un punto de partida*. Programa de Investigación en Cambio Climático.
- Ratner, M. I. y Walker, J. C. G. (1972). Atmospheric Ozone and the History of Life. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(5), 803-808. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<0803:aoatho>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0803:aoatho>2.0.co;2)
- Raymo, M. E. y Ruddiman, W. F. (1992). Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate. *Nature*, 359(6391), 117-122. <https://doi.org/10.1038/359117a0>
- Rohli, R. V. y Vega, A. J. (2017). *Climatology*. Jones and Bartlett Learning.
- Rubio, J. M. V. (2013). El clima de la Tierra a lo largo de la Historia. En A. Alberola-Romá (coord.), *Clima, naturaleza y desastre. España e Hispanoamérica durante la Edad Moderna* (pp. 225-240). Universidad de Valencia.
- Sánchez-Santillán, N., Sánchez-Trejo, R., de la Lanza Espino, G. y Garduño, R. (2014). Evolución del clima a través de la historia de la tierra. *Revista reflexiones*, 93(1), 121-132. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-28592014000100009
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (1997). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/164169/Primera_Comunicacion_Nacional.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2001). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/data/file/164170/Segunda_Comunicacion_Nacional.pdf

- Shepherd, J. G. (2009). *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. The Royal Society. <https://royalsociety.org/news-resources/publications/2009/geoengineering-climate>
- Stuiver, M. (1978). Atmospheric Carbon Dioxide and Carbon Reservoir Changes: Reduction in Terrestrial Carbon Reservoirs Since 1850 has Resulted in Atmospheric Carbon Dioxide Increases. *Science*, 199(4326), 253-258. <https://doi.org/10.1126/science.199.4326.253>
- Taylor, D. y Davies, A. R. (2004). Human Vulnerability, Past Climatic Variability and Societal Change. En D. T. Herbert y J. A. Matthews (eds.), *Unifying Geography: Common Heritage, Shared Future*. (pp. 144-159). Routledge.
- Tejeda-Martínez, A. y Rodríguez-Viqueira, L. (2007). Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático de México. *Investigaciones geográficas*, (62), 31-43. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0188-46112007000100003&lng=es&tlng=es
- Torres-Puente, V. M. (2019). Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático. *Revista digital universitaria*, 20(1). <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. y Rose, S. K. (2011). The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*, 109(5), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vimal, S. (2017). Aerosols: Production and Effects. *International Journal of Research*, 4(3), 750-759. https://www.researchgate.net/publication/318084603_Aerosols_Production_and_Effects
- Walker, G. (2007). *Snowball Earth: The Story of a Maverick Scientist and his Theory of the Global Catastrophe that Spawned Life as We Know it*. Bloomsbury Paperbacks.
- Wallace, J. M. y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (vol. 92). Academic Press.

- Williams, G. E. (2000). Geological Constraints on the Precambrian History of Earth's Rotation and the Moon's Orbit. *Reviews of Geophysics*, 38(1), 37-59. <https://doi.org/10.1029/1999rg900016>
- Yearley, S. (2009). Sociology and Climate Change after Kyoto: What Roles for Social Science in Understanding Climate Change? *Current Sociology*, 57(3), 389-405. <https://doi.org/10.1177/0011392108101589>
- Zillman, J. W. (1997). Atmospheric Science and Public Policy. *Science*, 276(5315), 1084-1086. <https://doi.org/10.1126/science.276.5315.1084>

2. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático en la seguridad alimentaria de México

PRODUCIR SUFICIENTE NO ES SUFICIENTE
PARA ACABAR CON EL HAMBRE

Aunque la *suficiencia*, la *seguridad* y la *soberanía alimentaria* son conceptos estrechamente relacionados, no son lo mismo. La suficiencia alimentaria es producir el suficiente alimento como para abastecer la humanidad, mientras que la seguridad alimentaria implica tener acceso, físico y económico, a alimentos nutritivos e inocuos en todo momento (FAO, 2011). Este último concepto surgió en los años setenta y, en un principio, sólo consideraba la producción y disponibilidad de alimentos. En los años ochenta, se añadió el acceso físico y económico, y finalmente, en los noventa, se incorporaron la inocuidad y las preferencias alimentarias (Aguilar-Estrada et al., 2019). En 1996 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) decretó que la seguridad alimentaria es un derecho humano (2024). Para alcanzarlo, según el concepto más reciente, se requiere de cuatro dimensiones: disponibilidad física, acceso económico y físico, utilización y estabilidad (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023).

Un tercer concepto, surgido en 1996, es el de soberanía alimentaria (Vía campesina, 2024). Este concepto, además de incorporar las cuatro dimensiones de la seguridad alimentaria, enfatiza la importancia de que los países y los pueblos tengan la libertad de gestionar sus recursos alimenticios y de consumir alimentos de acuerdo con sus gustos, tradiciones, cultura y con respeto al ambiente. La soberanía alimentaria no sólo requiere suficiente producción y disponibilidad de alimentos, sino también que se considere la justicia social, económica y ambiental.

A pesar de que existe suficiencia alimentaria en el mundo, pues desde 2012 se produce suficiente alimento para abastecer a 10 000 millones de personas (Holt-Giménez et al., 2012), ni la seguridad ni la soberanía alimentaria se cumplen en su totalidad. Millones de personas siguen padeciendo hambre y muriendo por falta de alimento, siendo la principal causa la pobreza (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023). Por lo tanto, la simple producción de alimentos no es suficiente para eliminar la inseguridad alimentaria severa, que se manifiesta como hambre, ni aquella moderada y leve, que se relaciona con la malnutrición (FAO, 2011; Villagómez-Ornelas et al., 2014; Fierro-Moreno et al., 2023).

El hambre, definida como la privación de los alimentos, (Aguilar-Estrada et al., 2019), se ha exacerbado con eventos globales como la pandemia de covid-19, las guerras en Ucrania y Palestina, entre otros, lo que ha alejado a la humanidad de alcanzar el segundo objetivo de desarrollo sostenible: erradicar el hambre para 2030 (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023; UN, 2024). En 2022, entre 691 y 783 millones de personas padecieron hambre, un aumento significativo respecto a los niveles prepandémicos. Esto representa 122 millones más de personas afectadas en comparación con 2019. En 2021, el 42% de la población mundial (estimada en 8 000 millones de personas en noviembre de 2022) no tenía acceso a una dieta saludable, y se prevé que para 2030, el número de personas con hambre o subalimentación crónica descenderá a 600 millones de personas. Aunque esto representa una disminución en números absolutos en comparación

con la situación actual, esta cifra incluye 123 millones más de personas debido a la pandemia, y 23 millones adicionales a costa de la guerra en Ucrania (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023).

Cuando existen recursos económicos, otras causas pueden derivar en inseguridad alimentaria moderada y leve. Por ejemplo, el sistema de producción agroalimentario tiende a sobreproducir granos, grasas y azúcares en lugar de frutas y verduras (Kc et al., 2018). Este hecho aleja a las personas de la posibilidad de tener una dieta nutritiva y balanceada.

Los grupos más vulnerables a tener la seguridad alimentaria son los habitantes de zonas rurales y las mujeres (Botreau y Cohen, 2020). Dado que la población rural es considerada un grupo vulnerable, la tendencia global hacia la urbanización –se estima que para 2050 el 70% de la población vivirá en ciudades (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023)– podría ayudar a reducir su inseguridad alimentaria. Sin embargo, esta no es una solución lineal, ya que la alimentación en las zonas urbanas suele estar vinculada a un mayor consumo de calorías y alimentos procesados, lo cual no favorece una dieta saludable y puede llevar a la obesidad. Es importante implementar medidas que eviten que la urbanización promueva una alimentación poco saludable (mala y rápida). Si logramos que la urbanización impacte de manera positiva, debería resultar en un mayor acceso de tecnología e insumos en las zonas rurales, situación que potencialmente facilitaría el aumento en el rendimiento agrícola. Además, la concentración de personas en áreas urbanas podría facilitar la conservación de la biodiversidad, siempre y cuando aumente el rendimiento en las actuales zonas agrícolas. Proyecciones sobre el uso del suelo en las próximas décadas muestran que la agricultura podría representar un mayor riesgo para la conservación, si la frontera agrícola sigue expandiéndose (Mendoza-Ponce et al., 2018).

Ante la tendencia hacia la urbanización, es importante innovar para que las ciudades también produzcan su alimento, se alejen de los

alimentos hipercalóricos y tengan acceso a frutas y vegetales frescos. De lo contrario, la malnutrición por sobrepeso y obesidad, relacionada con la falta de seguridad alimentaria leve y moderada, se incrementará en las ciudades. En algunas urbes, la malnutrición podría deberse a que las personas optan por lo que está más fácilmente disponible o es más barato (Pirgon y Aslan, 2015). Es necesario impulsar los programas que fomenten la producción agrícola en zonas urbanas y periurbanas. Existe evidencia que muestra cómo la agricultura urbana puede cumplir con ciertos objetivos de desarrollo sostenible, ya que logra ser muy productiva sin necesidad de usar tantos insumos, además de que se consume de manera local. Este tipo de agricultura podría ser parte de la solución para alimentar de manera saludable a las personas en las ciudades, quitando presión a las zonas rurales y evitando la expansión de la frontera agrícola (Nicholls et al., 2020; Payen et al., 2022).

Entre las principales causas de la falta de seguridad alimentaria, además de las crisis económicas provocadas muchas veces por guerras y recientemente por una pandemia, se encuentra el cambio climático (Lake et al., 2012). El cambio climático ha tenido, tiene y seguirá teniendo un impacto importante en la suficiencia alimentaria, y por lo tanto en el acceso físico al alimento; agudiza la inseguridad alimentaria y aleja la posibilidad de alcanzar la soberanía alimentaria (Schmidhuber y Tubiello, 2007; Lake et al., 2012, Gitz et al., 2016). Es necesario implementar medidas de adaptación y mitigación frente al calentamiento global y al fenómeno de la isla de calor en las zonas urbanas. La isla de calor es un fenómeno climático relacionado con la falta de albedo en ciudades, debido a la transformación del uso de suelo (Phelan et al., 2015). En lugar de vegetación y cuerpos de agua, predominan las edificaciones y el concreto, lo que acelera el calentamiento de la zona. La agricultura urbana podría funcionar como una manera de mitigar el cambio climático, además de producir alimento para consumo local.

Ilustración 9. Factores que influyen en la seguridad alimentaria



Autoría: Adriana Corach.

LA SEGURIDAD ALIMENTARIA EN MÉXICO

En 2019, un estudio de Aguilar-Estrada y colaboradores propuso inferir los diferentes niveles de la seguridad alimentaria en México a través de cuatro variables que representan las cuatro dimensiones de la seguridad alimentaria: 1) índice de marginación (disponibilidad), 2) nivel de ingreso para cubrir necesidades básicas (acceso económico), 3) preocupación de la población de que la comida se acabe (abastecimiento) y 4) percepción de los hogares con relación a la sanidad y variedad de su dieta (estabilidad). Los resultados arrojaron que el 78% de los hogares en México enfrenta problemas en al menos uno de los indicadores de la seguridad alimentaria, y el 15% presenta niveles de inseguridad alimentaria severa o muy severa. Los estados identificados con mayor inseguridad alimentaria son Oaxaca, Chiapas y Guerrero; mientras que Baja California, Nuevo León, Ciudad de México y Coahuila se encuentran entre los estados con menor inseguridad alimentaria. Además, el estudio destacó que los indicadores de ingresos y gastos son los principales determinantes del bienestar de la población mexicana. En México, como en gran parte del mundo, el hambre está vinculada principalmente a la falta de acceso económico al alimento. Por lo tanto, para evitar que disminuya el bienestar de las familias y asegurar su acceso al alimento, es importante garantizar que el salario mínimo absorba la inflación y prevenir el empobrecimiento de las personas (León-Bon y Díaz-Bautista, 2020).

A pesar de las cifras de inseguridad alimentaria en México, el país evitó que la crisis sanitaria se convirtiera en una crisis alimentaria profunda, como ocurrió en otras partes del mundo. Entre 2018 y 2020, el 7.2% de la población mexicana estaba subalimentada (9.2 millones de personas), y para 2021 esta cifra disminuyó a 6.1% (7.8 millones de personas). El porcentaje de personas con hambre en México es considerablemente menor que el promedio mundial (9.2% contra 6.1%) (Coneval, 2023).

En México, la producción de autoconsumo es fundamental para reducir los niveles de inseguridad alimentaria severa en estas áreas. La agricultura da empleo al 13% de la población en el país, aunque sólo representa el 4% del PIB nacional (Shamah-Levy et al., 2017). Sin embargo, estas cifras no reflejan la importancia que tiene esta actividad para la población rural de bajos recursos, que depende de su producción para garantizar al menos el acceso físico al alimento para el consumo local. Uno de los vínculos existentes más cercanos entre los agricultores mexicanos y sus cultivos es el caso del maíz (Ureta et al., 2013). El maíz sigue siendo el principal cultivo, con más del 50% de la superficie dedicada a su siembra (SIAP, 2024), y es la principal fuente de alimento para los pequeños agricultores del medio rural. Las razas nativas y los granos que preservan año tras año les garantizan semillas y un alimento relativamente seguro, apegado a sus gustos y tradiciones. Por esta razón, muchos pequeños productores mexicanos de maíz no han querido cambiar de variedades o razas para sembrar, conscientes de que preservar sus semillas implica mayor seguridad alimentaria.

Por otro lado, aunque las zonas urbanas en México tienen menor inseguridad alimentaria, existe un porcentaje significativo de inseguridad alimentaria moderada y leve asociada con el sobrepeso (Ponce-Alcalá et al., 2021). En México, el sobrepeso y la obesidad son una de las principales causas de mortalidad; este es un problema identificado hace más de una década (Fitzgerald et al., 2011) que, sin embargo, no ha disminuido (Barquera et al., 2020). Otro de los problemas que evitan alcanzar la seguridad alimentaria en el país es la ineficiente distribución, infraestructura de almacenamiento y dependencia alimentaria, lo que muchas veces genera también desperdicio (Ortiz et al., 2015). Finalmente, las catástrofes, como eventos climáticos extremos, también provocan inseguridad alimentaria en México, tanto en zonas rurales como urbanas. Se prevé que estos eventos serán más frecuentes e intensos debido al cambio climático, lo que pone en riesgo la suficiencia, la seguridad y la soberanía alimentaria.

NO ES SÓLO CUESTIÓN DE PRODUCIR, SINO TAMBIÉN DE CONSERVAR

Siempre que se menciona la seguridad alimentaria nos trasladamos mentalmente a la agroindustria, la ganadería y la pesca. Sin embargo, también existe una relación muy estrecha entre la conservación de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y la salud humana. Esta conexión es tan relevante que nos llevó a proponer el título de este libro, ya que los tres ejes que abordamos en torno al cambio climático se relacionan entre sí. Para lograr el bienestar humano, desde la salud hasta la seguridad alimentaria, es necesario garantizar el bienestar ecosistémico. En este libro, proponemos que el bienestar ecosistémico es el estado de equilibrio de un ecosistema que permite la persistencia de procesos ecológicos naturales y sus servicios ecosistémicos. Este bienestar se mantiene a través de mantener la resiliencia del ecosistema.

La dependencia de los ecosistemas naturales puede variar, pero es un hecho que todos dependemos de ellos. Alrededor de 1000 millones de personas dependen de alimentos que les proveen los ecosistemas naturales, como carne de caza, insectos, productos vegetales, hongos y pescado (FAO, 2020a). Se estima que la mayoría de estas personas tienen muy bajo poder adquisitivo, por lo que la conservación de los ecosistemas es clave para su seguridad alimentaria. Así, aunque expandir la frontera agrícola puede parecer beneficioso en el corto y mediano plazo, a largo plazo las repercusiones son negativas, ya que podríamos perder los valiosos servicios que proveen los ecosistemas bien conservados y que son esenciales para la producción de alimentos. Entre los servicios ecosistémicos más importantes para la seguridad alimentaria se destacan: la regulación del agua y del microclima, la protección al viento, la protección del suelo, el ciclo de los elementos nutritivos, la polinización y el control biológico de plagas. Por ejemplo, en el estado de Chiapas se realizó una valoración económica del control biológico de plagas proporcionado por murciélagos

en parcelas de maíz de temporal. Este cálculo, junto con entrevistas a diferentes productores étnicos de la zona, reveló que si las poblaciones de murciélagos disminuyen debido al cambio climático, la mayoría quedaría en una situación de inseguridad alimentaria severa (Ureta et al, s.f.).

La diversidad de biota que existe en los ecosistemas naturales facilita el acceso a una dieta variada de macro y micronutrientes para las personas que viven en zonas rurales, quienes son identificadas como un grupo vulnerable. En México, por ejemplo, los hongos comestibles silvestres son una fuente de proteína alternativa de excelente calidad. Para muchas comunidades rurales y todas las comunidades originarias, los hongos son un importante recurso natural durante la temporada de lluvias (Montoya et al., 2008; Alonso-Aguilar et al., 2014). Además, ha crecido el micoturismo y esta actividad también representa ingresos extra para las comunidades rurales (Jiménez-Ruiz et al., 2017). En África, un estudio encontró una importante relación entre la conservación de los bosques y la diversidad de la dieta en niños pequeños (Galway et al., 2018).

La conservación de los ecosistemas naturales también protege el acervo genético de parientes silvestres de importantes cultivos. Por ejemplo, el teocintle, pariente silvestre del maíz, tiene poblaciones viables en todo México, que es centro de origen y diversificación de este grano esencial para el mundo (Castillo González, 2009). Este pariente silvestre tiene características genéticas que podrían ayudar al mejoramiento genético de algunas variedades de maíz, ayudándolas a lidiar con la adversidad de los cambios en el clima.

El cambio climático es uno de los principales factores de la pérdida de biodiversidad y agrobiodiversidad, y puede tener un impacto negativo en la producción y rendimiento de productos agrícolas, pesqueros y ganaderos. Sin embargo, como hemos visto, expandir la frontera agrícola no es la solución. Si destruimos los sistemas naturales, las implicaciones para la seguridad alimentaria se reflejarán a corto plazo en la población rural, pero a mediano y largo plazo afectarán a toda la población. Además, los datos

actuales demuestran que más que aumentar la producción de alimentos, es necesario diversificar su acceso y reducir las carencias económicas.

Ilustración 10. Los servicios ecosistémicos son fundamentales para la seguridad alimentaria



Autoría: Adriana Corach.

Ilustración 11. Hongos comestibles silvestres que son un subsidio proteico de la naturaleza



Autoría: Adriana Corach.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: LA AGRICULTURA

Existe evidencia que muestra que todos los sistemas de producción de alimentos se han visto afectados de una u otra manera por el cambio climático antropogénico, lo que implica que la suficiencia alimentaria puede estar en riesgo, junto con la seguridad y la soberanía alimentaria (IPCC, 2023). A nivel mundial, los cambios en el clima han sido heterogéneos y se espera que lo sigan siendo en las próximas décadas (Fick y Hijmans, 2017). Por lo tanto, los impactos en los diferentes sectores de producción también han sido desiguales, dependiendo de la

región y las especies afectadas (IPCC, 2023). Además, los impactos pueden ser directos o indirectos. Se consideran impactos directos cuando los cambios en el clima afectan la integridad de una especie, ya sea por un evento extremo o a través de la fisiología de los organismos, causando estrés térmico e hídrico. Los impactos indirectos están relacionados con daños del cambio climático a otros organismos que tienen interacciones bióticas con la especie de interés o en la disponibilidad de recursos. Por ejemplo, las plagas de los cultivos han modificado su distribución debido a cambios en el clima, lo que implica que lleguen a regiones del mundo donde nunca habían estado y que posiblemente no estén preparadas para lidiar con ellas (Bebber et al., 2013).

Cuando se piensa en suficiencia alimentaria, lo primero que suele venir a la mente es la producción agrícola. Gracias a la agricultura, las comunidades humanas pudieron establecerse en lugar de estar trasladándose de un lugar a otro. Además, la agricultura abastece con el 80 % de la comida a la humanidad (Lowder et al., 2019). A pesar de que sólo tres granos representan el 60 % de la producción agrícola (trigo, maíz y arroz) (FAO, 2022a), existe una enorme agrobiodiversidad, representada por al menos 7 000 especies cultivadas (FAO, 2019) y 115 cultivos principales en el mundo (Klein et al., 2007), cada uno con requerimientos climáticos distintos. Por lo tanto, no podemos esperar una única respuesta al cambio climático. Incluso dentro de un mismo cultivo con alta diversidad y adaptaciones locales, se esperan respuestas diferentes bajo escenarios de cambio climático (Ureta et al., 2012). Lo que preocupa a la humanidad es implementar una estrategia que permita aumentar el rendimiento y la producción en las próximas décadas sin expandir la frontera agrícola, que es el límite entre las zonas donde se lleva a cabo actividad agrícola y las áreas de conservación.

El rendimiento está relacionado con qué tanto se produce en un área determinada, expresado en unidades como kg/ha o T/ha. El rendimiento es el resultado de la interacción entre el genotipo y el ambiente, por

lo que cambios en el ambiente o en el clima tienen un impacto directo en el rendimiento. Dado que los cambios en el clima serán variables, las respuestas van desde lo muy negativo hasta lo positivo. En algunas zonas, principalmente en latitudes al norte de los 55° –Canadá, Groenlandia, Islandia, Rusia (Liaqat et al., 2022)–, un aumento considerable de temperatura puede traer beneficios en términos de productividad agrícola, como una tasa de maduración acelerada, mayores rendimientos e incluso un efecto fertilizante debido al incremento de CO₂ de la atmósfera (Liaqat et al., 2022). Sin embargo, si la precipitación y la temperatura aumentan de manera simultánea, la evapotranspiración puede reducir la disponibilidad del agua para las plantas. En otras zonas geográficas del mundo los efectos directos del cambio climático pueden ser más severos, como el estrés térmico e hídrico, o los impactos indirectos, como la erosión del suelo por lluvias torrenciales, el incremento de enfermedades y plagas, la competencia por malas hierbas, y menos capacidad de planeación debido a la mayor incertidumbre (IPCC, 2023). A nivel global, se prevé una reducción promedio del 26% en la producción agrícola total para el horizonte de tiempo a 2080 (Cline, 2007).

A pesar de las proyecciones poco alentadoras de los estudios de impacto de cambio climático sobre la agricultura realizados en diversas partes del mundo desde finales del siglo xx y principios del xxi, la producción agrícola ha aumentado un 54% en las últimas dos décadas (2000-2021). Este aumento supera el crecimiento de la población mundial, que fue del 29% en el mismo periodo (FAO, 2022a). Sin embargo, como ya se mencionó, cientos de millones de personas padecen hambre en el mundo, por lo que erradicar el hambre es más complejo que producir lo suficiente (FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2023).

En México se registran anualmente los rendimientos de aproximadamente 162 especies de cultivo para la alimentación desde 2003 (SIAP, 2024). México es una de las cunas de la agricultura del mundo y centro de origen y diversificación del 15% de las plantas agrícolas (entre 60 y

100 especies cultivadas) (Perales Rivera y Aguirre Rivera, 2008). Entre las mayores contribuciones de México a la agricultura están: el maíz, el frijol, el algodón, el chile, la calabaza y el nopal.

De las especies de cultivo cuyo rendimiento se registra año con año, sólo algunas cuentan con estudios de impactos del cambio climático, la mayoría de los cuales están enfocados en el maíz por su importancia social, económica, biológica y cultural (Matsuoka et al., 2002; Piperno et al., 2009). En México tenemos una enorme agrobiodiversidad de maíz representada genéticamente en las especies nativas (Prasanna, 2012) y los parientes silvestres (Cruz-Cárdenas et al., 2019). Además, existe una estrecha relación con nuestras y nuestros productores, que son quienes siguen sembrando (Ureta et al., 2013; Santillán-Fernández et al., 2021). Hay otras especies de cultivo en México con estudios de impacto del cambio climático y proyecciones para diferentes escenarios, como el café, la caña de azúcar, el frijol, la calabaza, la alfalfa, el trigo y algunos árboles frutales, como la manzana.

En casi todos estos estudios se proyectan pérdidas en la idoneidad climática e impactos negativos en la fenología y por lo tanto se proyectan disminuciones en los rendimientos. Sin embargo, los datos observados del SIAP (2024) muestran que en los últimos 20 años no necesariamente ha habido decrementos en la producción ni en el rendimiento. Por ejemplo, el maíz ha mostrado una tendencia creciente en rendimiento y producción. Esta tendencia nos permite inferir que, aunque no hay una evidencia contundente registrada en la literatura científica, se han logrado aumentos en el rendimiento del maíz sin incrementos significativos en la superficie sembrada, lo que indica un desarrollo tecnológico que ha permitido amortiguar los impactos negativos del cambio climático hasta ahora. Es necesario analizar los datos generados hasta el momento en relación con otras especies de importancia alimentaria para entender mejor qué ha pasado con el cambio climático, sin necesariamente depender de proyecciones que implican incertidumbre e imprecisiones.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: GANADERÍA

Al igual que en la agricultura, es importante evaluar los impactos del cambio climático en la producción de alimentos de origen animal para identificar dónde enfocar recursos y esfuerzos. Conociendo los posibles impactos, se pueden desarrollar estrategias para amortiguar los efectos negativos en caso de ser necesario. Actualmente, en el mundo existen 1 526 millones de cabezas de ganado bovino y 953 millones de cabezas de ganado porcino (FAO, 2022a). Estos productos aportan entre el 17 y el 33% del suministro de calorías y proteínas per cápita (FAO, 2020b) y se producen en zonas que generalmente no son aptas para la agricultura (Herrero et al., 2013). Además de alimento, el ganado proporciona fuerza de tiro, transporte, fuente de nutrientes para el suelo y una fuente alternativa de ingresos que contribuye a la resiliencia de las comunidades humanas en todo el mundo. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para reducir el estrés de los animales y mejorar su calidad de vida, tanto para prevenir el maltrato animal como para mejorar la calidad de los alimentos que nos proporcionan (Bouzraa et al., 2023). Por ejemplo, durante el transporte de ganado a largas distancias, los animales sufren lesiones, infecciones, hambre, sed, frustración, miedo y estrés. Se prevé que esta situación empeorará con el cambio climático (Caulfield et al., 2014), por lo que, aunque ha habido esfuerzos para evitar malas condiciones en los traslados, es importante establecer reglas y lineamientos más estrictos, así como concientizar a las personas que manejan a los animales.

De manera similar al sistema de producción agrícola, los impactos directos del cambio climático sobre los animales de consumo humano están relacionados con el estrés hídrico y térmico, mientras que los impactos indirectos incluyen la aparición de nuevas enfermedades, escasez de agua y reducción en la calidad de alimento para ganado. El estrés térmico en reses y cerdos provoca una disminución en su consumo de alimento

y, en el caso del ganado bovino, reduce también la producción de leche. El estrés térmico disminuye la glucosa disponible para las glándulas mamarias, lo que reduce la producción de lactosa y ocasiona el 65% de la disminución en la producción de leche (Nardone et al., 2010). El otro 35% se debe a que los animales se alimentan de manera inadecuada cuando tienen calor (Rhoads et al., 2009). Este es un ejemplo de cómo las alteraciones en el entorno pueden causar cambios fisiológicos y metabólicos en los animales, afectando su desarrollo en general. En este sentido, se han documentado impactos en el crecimiento, la madurez y el proceso de embarazo de los animales debido al aumento de la temperatura (Tao y Dahl, 2013).

El estrés térmico también afecta las células del sistema inmunológico, aumentando la vulnerabilidad de los animales a las enfermedades. En el ganado bovino, el estrés térmico comienza a partir de los 25°C, mientras que en los cerdos la reducción del consumo de alimento se inicia a los 20°C. Las aves seleccionadas para favorecer su rápido crecimiento y eficiencia alimenticia son probablemente las más susceptibles al estrés térmico (Gaughan y Cawdell-Smith, 2015). Su rápido crecimiento conlleva tasas metabólicas más altas, lo que genera más calor interno y limita la capacidad del organismo para adaptarse a cambios en la temperatura. Los eventos extremos como las olas de calor, que consisten en varios días o semanas de temperaturas extremadamente altas, también representan un riesgo significativo, provocando la muerte de un importante número de animales (Vitali et al., 2015). Se espera que estas olas sean más frecuentes e intensas.

Además de los impactos directos, los animales pueden verse afectados indirectamente por la pérdida en la calidad y cantidad del alimento, al igual que por la escasez y calidad del agua (Godde et al., 2021; Cheng et al., 2022). A esto se suma el hecho de que las enfermedades y los vectores podrían cambiar su distribución, debido a alteraciones en los umbrales climáticos de las zonas en las que habitan (Lafferty, 2009;

Aulus-Giocosa et al., 2024). A mayores temperaturas las enfermedades también tienden a mostrar mayor virulencia (Koirala y Bhandari, 2019).

En México existe una importante producción de carne de ganado, con 8.41 millones de cabezas de res y 20.29 millones de cerdos, que generan 2.08 y 1.65 millones de toneladas de carne, respectivamente, y 12.56 millones de litros de leche (SIAP, 2024). Entre 1980 y 2020, el incremento en la producción no superó los dos puntos porcentuales (Basurto Hernández y Galindo, 2022). Proyecciones para 2050 y 2100 sugieren que será necesario un aumento en la producción de carne del 20 y 10%, aproximadamente (Basurto Hernández y Galindo, 2022), si se mantiene la tasa de consumo actual. Sin embargo, esta tendencia se basa en el supuesto de que la tasa de consumo de carne permanecerá, lo cual puede no cumplirse, dado que en países europeos el consumo de carne ha disminuido, lo que podría tener consecuencias económicas y sociales en este sector (Santini et al., 2017). En México existen alternativas que podrían suplir las proteínas de la carne de ganado, como los insectos (Abril et al., 2022) y los hongos comestibles silvestres, que podrían empezar a cultivarse (Burrola-Aguilar et al., 2012; Mata et al., 2013).

Hasta ahora, son pocos los estudios que se han centrado en los impactos potenciales del cambio climático en el ganado mexicano (Murray-Tortarolo y Jaramillo, 2019). No obstante, se reconoce que las afectaciones pueden surgir a raíz de cambios en las condiciones climáticas. El 80% del ganado en México se cría a pequeña escala, con menos de 35 cabezas, y la mayoría de los animales son de pastoreo extensivo, lo que hace que la cantidad y calidad de las hierbas y los pastos sea crucial para su bienestar. En general, las cabras son menos sensibles a los cambios en el clima, ya que tienen una dieta más diversa que las vacas. Aunque las cabras no representan una parte significativa de la producción de leche y carne a nivel nacional, sí son importantes para la seguridad alimentaria de pequeños productores.

En muchos casos, el poder adquisitivo define la capacidad de adaptación, pero un estudio liderado por Murray-Tartarolo y Jaramillo en 2019 sugiere que, en escenarios de cambio climático, los pequeños productores de ganado podrán cuidar mejor de sus pocos animales o trasladarlos de manera más fácil a zonas que tengan más y mejor alimento.

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN: LA PESCA

Este sistema de producción de alimentos beneficia a alrededor de 200 millones de personas en el mundo, desde la cosecha hasta la distribución (FAO, 2018). En los últimos 70 años, la producción pesquera y acuícola mundial ha aumentado de 19 millones de toneladas (1950) a 179 (2018). Aproximadamente la mitad de esta producción proviene de la pesca de captura (~90 millones de toneladas), y la otra mitad de la producción acuícola (FAO, 2022). Este aumento en la explotación de especies para alimentación ha llevado a varias poblaciones a niveles insostenibles, lo que implica que están en riesgo de desaparecer. Aunque en los años sesenta las especies con niveles insostenibles de explotación representaban el 10%, para 2019 esta cifra aumentó a 35.4% (FAO, 2022). El panorama de la pesca, ya complicado por la sobreexplotación, puede empeorar si no se actúa con cautela y se toman las medidas necesarias.

En algunas áreas costeras o islas pequeñas, la pesca representa el 50% de la ingesta proteica, siendo una actividad accesible y una fuente segura para zonas vulnerables en términos de seguridad alimentaria. El 90% de las personas dedicadas a la pesca lo hace a pequeña escala (Smith y Basurto, 2019; Arthur et al., 2022), lo que las hace vulnerables a cambios en el entorno.

En la pesca y la acuicultura, los impactos directos del cambio climático están relacionados con cambios en la temperatura del mar, salinidad, acidificación, bajas concentraciones de oxígeno y modificaciones en

los patrones de corrientes oceánicas. Estos cambios afectan la fisiología de las especies marinas, su crecimiento y los tamaños de poblaciones (Brander, 2010); además, impactan las tasas de crecimiento, desarrollo, reproducción, mortalidad, distribución y migración. Por su parte, los indirectos están relacionados con la composición de los ecosistemas (Deepanada y Macusi, 2012). La mayoría de los animales que se pescan o cultivan son poiquiloterms, lo que significa que dependen fuertemente de la temperatura ambiental para poderse mantener estables; su capacidad de dispersión es muy importante, pero también tiene consecuencias en las interacciones bióticas, como la competencia y la depredación. Esta es la explicación de cómo se afectará la composición de los ecosistemas marinos (Deepanada y Macusi, 2012). Además, el aumento de la temperatura reduce la solubilidad del oxígeno, disminuyendo su disponibilidad en el ambiente y afectando el metabolismo de las especies.

A pesar de que el panorama por cambio climático no es alentador para la pesca y la acuicultura en general, en algunos casos los cambios en la distribución de las especies generan condiciones propicias para que otros países se beneficien.

México, ubicado entre los océanos Atlántico y Pacífico, y con 160 sistemas lagunares, tiene un importante potencial pesquero y acuícola. De acuerdo con el Sistema de Estadística y Registro Pesquero y Acuícola de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (Conapesca), la flota pesquera se conforma de 76 306 embarcaciones: 2020 son mayores y 74 286, menores (Conapesca, 2024). La mayoría de estos pescadores, conocidos como ribereños, históricamente han vivido en condiciones poco favorables, con riesgos sanitarios y poco acceso a tecnología, instrumentos de trabajo y conocimientos administrativos. En cuanto a la producción acuícola, México cuenta con 9 230 unidades de producción, de las cuales 4 000 están dedicadas a la acuicultura rural y comercial, empleando cerca de 6 400 personas. En los últimos 10 años, la producción ha aumentado

en un 19%, pasando de 1.7 millones de toneladas en 2008 a 2.1 millones de toneladas en 2017.

Las regiones pesqueras de México se dividen en cuatro: Pacífico Norte, Pacífico Sur, golfo de México y mar Caribe, y aguas continentales, cada una con características propias en distintos niveles de desarrollo en materia pesquera y acuícola (Conapesca, 2024).

Al igual que en el sistema de producción de ganado, existe poca información sobre el cambio climático y la pesca en México. La información que ha surgido sobre impactos es más reciente que en el sistema de producción agrícola. Uno de los primeros estudios sobre este tópico, liderado por Martínez-Arroyo en 2011, examinó la vulnerabilidad de la pesca en México al cambio climático, considerando los problemas ecológicos y socioeconómicos que enfrenta. El estudio analizó los ecosistemas marinos donde se realiza la pesca y proyectó los resultados a dos horizontes de tiempo (2030 y 2050) bajo tres diferentes modelos de circulación general.¹ Se evaluó el incremento de la temperatura superficial, el nivel del mar y los cambios en los patrones de producción de peces en México. Se estudian 16 pesquerías que representan el 70% del volumen de pesca comercial nacional. Los resultados proyectaron, en general, una reducción de la biomasa de plancton, lo que reduce la riqueza de nutrientes y, por tanto, tiene un impacto significativo en la productividad de las aguas.

También se han realizado esfuerzos para estudiar las especies de atún más importantes en términos comerciales para México, en condiciones de cambio climático (Ayala-Duval y Maldonado-Monroy, 2019). En este caso, se espera que el calentamiento de las aguas, resultado del calentamiento global, tenga impactos significativos en las etapas tempranas de los atunes,

¹ Para más información, revisar el trabajo de Martínez-Arroyo et al. (2011) que aparece en referencias. Véase asimismo el apartado “Modelos climáticos”, donde se explica qué es un modelo de circulación general.

lo que afectaría negativamente el reclutamiento de individuos en la población y el tamaño de los adultos. Además, este artículo detecta impactos sinérgicos al cambio climático, como el consumo de microplásticos por parte de los individuos en las poblaciones de peces. Se reconoce la necesidad indispensable de seguir estudiando impactos potenciales para generar medidas adaptativas más efectivas (Ayala-Duval y Maldonado-Monroy, 2019).

En el golfo de California, también se ha evaluado el impacto del cambio climático en la pesca de camarones (Cota-Durán et al., 2021). Al igual que en las especies terrestres, se utilizó una herramienta ecológica de funciones matemáticas para modelar cómo podría cambiar la distribución de tres especies de camarones (*Litopenaeus stylirostris*, *Litopenaeus vannamei* y *Farfantepenaeus californiensis*). Las proyecciones sugieren que, si bien se va a mantener la mayoría de la distribución histórica de las especies, también habrá modificaciones en las áreas donde se esperan condiciones idóneas. La tasa de cambio en la temperatura de los océanos está ocurriendo tan rápidamente, que difícilmente las especies de camarones podrán adaptarse a través de procesos evolutivos, lo que podría provocar una modificación en su distribución y, por lo tanto, tener impactos en las zonas pesqueras del país (Cota-Durán et al., 2021).

Otro estudio examina el efecto del cambio climático sobre el pulpo *Octopus maya* (Ángeles-González et al., 2021). Se modeló su distribución en diferentes escenarios de cambio climático y se concluyó que habrá una reducción en la idoneidad climática para la especie, dado que las temperaturas por encima de los 30°C son particularmente perjudiciales.

En el golfo de México también se realizó un estudio de pesca (Brulé et al., 2022) que demostró que el incremento de la temperatura en el golfo altera el ciclo reproductivo y la diferenciación sexual de los peces de importancia comercial, modificando la proporción de sexos y reduciendo la fecundidad. Algunas especies que ya están siendo sobreexplotadas, como el *Epinephelus morio*, conocido comúnmente como *mero*, se vuelven extremadamente vulnerables al cambio climático por tener dos factores actuando

de manera simultánea. Aunque se desconocen los umbrales climáticos de algunas especies comerciales se asume que temperaturas superiores a los 30°C tienen efectos significativos en la reproducción, evidenciados en el desarrollo de oocitos, su maduración, tiempo de ovulación y desove, así como en la calidad de los huevos (Brulé et al., 2022).

Más allá de estos estudios sobre impactos, la información que se recaba sobre la pesca en México es limitada, especialmente en la pesca de aguas continentales. Por lo tanto, es importante enfocar esfuerzos en esta área para generar estrategias más efectivas que eviten la disminución de la producción en este sector.

EL CLIMA ESTÁ CAMBIANDO. ¿QUÉ HACEMOS PARA NO PONER EN MAYOR RIESGO LA SEGURIDAD ALIMENTARIA?

En la literatura científica, hasta ahora, existen más estudios sobre los impactos en sistemas biológicos y sociales que sobre su adaptación; sin embargo, se está dando una transición en esa dirección. Ya se tiene evidencia contundente de que el cambio climático antropogénico está ocurriendo y que esta situación afecta los sistemas de producción de alimentos, entre otros sistemas importantes como los ecosistemas (IPCC, 2022). La pregunta ahora es: como humanidad, ¿qué hacemos para evitar que se crezca la falta de seguridad alimentaria por el cambio climático?

A lo largo del siglo xx, los países desarrollados contaron con más datos provenientes de monitoreo de todo tipo, desde climáticos hasta biológicos. Sin embargo, como se ha mencionado, la severidad de las consecuencias del cambio climático depende, en parte, de la región del mundo donde se esté, y se prevé que las regiones tropicales –en su mayoría en países en desarrollo– serán las más afectadas en términos de producción de alimentos (IPCC, 2021). Afortunadamente, en las últimas dos décadas se ha generado más información para observar lo

que ha sucedido en los sistemas de producción en países en desarrollo. En México, por ejemplo, el monitoreo agrícola se realiza desde hace más de 20 años (SIAP, 2024), y los científicos del clima continuaremos generando información para entender mejor las respuestas de los organismos a las variables climáticas e inferir las respuestas de los sistemas de producción al cambio climático.

En nuestro primer capítulo se definieron diferentes conceptos de la ciencia del clima, con la finalidad de que los lectores tuvieran un mayor contexto al leer los siguientes apartados. La adaptación se definió como un proceso de ajuste para reducir el riesgo de impactos negativos. La adaptación se relaciona con tomar medidas y elaborar estrategias que aumentan la resiliencia de un sistema en cuestión o disminuyen la vulnerabilidad, mientras que la mitigación se relaciona con cómo llevar a cabo cierta actividad productiva reduciendo al mismo tiempo las emisiones de dióxido de carbono.

En el caso particular de México, como en otros países en vías de desarrollo, es importante considerar que existen diferentes tipos de productores tanto en el sector agrícola como en el ganadero y pesquero. En México, la mayor proporción de personas dedicadas a la producción de alimentos son pequeños productores, cuyas necesidades distan mucho de las de los grandes. Por tanto, es importante identificar necesidades y contextos para poder crear medidas y estrategias de adaptación y mitigación más eficientes. Para alcanzar estas propuestas, se requiere de un enfoque multidisciplinario que sea capaz de incorporar la mayor cantidad de variables ambientales y sociales posibles, para abarcar con mayor precisión el contexto de cada región.

Una medida de adaptación sencilla que aplica tanto a pequeña como a gran escala en la agricultura, ganadería y pesca es la diversidad biológica. La diversidad es la base de la selección natural y artificial (en el caso de los sistemas de producción y en la domesticación) y, en un mundo cambiante, tener más diversidad intra e interespecífica en los cultivos

(policultivos o no) aumenta la resiliencia del sistema. De manera similar, se puede hacer mejoramiento genético en los tres sistemas de producción de una manera tradicional, es decir, a través de la selección de individuos que poseen las características deseadas. Otra medida de adaptación, más sencilla tanto a pequeña como a gran escala, es la integración de los sistemas agrícolas, ganaderos y forestales, conocida como agrosilvicultura. Esta práctica aumenta la producción en una menor área, regula el microclima, mejora la calidad del aire, suelo y agua, proporciona control biológico de plagas y enfermedades, y mejora el ciclo de nutrientes (Toth y Reynolds Jr., 2020; Waring y Buchholz, 2023).

El ciclo de nutrientes mejora gracias a las distintas características de las especies que conforman este agrosistema y sus interacciones bióticas. Por ejemplo, el que los árboles tengan raíces más profundas les permite llegar a otro tipo de nutrientes a los que los cultivos no acceden. Cuando sus hojas caen, esta biomasa queda disponible en capas más superficiales del suelo. Las raíces de los árboles y arbustos reducen la erosión y, por tanto, la pérdida de nutrientes en el suelo. Además, la presencia de árboles atrae a otra biota y microbiota, como hongos micorrízicos y bacterias fijadoras de nitrógeno, que aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Finalmente, algunos árboles inhiben el crecimiento de malezas competidoras, o sus sombras impiden el crecimiento de otras hierbas.

En la agricultura, en general, lo que más se reporta en la literatura como medidas de adaptación –que además sucede con pequeños y grandes productores– es qué sembrar, dónde y cuándo. Se procura sembrar variedades o especies más resistentes a ciertas condiciones específicas, tomando en cuenta la humedad disponible del suelo. Ciertas variedades locales o especies tienen diferente capacidad de respuesta a ciertas condiciones ambientales, así como resistencia (Ureta et al., 2012). También, distintas especies de cultivo tienen diferentes requisitos de insumos y costos asociados a su producción. Una medida de adaptación muy importante es el riego, no sólo porque alivia el estrés hídrico, sino porque

también facilita la adaptación al estrés térmico y amplía las oportunidades de fechas de siembra (Ureta et al., 2020). Por estas razones, es fundamental democratizar el recurso del agua, principalmente en países en desarrollo donde las circunstancias de los productores pueden ser notablemente contrastantes (Ureta et al., 2020). En condiciones extremas, la única opción de adaptación podría ser la renta de los terrenos, el abandono de las tierras o la migración. Aunque estas medidas son válidas, no necesariamente representan una buena adaptación, pues puede haber una pérdida para el bienestar humano cuando la producción está vinculada con la identidad y la cultura de las personas.

Recientemente, se ha comenzado a utilizar un concepto nuevo en el sector de producción agrícola, la “agricultura climáticamente inteligente”. Este concepto plantea aumentar de forma sostenible la productividad, los ingresos, desarrollar resiliencia y disminuir la emisión de gases con efecto invernadero (Zhao et al., 2023). Algunas de las prácticas de la agricultura climáticamente inteligente consideran: 1) la agricultura de conservación (que incluye la rotación de cultivo para evitar la erosión del suelo y dejar rastrojo para retener agua en el suelo); 2) uso eficiente del agua (riego por goteo, transporte eficiente para evitar desperdicio); 3) diversificación de cultivos (distintos tipos de variedades y de especies para aprovechar todos los recursos de un espacio determinado, uso de variedades locales que están adaptadas a condiciones climáticas específicas, siembra de más plantas con metabolismo C4 cuyo proceso fotosintético está dividido espacialmente, lo que evita la pérdida de CO₂ por la fotorrespiración); 4) agroforestería (para amortiguar el microclima, aprovechar los árboles como sumideros de dióxido de carbono y una alternativa para mantener los servicios ecosistémicos, como la polinización y el control biológico de plagas); 5) práctica de manejo del suelo (aplicar abono orgánico y sembrar cultivos de cobertura con la finalidad de aumentar la salud del suelo y evitar la erosión) y 6) tener acceso a información meteorológica que facilite la toma de decisiones.

En el caso del ganado, para implementar medidas adaptativas y de mitigación, se requiere de un enfoque que tome en cuenta la nutrición, la salud animal y su entorno. Dadas las proyecciones de cambio climático, se espera escasez de agua en varias regiones del planeta. En las zonas ganaderas, al igual que en las agrícolas, se pueden enfocar esfuerzos de inversión para tener sitios de almacenamiento de agua pluvial. Además, sembrar árboles nativos en los pastizales y zonas de alimentación del ganado les proporciona sombra, reduce la necesidad de agua y disminuye la pérdida de agua por evaporación (Gaughan et al., 2019). Uno de los principales cambios de comportamiento de los animales bajo estrés térmico es la búsqueda de sombra, que se resuelve si hay árboles. Es importante saber qué árboles sembrar dependiendo de los ecosistemas, ya que esto asegura las interacciones bióticas óptimas y, por lo tanto, mantiene los servicios ecosistémicos. En cuanto a la nutrición, se podría modificar la composición de las dietas, ajustar los tiempos o la frecuencia de alimentación e incorporar productos agroforestales en la dieta del ganado (Thornton y Herrero, 2014). Otra medida adaptativa es la selección de características morfológicas que faciliten la adaptación a un entorno más cálido. Tres características del ganado, especialmente bovino, que ayudan a tolerar mejor el calor son el tipo de cabello, el tono del cabello y la cantidad de glándulas sudoríparas. Un pelaje liso, corto y fino favorece la disipación del calor, los tonos claros reflejan más la luz del sol y absorben menos energía, y la termotolerancia está directamente asociada con la cantidad de glándulas sudoríparas (Tesema et al., 2019). En la producción intensiva de ganado se puede reutilizar el agua para riego agrícola, siempre y cuando se maneje de forma apropiada. Incluso la orina tratada de manera adecuada puede utilizarse como fertilizante orgánico (Devasena y Sangeetha, 2022).

En cuanto a la mitigación en el sector ganadero, gran parte se relaciona con la alimentación, ya que el ganado emite el 12% de los gases de efecto invernadero (FAO, 2023). En México, la ganadería contribuye

aproximadamente con el 10% de estos gases (Galicia Naranjo et al., 2021). Aunque podría parecer que la opción más sencilla para reducir estas emisiones es abstenerse del consumo de ganado, la solución es compleja y no lineal (Scoones, 2023). Para empezar, se podría reducir la fermentación entérica mediante la mejora de la alimentación de los animales, aumentando, por ejemplo, el contenido de grasa (Martin et al., 2021), o mejorando la calidad del forraje (Hristov et al., 2013). También se deben promover áreas que, además de pastizales, incluyan árboles, lo que disminuiría la deforestación y fomentaría la absorción de carbono a través de la vegetación. Dada la contribución de este sector a las emisiones de gases de efecto invernadero, existe un gran potencial para la mitigación, aunque aún se sabe poco al respecto. Es importante identificar estas lagunas de conocimiento para dirigir los esfuerzos de investigación.

En el ámbito de la pesca es fundamental monitorear los ecosistemas marinos y las poblaciones de peces para evitar la sobreexplotación (Ziervogel y Ericksen, 2010). La mayoría de los documentos analizados en una revisión de la literatura científica (76%) (Poulain et al., 2018) se centran en estudios de caso sobre acciones de adaptación, observadas o implementadas, lideradas por el gobierno, el sector privado o las comunidades pesqueras. Entre las medidas de adaptación más reportadas se encuentran: cambiar el lugar de pesca, aumentar su diversidad y enfocarse en especies menos explotadas, utilizar diferentes artes de pesca, variar o cambiar los días y tiempos de pesca (Rahman et al., 2021; Galappaththi et al., 2021). Estas simples medidas aumentan la resiliencia del sistema y ayudan a minimizar los impactos; aunque generalmente son aplicadas por pequeños pescadores, también pueden ser implementadas por pesquerías medianas y grandes.

Para lograr la mitigación en la pesca, se requieren embarcaciones y métodos pesqueros eficientes en el uso del combustible (Bastardie et al., 2022). Recientemente se ha sugerido profundizar la investigación sobre cómo utilizar los desechos de productos pesqueros para elaborar

biodiésel, sobre todo cuando se dispone de grandes cantidades de grasa de pescado. Sin embargo, el mercado de biocombustibles aún enfrenta desafíos, como el generar una competencia entre el alimento y el combustible, lo que puede elevar el precio de los alimentos (Keyzer et al., 2008).

ESTUDIOS DE CASO SOBRE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTO EN MÉXICO

Si bien el número de estudios sobre adaptación al cambio climático en México es menor que el de impactos, encontramos algunos ejemplos en los sistemas de producción agrícola y pesquero. En el caso de la ganadería, la investigación sobre la adaptación al cambio climático es prácticamente nula.

Para este capítulo, se escogieron dos estudios de caso sobre adaptación en la producción agrícola: uno que muestra la importancia de la agricultura en terrazas en la Mixteca Alta del estado de Oaxaca (Bocco et al., 2019) y otro que se realizó en un distrito de riego que se encuentra entre Guanajuato y Michoacán (Toledo et al., s.f). Michoacán y Guanajuato están entre los estados que más producen maíz en México (Ureta et al., 2020), mientras que Oaxaca es parte del centro de origen y diversificación del grano (Matsuoka et al., 2022). Por tanto, lo que suceda con esta planta en Oaxaca debe ser de interés nacional e internacional por la enorme importancia que representa para la conservación de la agrobiodiversidad y el mejoramiento genético.

En el estudio liderado por Bocco en 2019, se entrevistó a 15 personas del Geoparque de la Mixteca Alta de Oaxaca para conocer su percepción sobre el aumento en la variabilidad climática y sus técnicas agrícolas (terrazas). La técnica de la terraza consiste en nivelar la tierra de zonas con pendiente en forma de plataformas horizontales, lo que evita la erosión del suelo y ayuda a retener la humedad. Es una técnica

agrícola milenaria que ha facilitado la agricultura en zonas montañosas. Las personas entrevistadas reconocieron un aumento en la variabilidad climática, evidenciado por sequías más prolongadas, disminución de la precipitación, incremento en la temperatura, aumento en la intensidad de las tormentas, y un inicio tardío de la temporada de lluvias. Esta información fue corroborada con datos climáticos de la zona. Algunas labores tradicionales se han modificado con el tiempo, como el uso de químicos en lugar del deshierbe con yunta, y el uso de fertilizantes en lugar de abonos naturales debido a la disminución del ganado. Las terrazas permiten aprovechar mejor los recursos del suelo, agua y nutrientes. A pesar del incremento en la variabilidad climática, los agricultores sólo han tenido que ajustar las fechas de siembra y continuar intercambiando las variedades de maíz cajete con las criollas, siendo las primeras más resistentes. ¿Qué tanto se podría trasladar esta técnica a otros sitios montañosos? Se tendría que llevar el perfeccionamiento de la técnica y evaluar las características específicas del sitio en cuestión. Lo interesante es que esta técnica lleva más de 3 000 años existiendo, lo que sugiere que, en ocasiones, es importante mirar al pasado para lidiar con el futuro.

El segundo estudio de caso en la producción agrícola en México que se presentará en este capítulo es el del distrito de riego 087. En este sitio, ya se están implementando medidas en campo que no necesariamente son recomendadas por la literatura científica o las políticas públicas (Toledo et al., s.f). Por ejemplo, aunque hay concordancia con algunas medidas como el cambio de fecha o de variedad (de ciclo largo a ciclo corto), otras recomendaciones provenientes de la agroecología, como mantener el rastrojo, no se están llevando a cabo. Esto revela que la información técnica no llega a campo, y cuando lo hace, no se acompaña del soporte técnico necesario para que se pueda mantener a través del tiempo. Los productores tienen problemas con el agua, principalmente los temporaleros que dependen completamente de la precipitación y que, al no tener acceso a

riego, tampoco lo tienen a seguros, lo que agrega un grado significativo de incertidumbre. Sin embargo, están abiertos a recibir capacitación y propuestas de nuevas técnicas que les faciliten la adaptación, especialmente a la sequía, que es lo que más les ha afectado a lo largo del tiempo (Toledo et al., s.f). Otra medida adaptativa que todavía no se lleva a cabo, pero que sería muy sencilla de implementar y que los productores solicitan, es el acceso a la información sobre el tiempo meteorológico. De esta manera pueden tomar decisiones sobre qué sembrar y cuándo. Dos aspectos relevantes de esta investigación son que: 1) las mujeres fueron consideradas como un grupo que está siendo discriminado por su condición de género, por lo que es muy importante tener perspectiva de género al momento de diseñar medidas y estrategias de adaptación; 2) se debe evitar que las personas recurran a una mala adaptación, es decir, que tomen medidas como rentar sus tierras para poder obtener un beneficio económico, aunque haya pérdida de identidad, tradiciones y cultura. El cambio climático, en términos de producción agrícola, y principalmente por tratarse de maíz en México, no sólo afecta la producción y el rendimiento, sino también el estilo de vida de las personas.

En cuanto a la producción ganadera, los estudios reportados en la literatura científica en México son sumamente escasos. En esta revisión, sólo se encontró un estudio de caso que abarca tres localidades (Vargas-López, 2018). El primero es en Tlaxcala y Puebla, y el segundo en Guerrero. En Tlaxcala y Puebla se entrevistó a productores de pequeña escala con un promedio de 55 ovinos. El autor sugiere que el tamaño del rebaño es en sí una medida de adaptación, pues facilita ajustarse a la disponibilidad de alimento. Los ovinos resultan convenientes por ser de talla pequeña, requerir poca inversión y demandar menos forraje en época de sequía, en comparación con el ganado bovino. Por lo tanto, el cambio de especie en ciertas zonas también puede sugerirse como medida adaptativa.

Existen algunas diferencias en cuanto a medidas adaptativas entre productores pequeños (32 ovinos) y medianos/grandes (54 y 180 ovinos,

respectivamente) de la zona estudiada. Los pequeños productores reportan el almacenaje de esquilmos agrícolas (residuos agrícolas como tallos, hojas y ramas) como alimento para ganado, mientras que los productores medianos (54 ovinos) y grandes (180 ovinos) deciden vender ovejas como una manera de reducir la carga.

En el caso del sitio de estudio en Guerrero, los productores tienen un promedio de 55 bovinos y su principal riesgo meteorológico es la sequía. La principal estrategia en esta localidad es el cambio de fuente de alimento, utilizando recursos forrajeros de cultivo de maíz y alimentos balanceados de la región. También suelen solicitar apoyo económico y técnico para la construcción de un corral de engorda, o rentan pasturas. Otra medida que están implementando es la compra de agua para sus animales. Los productores de bovinos medianos (54 bovinos) y grandes (180 cabezas) utilizan conocimientos de manejo de praderas, almacenamiento de forraje, y el uso de minerales y de alimento balanceado, lo que implica un uso externo de insumos.

Finalmente, en la pesca se escogió un estudio de caso del golfo de Baja California, en la región sur (Sievanen, 2014). Existen más estudios de caso para la pesca que para la ganadería en términos de cambio climático y adaptación, pero siguen siendo escasos y desarticulados. Se eligió este estudio de caso porque el golfo de Baja California es una de las regiones pesqueras más significativas de México. Esta investigación se enfocó en cómo los pescadores lidian con la variabilidad climática, aunque su actividad también está siendo afectada por otros factores como el turismo y la sobreexplotación de algunas especies. Se realizaron 60 encuestas a productores en 10 localidades del sur de Baja California Sur, quienes reconocen que ha aumentado la variabilidad climática. Una de las principales limitantes que enfrentan para lidiar con esta variabilidad es el declive de poblaciones de peces que históricamente habían aprovechado. Otra limitación es la implementación desigual de reglas, según las personas entrevistadas. Se percibe poco optimismo y piensan que ante

esta situación poco pueden hacer. También muestran frustración ante la pesca ilegal y la impunidad al respecto. Por otro lado, las medidas adaptativas a la variabilidad climática que tradicionalmente han implementado, como la movilidad y la diversificación, están siendo limitadas por nuevas regulaciones. Es indispensable establecer un nuevo diálogo con las autoridades para que se pueda seguir realizando este tipo de prácticas, aunque sea con más control, para evitar reducciones en las tasas de crecimiento poblacional de peces.

CONCLUSIONES

El hambre es y seguirá siendo un problema para la humanidad. Aunque se han logrado avances en acuerdos internacionales, la inequidad, los conflictos sociales y el aumento en la variabilidad climática nos han alejado del Objetivo de Desarrollo Sostenible: Hambre Cero para 2030. Desde hace años, se produce suficiente alimento para abastecer a la humanidad, pero este no siempre llega a donde más hace falta y a quienes más lo necesitan. Es fundamental enfocar esfuerzos en los grupos vulnerables, como las mujeres y las personas del medio rural, quienes además son consideradas las más vulnerables ante el cambio climático.

En las zonas rurales, las actividades de producción de alimentos para autoconsumo son indispensables y deben seguir siendo favorecidas para garantizar que estas personas tengan acceso constante, sin depender necesariamente de un ingreso económico. Con el aumento en la variabilidad climática, los pequeños productores desempeñan un papel crucial. Ellos tienen diversos recursos para lidiar con los cambios en el clima, como el uso de variedades de cultivos resistentes a condiciones adversas, la cría de morfotipos animales que les confieren características óptimas para afrontar un aumento en la temperatura (como el pelaje claro), la modificación de fechas de siembra y pesca, y el movimiento de animales de ganado.

La urbanización acelerada que experimentamos no es una alternativa para enfrentar la inseguridad alimentaria en un mundo cambiante. Los apresurados estilos de vida urbanos empujan a las personas a consumir alimentos hipercalóricos y poco nutritivos, lo que está relacionado con una inseguridad alimentaria leve a moderada. En este sentido, es crucial promover la producción de alimento en las zonas urbanas y periurbanas, ya que esto reduce la presión sobre las zonas rurales, mejora el microclima al reducir el efecto de isla de calor, y facilita el acceso a frutas y verduras frescas.

Al igual que en otras partes del mundo, el hambre en México está vinculada con la pobreza, no con la falta de producción de alimento. Existen estudios que presentan proyecciones desalentadoras ante escenarios de cambio climático en México en términos de producción de alimentos. Sin embargo, en la agricultura, los datos registrados por el SIAP (2024) muestran que, en los últimos 20 años, el rendimiento y la producción para algunos cultivos han incrementado. Es crucial mantener esta tendencia aumentando el rendimiento sin expandir la frontera agrícola, ya que la pérdida de biodiversidad conlleva la pérdida de servicios ecosistémicos y genera inseguridad alimentaria para los 1 000 millones de personas que dependen de los ecosistemas naturales para alimentarse (FAO, 2020a).

En el caso de la pesca, es importante escuchar las necesidades de los pescadores para crear reglamentos que todos puedan cumplir y que, al mismo tiempo, les permitan enfrentar la variabilidad climática. La misma situación se aplica a los productores de ganado. En México, la gran mayoría de las personas dedicadas a la producción de alimentos son pequeños productores. Es necesario reconocer los distintos tipos de productores para poder diseñar medidas y estrategias de adaptación al cambio climático que sean efectivas según sus diversas necesidades.

Existe una importante área de oportunidad para generar conocimiento en el ámbito de los impactos, la adaptación y la mitigación de los sistemas de producción de alimento ante el cambio climático, tanto a nivel

mundial como en México. La información sigue siendo escasa y, sin ella, estamos avanzando a ciegas en un mundo que cambia aceleradamente. Queda mucho por hacer.

REFERENCIAS

- Abril, S., Pinzón, M., Hernández-Carrión, M. y Sánchez-Camargo, A. del P. (2022). Edible Insects in Latin America: A Sustainable Alternative for Our Food Security. *Frontiers in nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.904812>
- Aguilar-Estrada, A. E., Caamal-Cauich, I., Barrios-Puente, G. y Ortiz-Rosales, M. A. (2019). ¿Hambre en México? Una alternativa metodológica para medir seguridad alimentaria. *Estudios Sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(53). <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.625>
- Alonso-Aguilar, L. E., Montoya, A., Kong, A., Estrada-Torres, A. y Garibay-Orijel, R. (2014). The Cultural Significance of Wild Mushrooms in San Mateo Huexoyucan, Tlaxcala, Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-27>
- Ángeles-González, L. E., Martínez-Meyer, E., Yáñez-Arenas, C., Velázquez-Abunader, I., López-Rocha, J. A., Torrejón-Magallanes, J. y Rosas, C. (2021). Climate Change Effect on *Octopus maya* (Voss y Solís-Ramírez, 1966) Suitability and Distribution in the Yucatan Peninsula, Gulf of Mexico: A Correlative and Mechanistic Approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 260, 107502. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107502>
- Arthur, R. I., Skerritt, D. J., Schuhbauer, A., Ebrahim, N., Friend, R. M. y Sumaila, U. R. (2022). Small-Scale Fisheries and Local Food Systems: Transformations, Threats and Opportunities. *Fish and Fisheries*, 23(1), 109-124. <https://doi.org/10.1111/faf.12602>
- Aulus-Giocosa, L., Bates, O. K., Bonnamour, A., Bujan, J., Gippet, J. M. W., Fenn-Moltu, G., Klaftenberger, T. y Bertelsmeier, C. (2024). Effects of Climate Change on Insect Distributions and Invasions. En D. González-Tokman y

- W. Dáttilo (eds.) *Effects of climate change on insects. Physiological, Evolutionary, and Ecological Responses* (pp. 203-240). Oxford University Press.
- Ayala-Duval, E. y Maldonado-Monroy, M. C. (2019). Tuna Fisheries and Global Warming in Mexico. En A. Ibáñez (eds.). *Mexican Aquatic Environments*. (pp. 165-179). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11126-7_7
- Bagath, M., Krishnan, G., Devaraj, C., Rashamol, V. P., Pragna, P., Lees, A. M. y Sejian, V. (2019). The Impact of Heat Stress on the Immune System in Dairy Cattle: A Review. *Research in Veterinary Science*, 126, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2019.08.011>
- Barquera, S., Hernández-Barrera, L., Trejo, B., Shamah, T., Campos-Nonato, I. y Rivera-Dommarco, J. (2020). Obesidad en México, prevalencia y tendencias en adultos. *Ensanut 2018-19. Salud pública de México*, 62(6), 682-692. <https://doi.org/10.21149/11630>
- Bastardie, F., Hornborg, S., Ziegler, F., Gislason, H. y Eigaard, O. R. (2022). Reducing the Fuel Use Intensity of Fisheries: Through Efficient Fishing Techniques and Recovered Fish Stocks. *Frontiers in marine science*, 9(817335). <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.817335>
- Basurto Hernández, S., Galindo Paliza, L. M. y Ríos Mohar, J. (2022). Impactos económicos potenciales del cambio climático en la ganadería: caso de México. *Problemas del desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 54(212), 27-54. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2023.212.69916>
- Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T. y Gurr, S. J. (2013). Crop Pests and Pathogens Move Polewards in a Warming World. *Nature Climate Change*, 3(11), 985-988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>
- Bocco, G., Solís Castillo, B., Orozco-Ramírez, Q. y Ortega-Iturriaga, A. (2019). La agricultura en terrazas en la adaptación a la variabilidad climática en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Latin American Geography*, 18(1), 141-168. <https://doi.org/10.1353/lag.2019.0006>
- Botreau, H. y Cohen, M. J. (2020). Gender Inequality and Food Insecurity: A Dozen Years After the Food Price Crisis, Rural Women Still Bear the

- Brunt of Poverty and Hunger. En M. J. Cohen (ed.), *Advances in Food Security and Sustainability* (pp. 53-117). Elsevier.
- Bouzraa, S., Agüera, E. I., Requena, F., Rodríguez, I. y Serrano, S. (2023). Influence of the Slaughter Method on the Hygienic Quality of Beef Cattle Meat and Animal Welfare Biomarkers. *Animals*, 13(6), 1014. <https://doi.org/10.3390/ani13061014>
- Brander, K. (2010). Impacts of Climate Change on Fisheries. *Journal of Marine Systems*, 79(3-4), 389-402. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.12.015>
- Brulé, T., Renán, X. y Colás-Marrufo, T. (2022). Potential Impact of Climate Change on Fish Reproductive Phenology: A Case Study in Gonochoric and Hermaphrodite Commercially Important Species From the Southern Gulf of Mexico. *Fishes*, 7(4), 156. <https://doi.org/10.3390/fishes7040156>
- Burrola-Aguilar, C., Montiel, O., Garibay-Orijel, R. y Zizumbo-Villarreal, L. (2012). Conocimiento tradicional y aprovechamiento de los hongos comestibles silvestres en la región de Amanalco, Estado de México. *Revista mexicana de micología*, 35, 01-16. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-31802012000100002
- Castillo González, F. (2009). Reseña de nuevo libro: Origen y diversificación del maíz. Una revisión analítica. *Revista fitotecnica mexicana*, 32(4), 1-2. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000400002
- Caulfield, M. P., Cambridge, H., Foster, S. F. y McGreevy, P. D. (2014). Heat Stress: A Major Contributor to Poor Animal Welfare Associated with Long-Haul Live Export Voyages. *The Veterinary Journal*, 199(2), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.018>
- Cheng, M., McCarl, B. y Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, 13(1), 140. <https://doi.org/10.3390/atmos13010140>
- Cline, W. R. (2007). *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*. Peterson Institute.

- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (Conapesca) (2024). *Programa Nacional de Pesca y Acuacultura 2020-2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/616554/PROGRAMA_Nacional_de_Pesca_y_Acuacultura_2020-2024baja.pdf
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (2023). *Líneas de pobreza por ingresos*. https://www.coneval.org.mx/Medicion/Documents/Lineas_de_Pobreza_por_Ingresos/Lineas_de_Pobreza_por_Ingresos_mar_2023.pdf
- Cota-Durán, A., Petatán-Ramírez, D., Ojeda-Ruiz, M. Á. y Marín-Monroy, E. A. (2021). Potential Impacts of Climate Change on Shrimps Distribution of Commercial Importance in the Gulf of California. *Applied Sciences*, 11(12), 5506. <https://doi.org/10.3390/app11125506>
- Cruz-Cárdenas, C., Cortes-Cruz, M., Gardner, C. y Costitch, D. (2019). Wild Relatives of Maize. En S. L. Greene, K. Williams, C. Khoury, M. B. Kantar, L. Marek (eds.), *North American Crop Wild Relatives* (pp. 3-9). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97121-6_1
- Deepananda, K. A. y Macusi, E. D. (2012). The Changing Climate and its Implications to Capture Fisheries: A Review. *Journal of Nature Studies*, 11(1-2), 71-87. <https://www.journalofnaturestudies.org/files/71-87-DeepanandaMacusi-full-1.pdf>
- Devasena, M. y Sangeetha, V. (2022). Cow Urine: Potential Resource for Sustainable Agriculture. En S. Mondal y R. L. Sing (eds.), *Emerging Issues in Climate Smart Livestock Production* (pp. 247-262). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822265-2.00007-7>
- Fick, S. E. y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fierro-Moreno, E., Lozano-Keymolen, D. y Gaxiola-Robles Linares, S. C. (2023). Inseguridad alimentaria en México: análisis de dos escalas en 2020. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(61). <https://doi.org/10.24836/es.v33i61.1282>

- Fitzgerald, N., Hromi-Fiedler, A., Segura-Pérez, S. y Pérez-Escamilla, R. (2011). Food Insecurity is Related to Increased Risk of Type 2 Diabetes Among Latinas. *Ethnicity and disease*, 21(3), 328-334.
- Galappaththi, E. K., Ford, J. D., Bennett, E. M. y Berkes, F. (2021). Adapting to Climate Change in Small-Scale Fisheries: Insights From Indigenous Communities in the Global North and South. *Environmental Science and Policy*, 116, 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.11.009>
- Galicia Naranjo, A. G., Ordóñez Díaz, J. O., Munguía Bárcenas, A. M., Mancera, N. V., Ortega Trevino, L. O. y Ordóñez Díaz, M. O. (2021). Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes del ganado en México, 1990-2018. *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, 12(3). https://rde.inegi.org.mx/wp-content/uploads/2022/01/RDE35_art06-1.pdf
- Galway, L. P., Acharya, Y. y Jones, A. D. (2018). Deforestation and Child Diet Diversity: A Geospatial Analysis of 15 Sub-Saharan African Countries. *Health and Place*, 51, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.03.002>
- Gaughan, J. B., Sejian, V., Mader, T. L. y Dunshea, F. R. (2019). Adaptation Strategies: ruminants. *Animal Frontiers*, 9(1), 47-53. <https://doi.org/10.1093/af/vfy029>
- Gaughan, J. y Cawdell-Smith, A. J. (2015). Impact of Climate Change on Livestock Production and Reproduction. En V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard y C. Prasad (eds.), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation* (pp. 51-60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_4
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C. D. y Braatz, S. (2016). *Climate Change and Food Security: Risks and Responses*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/a-i5188e.pdf>
- Godde, C. M., Mason-D'Croz, D., Mayberry, D. E., Thornton, P. K. y Herrero, M. (2021). Impacts of Climate Change on the Livestock Food Supply Chain; A Review of the Evidence. *Global Food Security*, 28, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>

- Herrero, M., Havlík, P., Valin, H., Notenbaert, A., Rufino, M. C., Thornton, P. K., Blümmel, M., Weiss, F., Grace, D. y Obersteiner, M. (2013). Biomass Use, Production, Feed Efficiencies, and Greenhouse Gas Emissions from Global Livestock Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20888-20893. <https://doi.org/10.1073/pnas.130814911>
- Holt-Giménez, E., Shattuck, A., Altieri, M., Herren, H. y Gliessman, S. (2012). We Already Grow Enough Food for 10 Billion People ... and Still Can't End Hunger. *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(6), 595-598. <https://doi.org/10.1080/10440046.2012.695331>
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H. P. S., Adesogan, A. T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P. J., Henderson, B. y Tricarico, J. M. (2013). Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Animal Operations: I. A review of Enteric Methane Mitigation Options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045-5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte, 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 y B. Zhou (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-32). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Summary for Policymakers. En H. O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller y A. Okem (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. 3-34). Cambridge University Press.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). Summary for Policymakers. En H. Lee y J. Romero (eds.) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Jiménez-Ruiz, A., Thomé-Ortiz, H., Espinoza-Ortega, A. y Bordi, I. V. (2017). Recreational Use of Wild Edible Mushrooms: Mycological Tourism in the World with an Emphasis on Mexico. *BOSQUE*, 38(3), 447-456. <https://www.revistabosque.org/index.php/bosque/article/view/409>
- Jochim, M. (2009). The Process of Agricultural Colonization. *Journal of anthropological research*, 65(2), 299-310.
- Kc, K. B., Dias, G. M., Veeramani, A., Swanton, C. J., Fraser, D., Steinke, D., Lee, E., Wittman, H., Farber, J. M., Dunfield, K., McCann, K., Anand, M., Campbell, M., Rooney, N., Raine, N. E., Van Acker, R., Hanner, R., Pascoal, S., Sharif, S., Benton, T. G. y Fraser, E. D. G. (2018). When Too Much Isn't Enough: Does Current Food Production Meet Global Nutritional Needs? *PLOS ONE*, 13(10), e0205683. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205683>
- Keyzer, M. A., Merbis, M. D. y Voortman, R. L. (2008). The Biofuel Controversy. *De Economist*, 156(4), 507-527. <https://doi.org/10.1007/s10645-008-9098-x>
- Klein, A.-M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C. y Tscharntke, T. (2007). Importance of Pollinators in Changing Landscapes for World Crops. *Proceedings of the Royal Society. Biological Sciences*, 274(1608), 303-313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>
- Koirala, A. y Bhandari, P. (2019). Impact of Climate Change on Livestock Production. *Nepalese Veterinary Journal*, 36, 178-183. <https://doi.org/10.3126/nvj.v36i0.27778>
- Lafferty, K. D. (2009). The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases. *Ecology*, 90(4), 888-900. <https://doi.org/10.1890/08-0079.1>
- Lake, I. R., Hooper, L., Abdelhamid, A., Bentham, G., Boxall, A. B. A., Draper, A., Fairweather-Tait, S., Hulme, M., Hunter, P. R., Nichols, G. y Waldron, K. W. (2012). Climate Change and Food Security: Health Impacts in Developed

- Countries. *Environmental Health Perspectives*, 120(11), 1520-1526. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104424>
- León-Bon, T. S. y Díaz-Bautista, A. (2020). Impacto de la inflación de los precios de los alimentos en el bienestar de los hogares en situación de pobreza en México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56). <https://doi.10.24836/es.v30i56.1014>
- Liaqat, W., Barutçular, C., Farooq, M. U., Ahmad, H., Jan, M. F., Ahmad, Z., Nawaz, H. y Li, M. (2022). Climate Change in Relation to Agriculture: A Review. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 20(2), e03R01.
- Lowder, S., Sánchez, M. V. y Bertini, R. (2019). *Farms, Family Farms, Farmland Distribution and Farm Labour: What Do We Know Today?* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/1252236/>
- Martin, C., Coppa, M., Fougère, H., Bougouin, A., Baumont, R., Eugène, M. y Bernard, L. (2021). Diets Supplemented With Corn Oil and Wheat Starch, Marine Algae, or Hydrogenated Palm Oil Modulate Methane Emissions Similarly in Dairy Goats and Cows, But Not Feeding Behavior. *Animal Feed Science and Technology*, 272, 114783. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114783>
- Martínez Arroyo, A., Manzanilla Naim, S. y Zavala Hidalgo, J. (2011). Vulnerability to Climate Change of Marine and Coastal Fisheries in Mexico. *Atmósfera*, 24(1), 103-123. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362011000100008
- Mata, G., Hernández, R. G. y Salmones, D. (2013). Biotechnology for Edible Mushroom Culture: A Tool for Sustainable Development in Mexico. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 64. https://www.researchgate.net/publication/341106725_Biotechnology_for_edible_mushroom_culture_a_tool_for_sustainable_development_in_Mexico
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez G. J., Buckler, E. y Doebley, J. (2002). A Single Domestication for Maize Shown by Multilocus Microsatellite

- Genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(9), 6080-6084. <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., Leduc, S. y Patrizio, P. (2018). Identifying Effects of Land Use Cover Changes and Climate Change on Terrestrial Ecosystems and Carbon Stocks in Mexico. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 53, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>
- Montoya, A., Hernández, N., Mapes, C., Kong, A. y Estrada-Torres, A. (2008). The Collection and Sale of Wild Mushrooms in a Community of Tlaxcala, Mexico. *Economic Botany*, 62(3), 413-424. <https://doi.org/10.1007/s12231-008-9021-z>
- Murray-Tortarolo, G. N. y Jaramillo, V. J. (2019). The Impact of Extreme Weather Events on Livestock Populations: the Case of the 2011 Drought in Mexico. *Climatic Change*, 153(1-2), 79-89. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02373-1>
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M. S. y Bernabucci, U. (2010). Effects of Climate Changes on Animal Production and Sustainability of Livestock Systems. *Livestock Science*, 130(1-3), 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>
- Nicholls, E., Ely, A., Birkin, L., Basu, P. y Goulson, D. (2020). The Contribution of Small-Scale Food Production in Urban Areas to the Sustainable Development Goals: A Review and Case Study. *Sustainability Science*, 15(6), 1585-1599. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00792-z>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2011). *Seguridad alimentaria y nutricional, conceptos básicos* (Proyecto Food Facility Honduras). <https://www.fao.org/3/at772s/at772s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2018). *Impacts of Climate Change on Fisheries and aquaculture. Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options*. <https://www.fao.org/3/i9705en/i9705en.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2019). *La biodiversidad crucial para nuestra alimentación y agricultura desaparece de día en día*. <https://www.fao.org/panama/noticias/detail-events/es/c/1181637/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2020a). *El estado de los bosques del mundo. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. <https://www.fao.org/3/ca8642es/CA8642ES.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2020b). *Datos sobre alimentación y agricultura*. <https://www.fao.org/faostat/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2022a). *Agricultural Production Statistics 2020-2021*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/58971ed8-c831-4ee6-ab0a-e47ea66a7e6a/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2022b). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (8 de diciembre de 2023). *La ganadería representa 12 % de las emisiones de gases con efecto invernadero*. <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/1675383/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (5 de marzo de 2024). *Cumbre Mundial sobre la Alimentación*. <https://www.fao.org/3/X2051s/X2051s00.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA), Organización Mundial de la Salud (OMS), Programa Mundial de Alimentos (PMA) y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) (2023). *Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. Urbanización, transformación de los sistemas agroalimentarios y dietas saludables a lo largo del continuo rural-urbano*. <http://doi.org/10.4060/cc6550es>

- Ortiz Rosales, M. Á., Ramírez Abarca, O., González Elías, J. M. y Velázquez Monter, A. (2015). Almacenes de maíz en México: tipología y caracterización. *Estudios Sociales*, 23(45), 163-184. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572015000100007
- Payen, F. T., Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Marshall, R., Mead, B. R. y Davies, J. A. C. (2022). How Much Food Can We Grow in Urban Areas? Food Production and Crop Yields of Urban Agriculture: A meta-analysis. *Earth's Future*, 10(8). <https://doi.org/10.1029/2022ef002748>
- Perales Rivera, H. R. y Aguirre Rivera, J. R. (2008). Biodiversidad humanizada. En J. Soberón, G. Halffter y J. Llorente-Busquets (comps.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 565-603). Conabio.
- Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H. y Taylor, R. A. (2015). Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 285-307. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>
- Piperno, D. R., Ranere, A. J., Holst, I., Iriarte, J. y Dickau, R. (2009). Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B. P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(13), 5019-5024. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106>
- Pirgon, Ö. y Aslan, N. (2015). The Role of Urbanization in Childhood Obesity. *Journal of Clinical Research in Pediatric Endocrinology*, 7(3), 163-167. <https://doi.org/10.4274/jcrpe.1984>
- Ponce-Alcala, R. E., Ramirez-Garcia Luna, J. L., Shamah-Levy, T. y Melgar-Quíñonez, H. (2021). The Association Between Household Food Insecurity And Obesity in Mexico: A Cross-Sectional Study of Ensanut M. C. 2016. *Public Health Nutrition*, 24(17), 5826-5836. <https://doi.org/10.1017/s1368980021003153>
- Poulain, F., Himes-Cornell, A. y Shelton, C. (2018). Methods and Tools for Climate Change Adaptation in Fisheries And Aquaculture. En M. Barange,

- T. Bahri, M. C. M. Beveridge, K. L. Cochrane, S. Funge-Smith y F. Poulain (eds.), *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture: Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options* (pp. 535-567). Fisheries and Aquaculture Technical paper 627. FAO.
- Prasanna, B. M. (2012). Diversity in Global Maize Germplasm: Characterization and Utilization. *Journal of biosciences*, 37(5), 843-855. <https://doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1>
- Rahman, M. S., Toiba, H. y Huang, W.-C. (2021). The Impact of Climate Change Adaptation Strategies on Income and Food Security: Empirical Evidence from Small-Scale Fishers in Indonesia. *Sustainability*, 13(14), 7905. <https://doi.org/10.3390/su13147905>
- Ramírez-Barrón, M., Ureta, C., Kolb, M., Gasparello, G., Ruán-Soto, F., Martínez-Cruz, A. L., Sánchez Cordero, V. (s.f.). *Impact of Climate Change on Insectivorous Bats and Implications for Small-Scale Farming in southern Mexico* [Manuscrito]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rhoads, M. L., Rhoads, R. P., VanBaale, M. J., Collier, R. J., Sanders, S. R., Weber, W. J., Crooker, B. A. y Baumgard, L. H. (2009). Effects of Heat Stress and Plane of Nutrition on Lactating Holstein Cows: I. Production, Metabolism, and Aspects of Circulating Somatotropin. *Journal of dairy science*, 92(5), 1986-1997. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1641>
- Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J., Bautista-Ortega, J. y Pereira-Lorenzo, S. (2021). Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship With Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy*, 11(4), 672. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040672>
- Santini, F., Ronzon, T., Pérez Domínguez, I., Araujo Enciso, S. R. y Proietti, I. (2017). What if Meat Consumption Would Decrease More than Expected in the High-Income Countries? *Bio-Based and Applied Economics*, 6(1), 37-56. <https://doi.org/10.13128/BAE-16372>
- Schmidhuber, J. y Tubiello, F. N. (2007). Global Food Security Under Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703-19708.

- Scoones, I. (2023). Livestock, Methane, and Climate Change: The Politics of Global Assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change*, 14(1). <https://doi.org/10.1002/wcc.790>
- Shamah-Levy, T., Mundo-Rosas, V., Flores-De la Vega, M. M. y Luiselli-Fernández, C. (2017). Food Security Governance in Mexico: How Can It Be Improved? *Global Food Security*, 14, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.05.004>
- Servicio de Información Agroalimentaria y pesquera (SIAP) (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sievanen, L. (2014). How Do Small-Scale Fishers Adapt to Environmental Variability? Lessons from Baja California, Sur, Mexico. *Maritime Studies*, 13(2). <https://doi.org/10.1186/s40152-014-0009-2>
- Smith, H. y Basurto, X. (2019). Defining Small-Scale Fisheries and Examining the Role of Science in Shaping Perceptions of Who and What Counts: A Systematic Review. *Frontiers in Marine Science*, 6, 236. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00236>
- Tao, S. y Dahl, G. E. (2013). Invited Review: Heat Stress Effects During Late Gestation on Dry Cows and Their Calves. *Journal of dairy science*, 96(7), 4079-4093. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6278>
- Tesema, Z., Taye, M. y Ayichew, D. (2019). The Role of Phenotypic and Genetic Basis of Livestock Selection for Climate Change Adaptation and Mitigation: A Review. *Journal of Applied and Advanced Research*, 4(2), 66-77. <https://doi.org/10.21839/jaar.2019.v4i2.251>
- Thornton, P. K. y Herrero, M. (2014). Climate Change Adaptation in Mixed Crop-Livestock Systems in Developing Countries. *Global Food Security*, 3(2), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.02.002>
- Toledo, M., Conde, C. y Ureta C. (s.f). *Medidas de adaptación al cambio climático en cultivos de maíz en el módulo de riego La Piedad, México* [Manuscrito]. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Toth, G. y Reynolds Jr, T. E. (2020). El comercio global y el derecho a un medioambiente saludable: el papel de la agrosilvicultura. En H. Florian, *Protección del medio ambiente, derechos humanos y transición energética* (vol. 2, pp. 223-244). Universidad de Florida.
- United Nations (UN) (5 de marzo de 2024). *Sustainable Development Goals*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A. y Álvarez-Buylla, M. E. (2020). Maize Yield in Mexico Under Climate Change. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>
- Ureta, C., González-Salazar, C., González, E. J., Álvarez-Buylla, M. E. y Martínez-Meyer, E. (2013). Environmental and Social Factors Account for Mexican Maize Richness and Distribution: A Data Mining Approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 179, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.017>
- Ureta, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. R. y Álvarez-Buylla, M. E. (2012). Projecting the Effects of Climate Change on the Distribution of Maize Races and Their Wild Relatives in Mexico. *Global change biology*, 18(3), 1073-1082.
- Vargas-López, S. (2018). Estrategias de adaptación de las unidades de producción ganaderas a los riesgos climáticos. *Agro Productividad*, 11(2). <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/123>
- Vía campesina (5 de marzo de 2024). *Documentos clave (soberanía alimentaria)* <https://viacampesina.org/es/que-es-la-soberania-alimentaria/>
- Villagómez-Ornelas, P., Hernández-López, P., Carrasco-Enríquez, B., Barrios-Sánchez, K., Pérez-Escamilla, R. y Melgar-Quirón, H. (2014). Validez estadística de la Escala Mexicana de Seguridad Alimentaria y la Escala Latinoamericana y Caribeña de Seguridad Alimentaria. *Salud Pública de México*, 56(1), S5-S11. <https://www.saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/S160>

- Vitali, A., Felici, A., Esposito, S., Bernabucci, U., Bertocchi, L., Maresca, C., Nardone, A. y Lacetera, N. (2015). The Effect of Heat Waves on Dairy Cow Mortality. *Journal of Dairy Science*, 98(7), 4572-4579. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9331>
- Waring, K. M. y Bucholz, E. (2023). Silviculture. En J. D. Allison, T. D. Paine, B. Slippersy M. J. Wingfield (eds.), *Forest Entomology and Pathology* (pp. 707-744). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11553-0_20
- Zhao, J., Liu, D. y Huang, R. (2023). A Review of Climate-Smart Agriculture: Recent Advancements, Challenges, and Future Directions. *Sustainability*, 15(4), 3404. <https://doi.org/10.3390/su15043404>
- Ziervogel, G. y Ericksen, P. J. (2010). Adapting to Climate Change to Sustain Food Security. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change*, 1(4), 525-540. <https://doi.org/10.1002/wcc.56>

3. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático en la salud pública en México

LA SALUD HUMANA

Como hemos visto en los capítulos anteriores, el cambio climático antropogénico representa uno de los principales retos a los que se enfrenta la humanidad, debido a los efectos actuales y futuros sobre diversos sectores sociales, económicos y ambientales (Scheffers et al., 2016). Sin duda, uno de los temas prioritarios en investigaciones sobre cambio climático son sus efectos en la salud pública. Para entender los posibles impactos, así como las medidas de mitigación y adaptación que deberán adoptarse en el área de la salud pública, será necesario primero definir lo que entendemos por salud humana y, en segundo lugar, conocer las diferentes manifestaciones del cambio climático que pueden afectarla, como el incremento de temperaturas y los eventos meteorológicos extremos. De esta forma, tendremos un panorama más amplio de las múltiples facetas de la salud que pueden verse afectadas por los diferentes fenómenos climáticos.

A lo largo de la historia, la salud humana se ha visto afectada por diversos padecimientos, desde epidemias que afectan pequeñas regiones o países hasta pandemias que impactan a nivel global. Estas enfermedades pueden ser originadas por la exposición a agentes externos como virus,

bacterias y parásitos, o por el mal funcionamiento de órganos internos como el corazón, el hígado o el páncreas. Además, las lesiones físicas sufridas en accidentes, que pueden generar una discapacidad por la pérdida de algún órgano, miembro o sentido, también repercuten en la salud de un individuo. Tradicionalmente, la salud ha sido concebida como la ausencia de enfermedades o afecciones que deterioren nuestro organismo. Así, cuando hablamos de nuestra salud, consideramos que estamos saludables si no padecemos alguna enfermedad o estamos libres de lesiones. Aunque esta es la percepción más común, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció en 1948 que la salud humana debe ser atendida como un estado completo de bienestar físico, mental y social, y no solamente como la ausencia de afecciones o enfermedades (De la Torre-Ugarte-Guanilo y Oyola-García, 2014; Hurtado Hoyo et al., 2021).

La definición de la OMS llevó a replantear los planes sobre la atención a la salud en diversas comunidades humanas, que no deben limitarse únicamente al proceso salud-enfermedad, sino también a prevenir que los individuos sanos se enfermen. Los planes de salud deben considerar todos los aspectos que influyen en la salud de la población, es decir, deben considerar las circunstancias particulares en las que las personas nacen, crecen y envejecen, además de las condiciones en que viven y trabajan, incluyendo los servicios públicos a los que tienen acceso, como salud, vivienda, educación. En este contexto, la interacción del ser humano con su entorno social y natural cobró relevancia como determinante de los estados de salud de los individuos y de la población. Por lo tanto, los sistemas de salud deben responder de manera efectiva y equitativa a los problemas existentes, entendiendo la salud como un proceso complejo y multidimensional, donde las relaciones sociales, económicas, culturales y ambientales determinan las condiciones de salud de la población (Heredia et al., 2011).

Bajo este contexto, las agendas sobre cambio climático y salud pública deben considerar, en la medida de lo posible, el gran número de factores que influyen en la salud humana. Estos factores, denominados

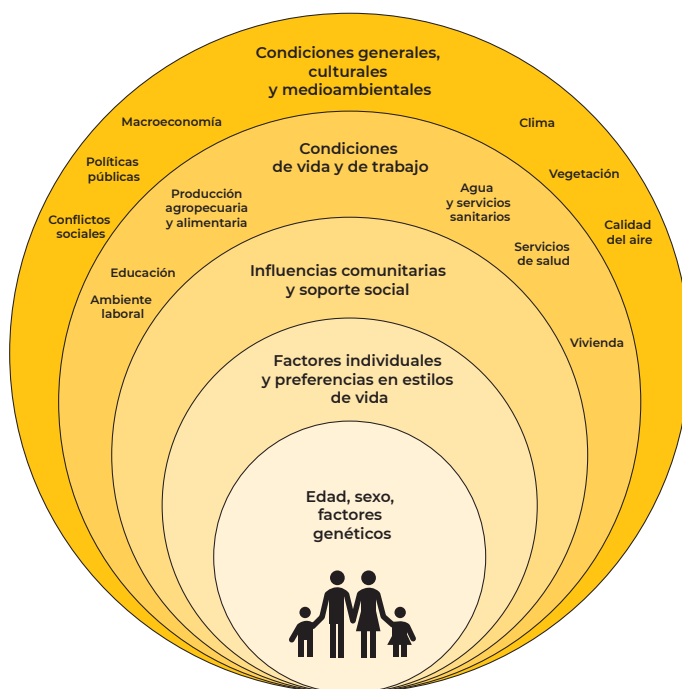
determinantes sociales de la salud (DSS), representan diferentes condiciones intrínsecas y extrínsecas de la población, que actúan e interactúan en diferentes niveles de organización (Galvão et al., 2009). Esto incluye al individuo, como ente social que se encuentra inmerso en una estructura sociocultural, definida por su interacción en los procesos de trabajo, convivencia y socialización; es el resultado de la suma de condiciones personales, comunitarias y el entorno. Podemos identificar cinco niveles de DSS, desde lo individual hasta lo ambiental, y cómo pueden influir en la salud:

1. Individuos. Con características de edad, sexo y factores genéticos que influyen en su potencial de salud final.
2. Conductas personales y estilos de vida. Las personas con escasos recursos tienen mayor prevalencia de factores conductuales negativos como tabaquismo y mala alimentación, y también deben afrontar barreras financieras mayores para escoger un estilo de vida.
3. Influencias sociales y comunitarias. La interacción con la comunidad influye en las conductas personales y en las decisiones sobre el estilo de vida a seguir.
4. Condiciones de vida y de trabajo. Las condiciones de vivienda más pobres, la exposición a condiciones de trabajo más peligrosos y el limitado acceso a servicios básicos, crean riesgos diferenciales para los menos beneficiados socialmente.
5. Condiciones económicas, culturales y medioambientales. El estado económico del país, las condiciones del mercado de trabajo y la calidad ambiental producen presión sobre cada una de las otras capas.

Identificar los diferentes niveles de DSS nos permite establecer qué factores de riesgo para la salud pueden modificarse y cuáles no, en los planes de intervención o prevención en la salud pública. Por ejemplo, las

características del individuo (sexo, edad, genética) no son modificables para establecer medidas de intervención en salud pública, pero siguen siendo factores importantes, ya que afectan y determinan en parte la eficacia de los tratamientos. Los factores de riesgo modificables se refieren a los DSS que las sociedades o los individuos pueden cambiar para mejorar los resultados de salud, como la calidad de las viviendas, las condiciones de trabajo, el comportamiento e incluso algunas condiciones ambientales. Las investigaciones sobre cambio climático y salud deben considerar los DSS dentro de sus propuestas, ya que esto determinará el nivel de riesgo y vulnerabilidad de las poblaciones.

Figura 1. Determinantes sociales de la salud



Fuente: elaboración propia.

CLIMA Y SALUD

Como vimos anteriormente, las condiciones ambientales a las que está expuesto el ser humano son un importante determinante de la salud. Por ejemplo, dependiendo de la zona en la que vivamos experimentaremos una cierta calidad de aire, ya sea poco o muy contaminado, y un clima particular, cálido o frío. Estas condiciones influirán sobre nuestro estado de salud. Enfocándonos principalmente en el clima, sin duda hemos experimentado varias veces cómo puede afectar nuestra salud. Por ejemplo, si nos exponemos a cambios de temperatura o a una lluvia inesperada, podemos comenzar a presentar síntomas de resfriado, como dolor de garganta, tos o fiebre. Incluso, sabemos de antemano que, al llegar ciertas estaciones del año, debemos estar preparados para enfermedades como la influenza en invierno, los golpes de calor en primavera o la fiebre del dengue en tiempo de lluvias. Esta conexión entre clima y enfermedad es un conocimiento adquirido históricamente por la humanidad de forma empírica (McMichael, 2003; Patz et al., 2003), por lo que no debería ser difícil vislumbrar que los cambios climáticos que estamos experimentando tendrán un efecto directo en la salud. Sin embargo, entender y prever cómo los cambios en el clima repercutirán en la salud humana no es una tarea sencilla, ya que debemos considerar los diferentes fenómenos meteorológicos que derivarán del cambio climático y cómo estos afectarán tanto directa como indirectamente numerosos determinantes ambientales y sociales de la salud. Como veremos, la complejidad de la relación cambio climático-salud humana la convierte en un reto significativo para tomar acciones en salud pública.

Para abordar la complejidad del problema, primero revisaremos las formas en las que se manifestarían diferentes eventos meteorológicos a los que estaremos expuestos y, posteriormente, cómo se percibirían sus impactos en las poblaciones. Los eventos meteorológicos podemos clasificarlos según su duración, y se ha propuesto una terminología retomando algunos conceptos del área de salud (Palinkas y Wong, 2020):

1. Eventos climáticos agudos. Se caracterizan por su corta duración, que puede ser de horas a días, y se reflejan principalmente en eventos extremos del tiempo meteorológico y desastres naturales relacionados con el clima. Ejemplos de este grupo son las olas extremas de calor o frío, inundaciones, huracanes e incendios.
2. Eventos climáticos subagudos. Estos pueden durar meses o unos pocos años, como las sequías o periodos de calor o frío extremo extendido. Un ejemplo de este tipo de eventos lo experimentamos en 2023 en México, cuando se registraron temperaturas extremadamente altas durante casi seis meses.
3. Eventos climáticos crónicos. Se caracterizan por ser de larga duración. Son cambios constantes en diferentes variables meteorológicas o condiciones ambientales que se han mantenido desde inicios de la Revolución industrial (alrededor de 1850) y que se prolongarán hasta finales del siglo XXI e incluso más allá. Este tipo de eventos incluyen el calentamiento global, el aumento del nivel del mar, el deshielo de los polos y cambios en los regímenes climáticos estacionales (Cissé y McLeman, 2023).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) advierte en su reporte del 2020, con toda seguridad, que el cambio climático amplificará las amenazas a la salud en todo el mundo (Cissé y McLeman, 2023). En cuanto a la forma en que el cambio climático afectará la salud humana, éste seguirá dos principales rutas: los efectos directos y los indirectos (Díaz et al., 2020).

Los efectos directos se asocian con la exposición a diferentes eventos climáticos, y el nivel de impacto estará mediado principalmente por determinantes sociales de la salud intrínsecos, como las características biológicas, genéticas y de comportamiento de los individuos, así como de las condiciones donde viven y trabajan (Galvão et al., 2009; McMichael,

2003). Entre los eventos climáticos a considerar están principalmente los agudos y subagudos, como las olas de calor, fríos extremos, huracanes, inundaciones, sequías, por mencionar algunos. En estos casos, la exposición de los individuos se reflejará en un incremento de enfermedades no transmisibles, como golpes de calor, lesiones físicas (Cissé y McLeman, 2023; Romanello et al., 2023).

Los efectos indirectos se asocian con los cambios en procesos biológicos y ecológicos en los sistemas naturales y humanos derivados de las modificaciones del clima. Estos cambios modificarán el ambiente en el que habitan las poblaciones humanas, alterando la dinámica poblacional de especies nocivas, los rendimientos de cultivos el acceso a servicios ecosistémicos, entre otros. Los efectos estarán mediados por determinantes sociales de la salud –principalmente extrínsecos–, como la calidad de aire, agua y la degradación de los sistemas naturales. Los impactos se reflejarán en el incremento de enfermedades infecciosas, desnutrición, conflictos sociales, por mencionar algunos (Mills et al., 2010; Patz et al., 2003; Romanello et al., 2023).

Además de los efectos directos e indirectos, debemos considerar que los impactos del cambio climático también dependerán en gran medida de la región geográfica donde habitan las poblaciones, y que la naturaleza y escala de dichos impactos dependerán de la capacidad adaptativa de la población, sociedad y del acceso a sistemas de salud eficientes.

CAMBIO CLIMÁTICO Y ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Las enfermedades infecciosas son padecimientos que se producen cuando el ser humano adquiere un agente infeccioso, como un virus o una bacteria, ya sea por contacto con una persona o animal infectado, o a través de objetos o sustancias contaminadas, como el agua o el suelo (Straif-Bourgeois et al., 2014). Este tipo de padecimientos se han asociado históricamente a los cambios ambientales, debidos tanto a fenómenos

naturales como a actividades humanas (Patz et al., 2000). Prácticamente podemos rastrear la aparición y propagación de estas enfermedades en las diferentes etapas de la civilización humana (Straif-Bourgeois et al., 2014). Por ejemplo, algunas enfermedades como la tuberculosis, producida por la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*, y el sarampión, por el virus *Morbilivirus*, se originaron tras la domesticación del ganado vacuno que puso al ser humano en contacto frecuente con los patógenos responsables de estos padecimientos (Patz et al., 2005).

El crecimiento de los asentamientos humanos y los procesos de urbanización han favorecido la aparición de diversas enfermedades virales y bacterianas transmitidas por el aire (Straif-Bourgeois et al., 2014). La conversión de hábitats naturales en zonas de cultivo ha creado condiciones favorables para desarrollar enfermedades transmitidas por vectores, como la malaria, tripanosomiasis y leishmaniasis, en diversas zonas de África y América (Service, 1991). Además, la dispersión de un gran número de patógenos se ha producido por la creciente movilidad del ser humano (Arguin et al., 2009) y la introducción intencional y accidental de animales más allá de sus áreas de distribución nativas (Fèvre et al., 2006).

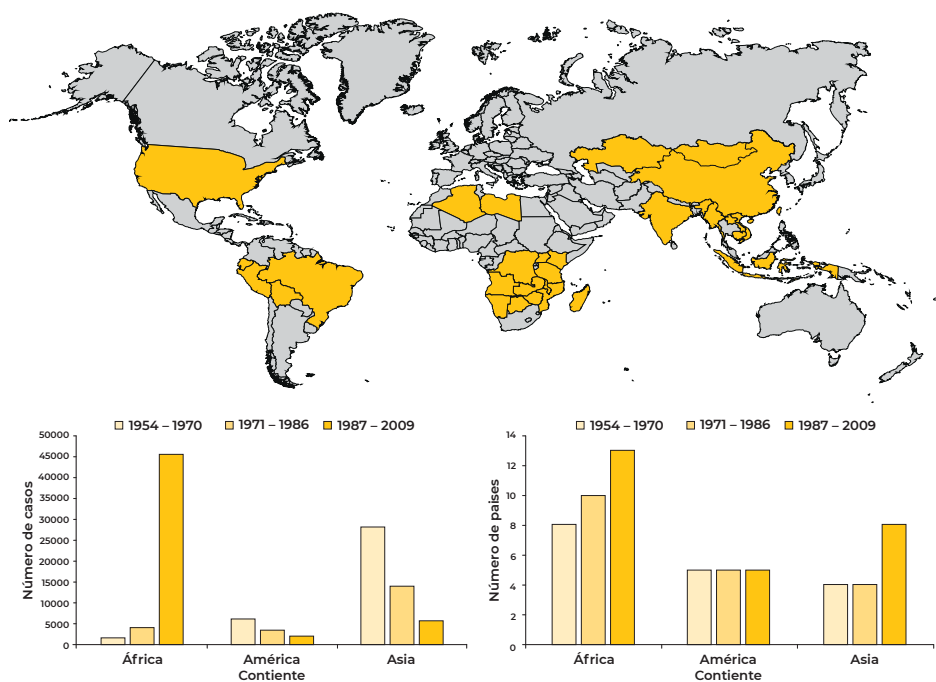
PANDEMIAS Y EPIDEMIAS: IMPACTOS HISTÓRICOS EN LA SALUD HUMANA

Las enfermedades infecciosas han sido una de las principales causas de morbilidad y mortalidad a lo largo de la historia humana. Las grandes epidemias y pandemias que han ocurrido desde la época antigua y hasta nuestros días se han debido a este tipo de padecimientos. Entre las primeras pandemias de la historia se encuentran las provocadas por la peste bubónica. Esta enfermedad es causada por la bacteria *Yersinia pestis*, descubierta por Kitasato Shibasaburō y Alexandre Yersin en 1894 (Prieto Ortiz, 2020). La bacteria puede ser transmitida por las pulgas de

la especie *Xenopsylla cheopis*, presentes en las ratas domésticas (*Rattus rattus* y *Rattus norvegicus*). Cabe mencionar que, una vez que la pulga transmite la bacteria a una persona, el contagio posterior puede ser directamente de humano a humano (Stenseth et al., 2008).

Históricamente se reconocen tres principales pandemias de la peste. La primera, llamada peste de Justiniano, ocurrió de los años 541 a 622 d.C. y tomó su nombre del emperador Justiniano I que regía el imperio Bizantino. Se originó muy probablemente en la ciudad de Pelusio, Egipto, alrededor del año 450 d.C. y de ahí llegó a Etiopía, para posteriormente extenderse por todo el “mundo conocido”: el norte de África, Oriente Medio, la cuenca del Mediterráneo, Turquía, Constantinopla, Grecia, Italia, Francia y Alemania (Boire et al., 2014). Durante esta epidemia murieron entre 30 y 50 millones de personas. La segunda fue la peste negra, que ocurrió de 1346 a 1353, en la que murieron más de 80 millones de personas y se extendió por toda Europa, Asia y África (Stenseth et al., 2008). La tercera pandemia ocurrió de 1894 a 1903, y en ella murieron alrededor de 12 millones de personas (Prieto Ortiz, 2020). La pandemia se originó en Yunnan, China, donde, por guerras locales, se dispersó hacia las costas de China y posteriormente alcanzó todos los continentes, excepto Australia (Boire et al., 2014).

La peste bubónica es una enfermedad que aún está presente en todo el mundo. De acuerdo con datos de la OMS, entre 1954 y 2009 se han registrado más de 100 000 casos en diversos países de América, Asia y África, siendo este último continente donde se registra el mayor número de casos y países afectados (Boire et al., 2014). Aunque la peste bubónica no ha vuelto a manifestarse con la intensidad del pasado, se debe poner atención a las epidemias locales que han ido en aumento en las últimas décadas, principalmente en África (Stenseth et al., 2008).

Figura 2. Mapa de la distribución actual de casos de peste bubónica

Nota: en amarillo se muestran los países donde se han reportado casos. En la parte inferior, gráficas del número de casos y número de países con casos de peste para los periodos 1954-1970, 1971-1986 y 1987-2009. **Fuente:** el mapa y las gráficas se construyeron con datos tomados de Boire y colaboradores (2014).

La determinación de los factores que favorecieron las pandemias de peste bubónica en el pasado sigue siendo objeto de debate. Sin embargo, un punto que podemos destacar es la dispersión de las ratas domésticas por la acción humana. Estas especies han colonizado casi todos los continentes al ser transportadas de forma incidental a través de rutas comerciales (Boire et al., 2014). Es probable que individuos infectados hayan sido transportados por vía acuática y terrestre entre regiones. Además, las rutas comerciales también pudieron facilitar el movimiento

de humanos infectados, que actuaron como dispersores del patógeno. Otra hipótesis que está ganando fuerza como un factor determinante de las pandemias son los cambios climáticos ocurridos en aquellas épocas. Reconstrucciones climáticas basadas en el análisis de anillos de árboles muestran que las tres pandemias fueron precedidas por años con eventos extremos de precipitación (lluvias intensas) y altas temperaturas (Büntgen et al., 2011; Gage et al., 2008). Resultados similares se observaron en años recientes en Vietnam, Nuevo México y Arizona, donde brotes epidémicos de peste fueron asociados con eventos climáticos extremos (Gage et al., 2008). Más allá del debate sobre los orígenes de esta pandemia, es notable la posible interacción entre determinantes sociales (movimientos humanos), bióticos (introducción de especies reservorio) y abióticos (eventos climáticos extremos) que generaron las condiciones para estas pandemias.

Una de las primeras enfermedades infecciosas registradas es la viruela, causada por el virus *Variola virus*. Se considera que es la primera enfermedad contagiosa que se manifestó como una pandemia (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020). La llamada peste antonina o plaga de Galeno, ocurrida entre los años 165 al 180 d.C., se atribuye a esta enfermedad. En este periodo murieron alrededor de cinco millones de personas en Asia menor, Egipto, Grecia e Italia. Aparentemente, la peste antonina se originó en el Medio Oriente, específicamente en la ciudad de Seleucia (actual Irak), y fue llevada a Europa por las tropas romanas que regresaron a casa después de las guerras párticas (Cunha y Cunha, 2006). Posterior a la peste antonina, la viruela continuó causando brotes epidémicos en diversas regiones del mundo. Entre los siglos VII y VIII llegó a Japón, causando la muerte de casi el 35% de la población adulta (Hernández-Mesa et al., 2020). Para el siglo XVIII, la enfermedad había afectado a un 30% de la población mundial (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020).

La viruela llegó a América en el siglo XVI durante la conquista española. De acuerdo con los relatos históricos, la viruela ingresó a América

cuando en 1520 arribó a las playas de Veracruz un esclavo enfermo. Este sería el primer caso de viruela en México, y así comenzaría el contagio de la población indígena. La epidemia, llamada *hueyazhuatl*, diezmó significativamente la población indígena (Franco-Paredes et al., 2004). Siete meses después de la llegada la viruela, los cadáveres se apilaban en las calles de Tenochtitlán, y los sobrevivientes quedaban estigmatizados con marcas severas en la piel o ceguera permanente.

Figura 3. Ilustración de la epidemia de viruela en la población azteca en el siglo XVI (Tenochtitlan, 1520)



Fuente: Códice Florentino (1540-1585), Fray Bernardino de Sahagún, lib. xii, f. 53.

Sobre la viruela, no se ha identificado si, además del ser humano, el virus puede estar presente en algún animal, por lo cual la forma de contagio registrada, desde su aparición, siempre ha sido de humano a humano. Al igual que con la peste bubónica, la dispersión de la viruela se vio favorecida por las rutas comerciales y la colonización de América. Se considera una de las enfermedades de mayor letalidad para el ser humano; tan sólo en el siglo xx se reportaron aproximadamente 300 millones de defunciones (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020). Enfrentar el problema sanitario que representaba la viruela llevó a establecer un plan auspiciado por la oms para desarrollar una vacuna. Este programa inició en 1966, y para 1980 la viruela fue erradicada definitivamente, mostrando el éxito que pueden tener los programas de vacunación y la colaboración internacional para abordar problemas prioritarios en la salud pública (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020).

Entre los siglos xix y xx, se presentaron una serie de pandemias debido al cólera, una enfermedad intestinal aguda producida por la bacteria *Vibrio cholerae*. Originalmente, esta enfermedad era endémica en Asia (Hernández-Mesa et al., 2020). La primera gran pandemia de cólera ocurrió entre 1852 y 1860; se originó en India y se dispersó por Asia, Europa, América y África, causando alrededor de un millón de muertes. Durante esta pandemia, en 1854, en Londres, el médico inglés John Snow estableció la relación entre el cólera y el consumo de agua contaminada procedente del río Támesis. Los métodos y análisis realizados por John Snow lo llevaron a ser considerado el padre de la epidemiología moderna (Cerdeña y Valdivia, 2007).

En 1884, Robert Koch describió la bacteria responsable del cólera y confirmó que su transmisión se debía al consumo de alimentos y agua contaminados, lo que permitió establecer medidas preventivas (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020). Sin embargo, entre 1910 y 1913 se produjo una de las pandemias más letales de cólera. El número de pandemias de cólera varía según los autores, con cifras que oscilan entre

cuatro y ocho eventos, dependiendo de los años que se consideren como inicio y término. En general, se pueden considerar siete eventos desde el siglo XIX hasta la actualidad, en los siguientes periodos: 1817-1824, 1827-1835, 1839-1856, 1863-1875, 1881-1886, 1899-1923 y 1961 al presente (Piret y Boivin, 2021). El cólera sigue en expansión a nivel mundial, causando brotes infecciosos en zonas de Asia, África y América. Además, esta enfermedad debe ser un foco de atención ante los cambios climáticos que estamos experimentando. Nueva evidencia sugiere una asociación entre anomalías térmicas en los océanos y la aparición de brotes epidémicos de cólera (Martínez Urtaza, 2011).

Las pandemias ocurridas en los siglos XX y XXI han sido causadas principalmente por virus respiratorios. La gripe española, considerada la primera gran pandemia del siglo XX, ocurrió entre 1918 y 1920, causando entre 50 y 100 millones de muertes y 500 millones de contagios. La enfermedad se originó en Estados Unidos por el virus de la influenza A-H1N1, una mutación de una cepa aviar (Piret y Boivin, 2021). La propagación de esta gripe se dio inicialmente por la incursión del ejército de Estados Unidos en Europa durante la Primera Guerra Mundial y, posteriormente, alcanzó una distribución mundial por actividades comerciales. Fue una gripe de evolución fulminante que podía llevar a la muerte en pocas horas. Se presentó en tres olas de contagios, siendo la última la más letal (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020; Hernández-Mesa et al., 2020).

La segunda pandemia por influenza fue la gripe asiática, entre 1957 y 1958, en la cual se registraron alrededor de dos millones de muertes. El virus responsable de esta pandemia fue el A-H2N2 de procedencia aviar (Piret y Boivin, 2021). Se originó en China, en la provincia de Yunnan, y alcanzó una distribución mundial en menos de un año. Los avances médicos respecto a la gripe española y la detección temprana de la enfermedad contribuyeron para que no se tuviera una letalidad tan alta (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020). En 1968 se presentó la tercera pandemia,

denominada gripe de Hong Kong, causada por el virus A-H3N2, también de origen aviar (Piret y Boivin, 2021). Su propagación fue similar a la gripe asiática, aunque a un ritmo más lento, causando cerca de un millón de muertes, con la mortalidad más alta en Estados Unidos y la menor en Europa (Castañeda Guillot y Ramos Serpa, 2020).

La primera pandemia del siglo XXI surgió en el 2009, causada por el virus de la influenza A-H1N1 de procedencia porcina (Piret y Boivin, 2021). Se ha considerado a México, y en particular al estado de Veracruz, como el origen de esta pandemia. Sin embargo, análisis retrospectivos cuestionan esta afirmación, ya que se identificaron casos en Estados Unidos semanas antes y casi simultáneamente a los de México (López-Cervantes et al., 2010). El virus alcanzó una dispersión global en seis semanas. Las defunciones reportadas fueron 18 631, aunque se estima que pudieron alcanzar a ser 249 000. La baja mortalidad observada en esta pandemia, en comparación con las anteriores provocadas por influenza, se asocia posiblemente a la exposición previa con los anteriores virus A-H1N1, como el de la gripe española (Morens y Taubenberger, 2018; Piret y Boivin, 2021).

Finalmente, la última gran pandemia que ha experimentado la humanidad es la covid-19, provocada por el virus SARS-CoV-2. Este virus pertenece al grupo de los coronavirus, una familia de virus que generalmente causa infecciones leves del tracto respiratorio, como el catarro común, hasta el síndrome respiratorio agudo severo (*severe acute respiratory syndrome*, SARS) y neumonías como las provocadas por el SARS-CoV-2.

Se desconoce cómo inició la transmisión del SARS-CoV-2 a los seres humanos. Cuatro años después del comienzo de la pandemia (en 2024) sólo se ha registrado la transmisión humano a humano. Para el caso de los coronavirus, se conoce un gran número de especies animales que han dado positivo a la presencia de este tipo de virus. Un grupo de mamíferos que ha llamado la atención son los murciélagos, en los que se ha identificado una gran diversidad de coronavirus. Sin embargo, también se han identificado coronavirus en otros animales como ardillas, camellos,

mapaches, monos, diversos cánidos y felinos, por mencionar algunos. Como veremos, dichos mamíferos pueden tener un papel crucial en la transmisión de estos virus al ser humano.

Tratando de entender qué especies pudieron estar involucradas en el inicio de la transmisión del SARS-CoV-2 al ser humano, los murciélagos fueron de las especies que tuvieron mayor atención. Sin embargo, no se ha localizado alguna especie de murciélago con presencia del virus de forma natural (Piret y Boivin, 2021). Estudios en laboratorio han demostrado que algunas especies de murciélagos, los géneros *Rhinolophus* y *Tadarida*, han sido infectadas exitosamente de forma experimental, demostrando cierta susceptibilidad a adquirir el virus SARS-CoV-2 (Bosco-Lauth et al., 2022). Aunque estos resultados sugieren que los murciélagos podrían ser reservorios del virus en vida libre, existe un segundo elemento fundamental para la transmisión al humano: la participación de un reservorio intermedio, que podría ser un mamífero diferente a los murciélagos.

La búsqueda del reservorio intermedio proviene del conocimiento adquirido en dos epidemias previas que afectaron principalmente a países de los continentes asiático y africano. En 2002 apareció en China una enfermedad conocida como síndrome respiratorio agudo grave (SARS) provocada por el coronavirus SARS-CoV-1. En la transmisión de este virus, la civeta (un mamífero carnívoro de origen asiático) fue el reservorio intermedio. En 2012, se detectó en Arabia Saudita el síndrome respiratorio del Medio Oriente (MERS), una enfermedad respiratoria provocada por el coronavirus MERS-CoV. En esta epidemia se identificaron a los camellos y dromedarios como los reservorios intermedios que favorecieron la transmisión al ser humano. Para el caso del SARS-CoV-2, la hipótesis es que los pangolines pudieron haber sido el reservorio intermedio. Este es un tema de investigación que, sin duda, debe continuar en el corto plazo. La identificación del reservorio intermedio de SARS-CoV-2 es fundamental para comprender, por un lado, el origen de la pandemia

por covid-19 y, por otro, tratar de prevenir eventos epidémicos similares a futuro.

A continuación, revisaremos cómo fue la dinámica de la pandemia y su impacto a nivel mundial. Los primeros casos de esta enfermedad se registraron en diciembre de 2019 en Wuhan, China. En enero de 2020, se detectaron los primeros casos fuera de China y, para marzo, la enfermedad ya se encontraba en al menos 100 países (Hernández-Mesa et al., 2020). En ese momento fue reconocida por la OMS como una pandemia; se comenzaron a establecer restricciones de viajes y se inició una cuarentena mundial que duró al menos un año en la mayoría de los países. La rápida dispersión del virus se asoció con la creciente conectividad global, que favoreció la movilización diaria de millones de personas entre países. Para diciembre de 2023, se tenía registro de casi 772 millones 143 014 casos y 7 millones 003 610 defunciones a nivel global. Aunque el desarrollo de vacunas permitió mitigar la pandemia, estas cifras siguieron incrementándose. Esta pandemia ha afectado la vida de millones de personas en todo el mundo y tendrá serias repercusiones en el desarrollo social y económico en todos los países durante los próximos años.

Como podemos ver, las diferentes pandemias que han afectado a la población humana están profundamente ligadas a los procesos de desarrollo de las distintas civilizaciones. Desde el surgimiento de la agricultura, hace unos 10 000 años, se han identificado tres grandes transiciones en la ecología humana que han modificado las relaciones entre humanos y patógenos: 1) el establecimiento y crecimiento de los primeros asentamientos humanos favorecieron el contacto con distintos microorganismos, que posteriormente se tradujeron en nuevas enfermedades; 2) la dispersión de las poblaciones humanas llevó a que las primeras civilizaciones euroasiáticas mantuvieran un contacto constante por actividades comerciales y conflictos armados desde hace unos 2 000 años, lo que llevó a un intercambio y creciente dispersión de enfermedades infecciosas; 3) el expansionismo europeo de los

últimos cinco siglos provocó la propagación transoceánica de enfermedades infecciosas, a menudo letales, por todo el mundo. Básicamente, el surgimiento de epidemias y pandemias a lo largo de historia, y hasta la época reciente, está intrínsecamente relacionado con el desarrollo social y económico que ha seguido la humanidad (Patz et al., 2003).

CLASIFICACIÓN DE ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Estudiar el efecto que puede tener el cambio climático sobre la incidencia y propagación de enfermedades infecciosas requiere comprender los diferentes elementos involucrados en su aparición, desde el tipo de patógeno que las genera hasta las formas de transmisión. La caracterización epidemiológica de las enfermedades permite conocer su naturaleza y comportamiento, lo que es esencial para decidir el tipo de respuesta necesaria para su control y para identificar las diferentes formas en que los cambios ambientales pueden influenciarlas.

En epidemiología, dos características son clave para clasificar las enfermedades. La primera se refiere al tipo de organismo que las produce, conocido como “agente causal” o patógeno. El agente puede ser un organismo, independientemente de su tamaño o taxonomía, capaz de causar una enfermedad (Mora et al., 2022). En este libro, nos enfocaremos en tres tipos de enfermedades según el tipo de agentes: bacterianas (peste bubónica, cólera), víricas (dengue, influenza) y parasitarias (leishmaniasis). En segundo lugar, se considera el método de transmisión. En general, las fuentes de infección pueden ser otro ser humano, un animal o el medio ambiente (sustrato inanimado). Esta información es relevante para establecer planes de control y prevención de brotes epidémicos (Patz et al., 2003).

A los tipos de enfermedades agrupadas por el mecanismo de transmisión, cuando ésta ocurre exclusivamente de humano a humano, se les denomina antroponosis. En estas enfermedades la transmisión del

patógeno se da por contacto directo o exposición a una determinada secreción entre personas. Ejemplos de este tipo de padecimientos son el sarampión, la viruela, la tuberculosis o la influenza (excepto las de origen aviar, porcina y equina) (Hubálek y Rudolf, 2010). Las antroposis son principalmente susceptibles a determinantes sociales como el comportamiento humano, hacinamiento, condiciones insalubres y en menor medida a factores ambientales, aunque puede esperarse una relación indirecta debido a modificaciones en el uso de suelo por cambios climáticos (Patz et al., 2003).

Cuando la transmisión se da por el contacto del ser humano con otro animal vertebrado o invertebrado se denomina zoonosis. En las zoonosis, la transmisión del patógeno se da por el contacto directo del ser humano con un animal (picadura, mordedura) o de forma indirecta por la exposición a alguna secreción (orina de ratones). Por lo general, estas enfermedades no se transmiten de humano a humano, y el número de casos irá aumentando conforme haya mayor frecuencia de contacto entre personas y animales transmisores. Sin embargo, hay varias excepciones (Hubálek y Rudolf, 2010). La peste bubónica se originó por el contacto inicial con las pulgas de las ratas, pero la subsiguiente transmisión fue de humano a humano. La gripe española tuvo su origen en un virus aviar, que posteriormente se transmitiría entre personas. El ejemplo más reciente es la covid-19, donde el virus pasó de un animal (aún no determinado) al ser humano, y posteriormente los contagios fueron de persona a persona. La persistencia de estos patógenos en la naturaleza está fuertemente ligada a la biología y ecología de los animales que los contienen, lo que hace que la aparición de estas enfermedades sea más susceptible a los efectos de los cambios ambientales. Un cambio en el clima o en la cobertura del suelo puede reflejarse en la tasa de transmisión, la inmunidad del huésped, la tasa de reproducción o la mortalidad de las especies (Patz et al., 2000, 2003). Posteriormente, veremos con más detalle este tema y su relevancia en estudios de cambio climático.

Por último, están las sapronosis, donde el patógeno se adquiere por el contacto con elementos abióticos, como el agua o suelo, o con materia en descomposición. La característica principal de estos patógenos es que pueden desarrollarse y mantenerse en vida libre sin la necesidad de interactuar con algún otro animal o el ser humano, pero si ingresan incidentalmente en un ser humano son capaces de iniciar una fase parasitaria, estableciendo sus ciclos de vida dentro del organismo infectado (Kuris et al., 2014). Uno de los ejemplos más claros de este tipo de padecimientos es el cólera, que se produce al consumir agua contaminada con la bacteria *V. cholerae*, la cual también se encuentra en vida libre en ecosistemas marinos adhiriéndose al zooplankton (Martínez Urtaza, 2011). Al ser microorganismos con fases de vida libre, las condiciones ambientales, y en particular el clima, pueden influir en las tasas de transmisión y, por ende, en la incidencia de este tipo de enfermedades. Retomando nuevamente el cólera, se ha observado una relación entre el incremento de temperaturas de los océanos con brotes epidémicos de esta enfermedad (Martínez Urtaza, 2011).

Otro aspecto para estudiar y clasificar las enfermedades se relaciona con las respuestas a nivel poblacional, es decir, la frecuencia con la que aparecen casos de una enfermedad en las comunidades humanas. De acuerdo con este criterio, existen enfermedades que se manifiestan como “casos esporádicos.” Éstos se refieren a eventos aislados de una enfermedad entre los que, aunque pueden coincidir en el tiempo y espacio, no se puede establecer un nexo epidemiológico. Este tipo de eventos puede ocurrir una vez y no repetirse en un largo periodo, o incluso no volver a presentarse. Por ejemplo, los casos de dengue en Tlaxcala han ocurrido de forma muy esporádica a lo largo del tiempo.

En un siguiente nivel tenemos las “endemias”, que se refieren a la presencia habitual de una enfermedad o un agente infeccioso en una determinada zona geográfica o grupo poblacional con una tasa constante a lo largo del tiempo. Esto significa que se ha caracterizado el comportamiento de aparición de casos, lo cual puede ocurrir en ciclos temporales y

con un número de casos esperados; es decir, es la medida basal de la enfermedad en una zona geográfica más o menos extensa. Cuando la presencia de una enfermedad es regular, se dice que existe de forma endémica.

Cuando el número de casos excede lo que se considera la línea basal en una comunidad, región o país, se producen epidemias. Es decir, en estos eventos los casos esperados de una enfermedad se superan y generan un problema de salud pública, al requerir mayor atención médica para una enfermedad particular. Las epidemias pueden tener diferentes manifestaciones espacio-temporales: pueden ocurrir en una pequeña región, como un municipio o estado, o en una más amplia, como un país o una región subcontinental, y llegan a durar desde unos meses hasta pocos años. Las epidemias también pueden originarse cuando una enfermedad aparece por primera vez en una región. Este tipo de eventos ha ocurrido en México con diferentes enfermedades. Por ejemplo, el dengue ha tenido brotes epidémicos en los años 2007, 2009, 2012, 2013 y 2019 (Arredondo-García et al., 2020). En esos años, se superó la línea basal correspondiente a la temporada de dengue, que abarcó de julio a noviembre. En otras ocasiones, se ha superado el número de casos esperados fuera de la temporada de dengue; por ejemplo, en 2023, los estados de Guerrero y Veracruz tuvieron brotes epidémicos en los meses de enero y febrero. En cuanto a epidemias por enfermedades nuevas, en 2014 ocurrió la del chikunguña (Rivera-Ávila, 2014), afectando principalmente la vertiente del Pacífico. En 2015, el virus del zika llegó a América: entró por Brasil y se dispersó hasta el sur de los Estados Unidos (Chen y Hamer, 2016).

Cuando una epidemia se extiende más allá de las fronteras continentales, con una alta velocidad de dispersión y afectación a un gran número de personas, estamos ante las llamadas pandemias, de las cuales hablamos en la sección anterior, como la peste negra, la gripe española y, por supuesto, la de covid-19. Las pandemias representan el nivel más alto de manifestación de las enfermedades infecciosas, y tienen repercusiones

en diferentes escalas sociales y económicas. Como nos muestra la historia, las enfermedades infecciosas no conocen de fronteras geográficas o políticas, por lo que son una amenaza latente para las poblaciones humanas en todo el mundo.

Finalmente, en tiempos recientes, se destaca la aparición de enfermedades transmisibles nuevas o desconocidas, así como el resurgimiento de otras que se creía que estaban controladas. A estas enfermedades se les denomina emergentes y reemergentes. Las emergentes son provocadas por un agente infeccioso recientemente identificado y anteriormente desconocido, capaz de causar problemas de salud pública a nivel local, regional o mundial, como la fiebre de zika y chikunguña en México, y la covid-19 a nivel mundial. Por su parte, las enfermedades reemergentes se caracterizan por la reaparición y aumento del número de infecciones de una enfermedad conocida, que previamente había dejado de considerarse un problema de salud pública debido a una disminución significativa de casos registrados (Oromí Durich, 2000).

Sin duda, determinar el rol que han tenido los cambios ambientales en la aparición de epidemias y pandemias, así como en la emergencia y reemergencia de enfermedades, es fundamental para establecer planes de vigilancia, control y prevención de estos eventos en el corto y mediano plazo, sobre todo ante el cambio climático que estamos experimentando.

¿CUÁNDO? ¿DÓNDE? ¿QUIÉNES?

La epidemiología es la rama de la ciencia que estudia la frecuencia y distribución de las enfermedades, así como sus determinantes en las poblaciones humanas, y aplica este conocimiento para la prevención y control de problemas de salud. Este enfoque se resume en tres preguntas básicas: ¿cuándo?, ¿dónde?, ¿quiénes?, es decir, se caracteriza una enfermedad con base en el tiempo, el lugar y las personas susceptibles.

Al estudiar el tiempo, un aspecto clave es la manifestación clínica de la enfermedad, que puede ser aguda o crónica. Las enfermedades agudas se desarrollan rápidamente y son de corta duración, mientras que las crónicas son de larga duración y generalmente progresan de forma lenta. Estas últimas son casi siempre incurables; la mayoría de las enfermedades no transmisibles pertenecen a esta categoría. Por otro lado, la mayoría de las zoonosis son agudas, aunque, como veremos más adelante, algunas presentan manifestaciones crónicas, especialmente las parasitarias.

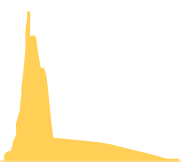
Analizar la frecuencia temporal con la que se registran casos de una enfermedad nos permite conocer la velocidad de transmisión. Asimismo, registrar la recurrencia de una enfermedad a lo largo de varios años permite describir y predecir sus ciclos (un patrón regular de variación en periodos mayores a un año) y su tendencia secular (su patrón de variación o comportamiento en el tiempo). De esta forma, podemos establecer si existe una estacionalidad (un patrón regular de variación entre estaciones del año), lo cual permite anticipar su ocurrencia y adoptar medidas preventivas.

La estacionalidad es relevante en la sapronosis y zoonosis, ya que las condiciones del medio ambiente, como el agua, los alimentos, los animales e invertebrados, influyen fuertemente en sus mecanismos de transmisión. Por lo general, estas enfermedades son más frecuentes durante los meses más cálidos del año. En cambio, la antroposis y las infecciones respiratorias son más prevalentes durante el invierno en zonas templadas o en la temporada de lluvias en regiones tropicales (Patz et al., 2003).

El análisis temporal también nos permite evaluar si una enfermedad sigue su patrón regular o si estamos ante una epidemia. En el último caso, las curvas epidémicas son una herramienta que nos permite visualizar su comportamiento y puede proporcionar algunas pistas sobre la naturaleza del brote. Las epidemias se clasifican según la forma que

adquiere la curva temporal: brotes puntuales, epidemias masivas prolongadas, epidemias progresivas y epidemias mixtas (Idrovo, 2000). En la tabla 2 se muestra la forma que tomarían las curvas de estas epidemias. La pandemia de covid-19 se asemejaría a una epidemia de tipo mixto, con picos muy altos precedidos de otros menores. Identificar los eventos que ocurren antes o después de un incremento en la tasa de una enfermedad permite predecir los posibles factores de riesgo.

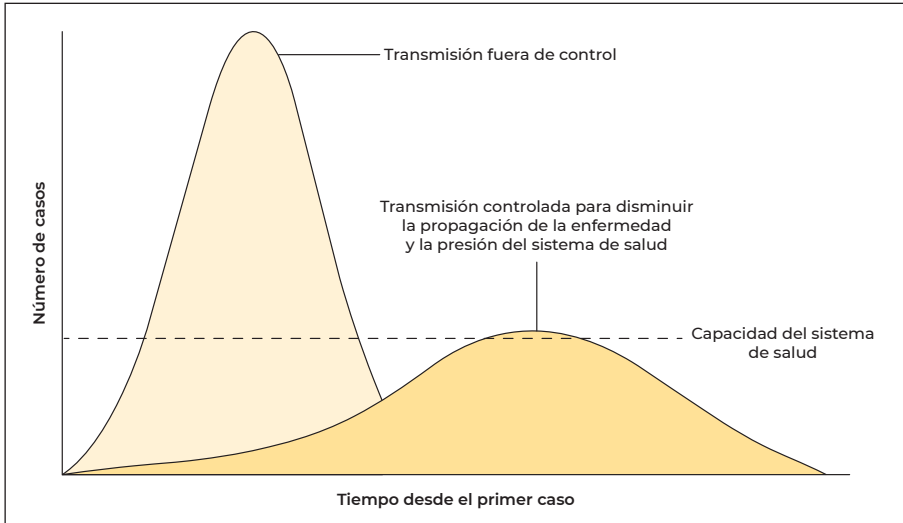
Tabla 2. Ejemplos de curvas epidémicas que muestran diferentes comportamientos en la velocidad de transmisión y duración de una enfermedad

EPIDEMIA	PUNTUAL	MASIVA PROLONGADA	PROGRESIVA	MIXTA
Duración	Corta (horas, días)	Larga (semanas, meses)	Larga (semanas, meses)	Variable
Curva	Unimodal	Unimodal	Multimodal	Picos altos, seguidos de picos pequeños
Gráfica				

Fuente: modificado a partir de Idrovo (2000).

Los análisis numéricos y gráficos de la frecuencia de casos de enfermedad en el tiempo, antes y después de una intervención, permiten evaluar su efectividad. En la siguiente figura se presenta el comportamiento de la curva epidémica cuando no hay control y cuando las medidas de intervención han logrado controlar la velocidad de transmisión.

Figura 4. Curva epidémica con un escenario sin intervención y otro con intervención, mostrando cómo se modifica el comportamiento de una epidemia



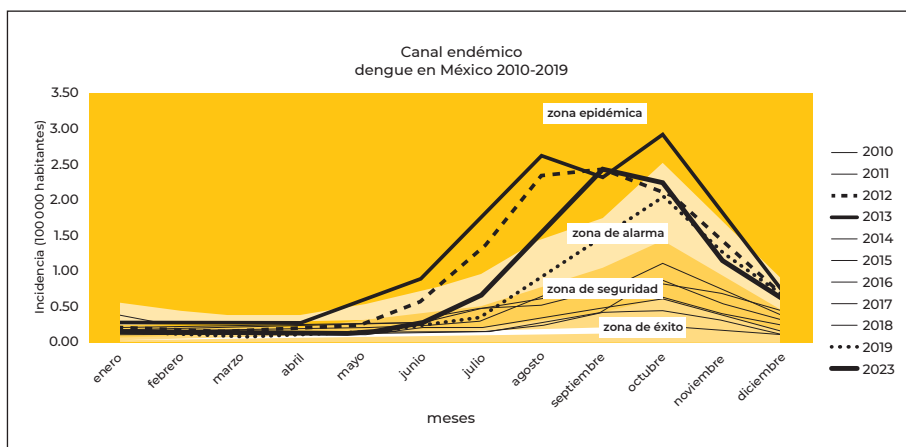
Fuente: modificado a partir de Esther Kim y Carl T. Bergstrom.¹

Otra herramienta utilizada para hacer análisis temporales son los canales endémicos. Básicamente, estos hacen referencia a la línea base de casos esperados de una enfermedad en una población en un tiempo y lugar determinados. Es decir, nos indican los valores habituales esperados y nos alertan si ocurre un brote epidémico, al mostrar cómo se desvía el número de casos con respecto a los anticipados. El canal endémico se divide en cuatro zonas: 1) zona de éxito, cuando el número de casos se encuentra dentro de lo esperado, o si se presentan en menor cantidad; 2) zona de seguridad, que indica que la enfermedad se mantiene dentro de lo esperado sin riesgo para la población; 3) zona de alarma, que señala que la frecuencia se encuentra aún dentro de lo habitual, pero con una tendencia a los valores más altos observados, representando un posible riesgo

¹ Disponible en <https://ctbergstrom.com/covid19.html>

para la población, y 4) zona de epidemia, cuando el número de casos excede lo esperado. En la siguiente figura se presenta el canal endémico para dengue en México durante el periodo 2010-2019. Con esta herramienta, se observa que en 2012 y 2013 ocurrieron brotes epidémicos de dengue, y en 2019 el número de casos estuvo en la zona de alarma. A este canal endémico se le han agregado los datos de 2023, que ha sido uno de los más calurosos de la historia, y se puede ver que también hubo un brote epidémico. Este resultado debe analizarse para evaluar los factores ambientales potencialmente asociados a estos brotes epidémicos.

Figura 5. Canal endémico para los casos de dengue de 2010 a 2019

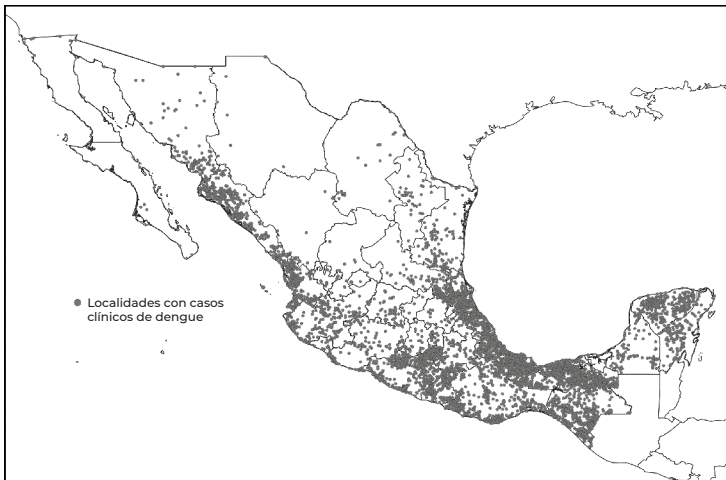


Fuente: Dirección General de Información en Salud de México (2020).

La pregunta ¿dónde? nos lleva a evaluar la localización geográfica de los problemas de salud. Esto es fundamental para conocer la extensión y velocidad de diseminación de una enfermedad. La unidad geográfica puede ir desde algo local como el domicilio, la calle, la manzana o la colonia donde se registran casos, hasta la provincia, estado u otro nivel de agregación geopolítica. El lugar también puede ser una jurisdicción de salud, un hospital, el

área de trabajo, el área rural o urbana, u otro espacio de interés. El análisis del lugar en cuanto a sus características físicas y biológicas permite generar hipótesis sobre posibles factores de riesgo y de transmisión. El avance en el desarrollo de los sistemas de información geográfica ha enriquecido significativamente el análisis de la variable lugar. Los métodos y técnicas para el análisis espacial de datos epidemiológicos facilitan la integración de información sobre distintos determinantes de la salud, desde el nivel individual hasta el ambiental, e identifican áreas de riesgo y necesidades básicas de salud en una región geográficamente definida. En la siguiente figura se observan las localidades geográficas donde se registraron casos de dengue de 2010 a 2019. El mapeo también puede proporcionar algunas pistas sobre la etiología y evolución de un brote epidémico. Más adelante, veremos la relevancia de estos datos y herramientas de análisis espacial para construir mapas de riesgo para enfermedades en escenarios de cambio climático y hacer análisis de cambios en la distribución de patógenos y enfermedades.

Figura 6. Distribución de localidades geográficas de casos de dengue en México



Fuente: Dirección General de Información en Salud de México (2020).

Por último, al abordar la pregunta ¿quiénes?, se busca determinar la distribución de las enfermedades dentro de las poblaciones e identificar posibles grupos y factores de riesgo. Aquí cobra relevancia la integración de los determinantes sociales de la salud para identificar el riesgo, la susceptibilidad y la vulnerabilidad de las personas a una determinada enfermedad. Determinantes de la salud –tales como la edad, el género, el estado nutricional y los hábitos y conductas– pueden indicar la susceptibilidad de una persona a desarrollar una enfermedad. Otros factores, como la condición social –estado civil, religión–, las condiciones de vida y de trabajo reflejan el nivel de exposición a los agentes infecciosos. Finalmente, el acceso a servicios de salud y las condiciones ambientales nos indican el nivel de vulnerabilidad. En última instancia, la intensidad y el impacto de una enfermedad en la sociedad están determinados por la interacción de todos estos determinantes de la salud. En la tabla 3 se muestran ejemplos.

Tabla 3. Determinantes de la salud que pueden contribuir a la emergencia y reemergencia de enfermedades transmisibles

DETERMINANTES DE LA SALUD	EJEMPLOS
Características individuales	Edad, sexo, genética
Conducta humana	Comportamiento, uso de drogas, movilidad, actividades al aire libre
Producción de alimentos	Globalización de productos alimentarios, cambios en la preparación, procesamiento y empaque de alimentos
Factores sociales	Pobreza, conflictos civiles y armados, crecimiento poblacional, migración, deterioro urbano
Atención de salud	Falta de servicios médicos, trasplante de órganos y tejidos, drogas, uso masivo de antibióticos
Infraestructura de salud pública	Falta/reducción de programas preventivos, inadecuada vigilancia de enfermedades, escasez de personal
Cambios ambientales	Cambios en los ecosistemas por deforestación/reforestación, inundaciones/sequías, desastres naturales, introducción de especies, cambio climático

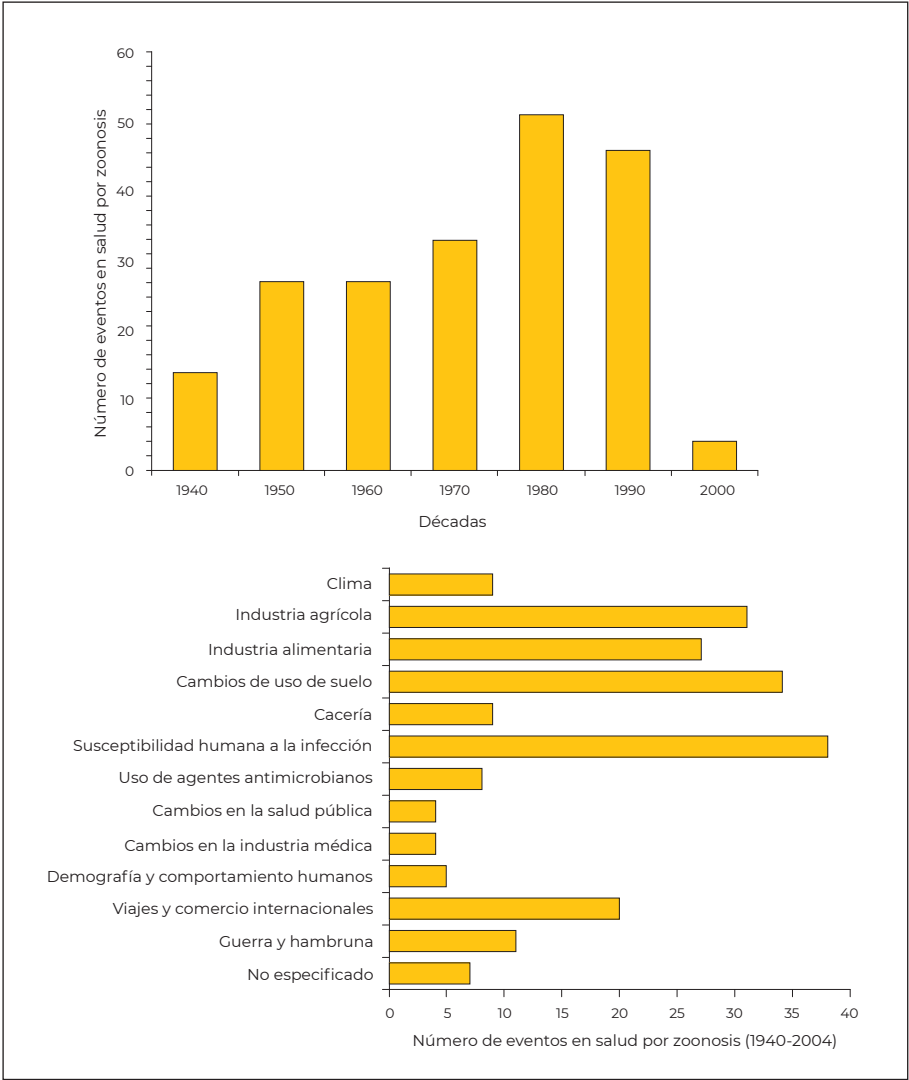
Fuente: modificado a partir de Castillo-Salgado y colaboradores (2011).

EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS ZOONOSIS

Las zoonosis representan una de las principales amenazas a la salud pública a nivel global, con un gran costo tanto económico como en términos de mortalidad y morbilidad (Daszak et al., 2000; Jones et al., 2008; Wilcox y Gubler, 2005). Como hemos visto, estas enfermedades se caracterizan por la transmisión de patógenos de animales vertebrados o invertebrados a humanos. La incidencia y frecuencia de las enfermedades zoonóticas se ha incrementado en los últimos años (Jones et al., 2008; Wilcox y Gubler, 2005). Un estudio de Jones y colaboradores (2008) muestra cómo los eventos en salud por zoonosis han ido en aumento desde 1940. En la siguiente figura se puede ver esa tendencia por década. Aunque parece que disminuye hacia el año 2000, es importante tener en cuenta que los datos no abarcan toda la década, ya que su estudio sólo consideró hasta 2004.

Una gran variedad de factores han contribuido al incremento de las zoonosis, entre los cuales se pueden mencionar la transformación de los hábitats naturales (Brearley et al., 2013; Gibb et al., 2020; Wolfe et al., 2005); la pérdida de biodiversidad (Keesing et al., 2010; Keesing y Ostfeld, 2021); variaciones en la demografía humana y animal (Baker et al., 2022; Pimentel et al., 2007); la dispersión de patógenos y vectores por la movilidad humana (Arguin et al., 2009; Fèvre et al., 2006; Williams et al., 2002) y, por supuesto, el cambio climático (Koganti y Molumby, 2019; Short et al., 2017). En el mismo trabajo de Jones y colaboradores se exploran los factores asociados a la aparición de zoonosis. En la siguiente figura se observa cómo actividades como la industria o el cambio de uso de suelo han favorecido la aparición de zoonosis. Sin duda, las actividades humanas son el principal impulsor de los cambios ambientales que estamos experimentando, dado que causan una degradación ambiental sin precedentes. La oms estima que el 23% de las muertes globales están relacionadas con entornos poco saludables.

Figura 7. Tendencia en eventos en salud por zoonosis (gráfica superior).
Eventos en salud derivados de diferentes factores sociales
y ambientales (gráfica inferior)



Fuente: Jones y colaboradores (2008). Los datos corresponden al periodo de 1940 a 2004.

La complejidad inherente de las zoonosis se hace evidente cuando consideramos los múltiples factores involucrados, que van desde lo microscópico –como la interacción entre un parásito, bacteria o virus con el sistema inmune– hasta lo macroscópico –como la interacción entre reservorios y vectores o la influencia de las variables ambientales en la incidencia de casos en humanos– (Gibb et al., 2020; Rabozzi et al., 2012). Incluso la complejidad social es un factor importante, dada la importancia de las condiciones socioeconómicas y culturales que pueden influir en la transmisión de las enfermedades (Lindahl et al., 2015; Stephens et al., 2023). Todos estos procesos involucran la contribución individual o combinada de factores ecológicos, ambientales, conductuales y socioeconómicos en la emergencia o reemergencia de zoonosis a escala regional y local (Allen et al., 2017; Kilpatrick y Randolph, 2012). Por ejemplo, cuando la covid-19 surgió en China, los viajes internacionales actuaron como “dispersores” debido a su fácil transmisión interhumana. Las epidemias anuales de virus respiratorios, como las influencias, se relacionan con las bajas temperaturas del invierno, que favorecen la transmisión de microbios en espacios cerrados. El desarrollo de la agricultura se acompañó de un aumento en las poblaciones de roedores, reservorios de virus de fiebres hemorrágicas, creando un serio riesgo para la salud en zonas rurales. En las zonas tropicales, las lluvias frecuentes contribuyen al aumento de la abundancia de diferentes especies de mosquitos, con un consecuente incremento en la prevalencia de enfermedades como el dengue y la malaria (Hortal, 2015). Se podría generar un interminable listado de la variedad de elementos que participan en la emergencia de enfermedades infecciosas, y la carga que representan para la salud y la economía de las sociedades.

Enfermedades transmitidas por vectores

Las enfermedades transmitidas por vectores (ETV) son aquellas en las que un agente infeccioso (virus, bacterias, parásitos) es transmitido al

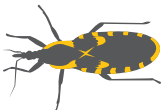
ser humano por un artrópodo hematófago, como mosquitos, chinches o garrapatas. De acuerdo con la OMS, estas enfermedades representan al rededor del 17% de todas las enfermedades infecciosas y causan más de 700 000 muertes al año. Los artrópodos son probablemente las especies de mayor importancia médica debido a su abundancia, alta plasticidad, adaptabilidad y coevolución con diferentes tipos de patógenos, así como su alto grado de sinantropismo en varios grupos (Bueno-Marí et al., 2015; Patz et al., 2005). El sexto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Cissé y McLeman, 2023) enfatiza que varios problemas de ETV podrían verse exacerbados por el cambio climático (Mills et al., 2010). Esto se debe principalmente a que la mayoría de los procesos biológicos, ecológicos y demográficos de los artrópodos vectores están fuertemente ligados a la variabilidad climática (Gubler et al., 2001). Por consiguiente, un tópico de investigación de gran interés es determinar las consecuencias que el cambio climático tendrá en la redistribución e incidencia de enfermedades transmitidas por vectores (Mora et al., 2022; Rosenthal, 2011; Short et al., 2017).

Para entender el efecto que puede tener el clima en los ciclos de transmisión de patógenos por vectores al ser humano y, por ende, los impactos en salud pública, debemos considerar la complejidad ecológica de las ETV, que abarcan una variedad de interacciones ecológicas. Los ciclos de transmisión involucran tres componentes principales: 1) El agente causal. Son los organismos infecciosos, que pueden ser bacterias, virus, hongos, protozoos o helmintos. La principal característica de estos organismos es que pasan parte de su ciclo de vida en un artrópodo. 2) El vector. Es el artrópodo que funciona como reservorio del agente causal y actúa como vehículo de transmisión al ser humano u otro animal vertebrado. Un mismo vector puede transmitir varios agentes (por ejemplo, *Aedes aegypti*). 3) Un hospedero. Es una persona o animal (ave, mamífero, reptil) que en circunstancias naturales permite la subsistencia o el alojamiento de un agente. Es importante mencionar que hay

varios tipos de hospederos de acuerdo con su participación en la dinámica de transmisión de los patógenos, la cual puede estar determinada por características genéticas. Así, tenemos, por un lado, los hospederos competentes, con dos características principales: en primer lugar, la capacidad de transmitir el agente infeccioso que adquieren, ya sea a otros hospederos por algún tipo de contacto o a los vectores cuando éstos se alimentan del hospedero infectado; en segundo lugar, el tiempo que dura la infección, ya que el patógeno se mantiene en el hospedero durante el tiempo suficiente para que lo transmita a otros organismos. Este tipo de hospederos tienen una participación importante en los ciclos biológicos de los patógenos, así como en mantener los ciclos de transmisión en las poblaciones animales y humanas. Por otro lado, tenemos los hospederos no competentes u hospederos sin salida, que son organismos que no tienen la capacidad de transmitir los patógenos que los infectan; incluso en algunos casos estos hospederos mueren al desarrollar una enfermedad por el patógeno que adquieren (Suzán et al., 2017). Además, se debe considerar que un mismo hospedero puede alojar diferentes agentes infecciosos. Esta capacidad puede favorecer altos niveles de diversidad genética de los patógenos y mayores oportunidades de transmisión entre especies (Woolhouse et al., 2001).

Tabla 4. Ejemplo de enfermedades transmitidas por vectores presentes en México

TIPO DE PATÓGENO	VECTOR (NOMBRES CIENTÍFICOS)	HOSPEDERO	ENFERMEDAD
Virus	Mosquitos (<i>Aedes</i> , <i>Culex</i>)	Humanos	Dengue
		Primates no humanos	Zika
		Aves	Chikunguña
			Enfermedad por el virus del Nilo

Parásito	Chinches (<i>Triatomas</i>) 	Humanos Marsupiales Roedores Murciélagos	Enfermedad de Chagas
	Flebotomos (<i>Lutzomyia</i>) 	Humanos Marsupiales Roedores Murciélagos	Leishmaniasis
Bacteria	Garrapatas (<i>Ixodes</i>) 	Humanos Vacas Cérvidos Roedores Aves	Enfermedad de Lyme

Fuente: elaboración propia.

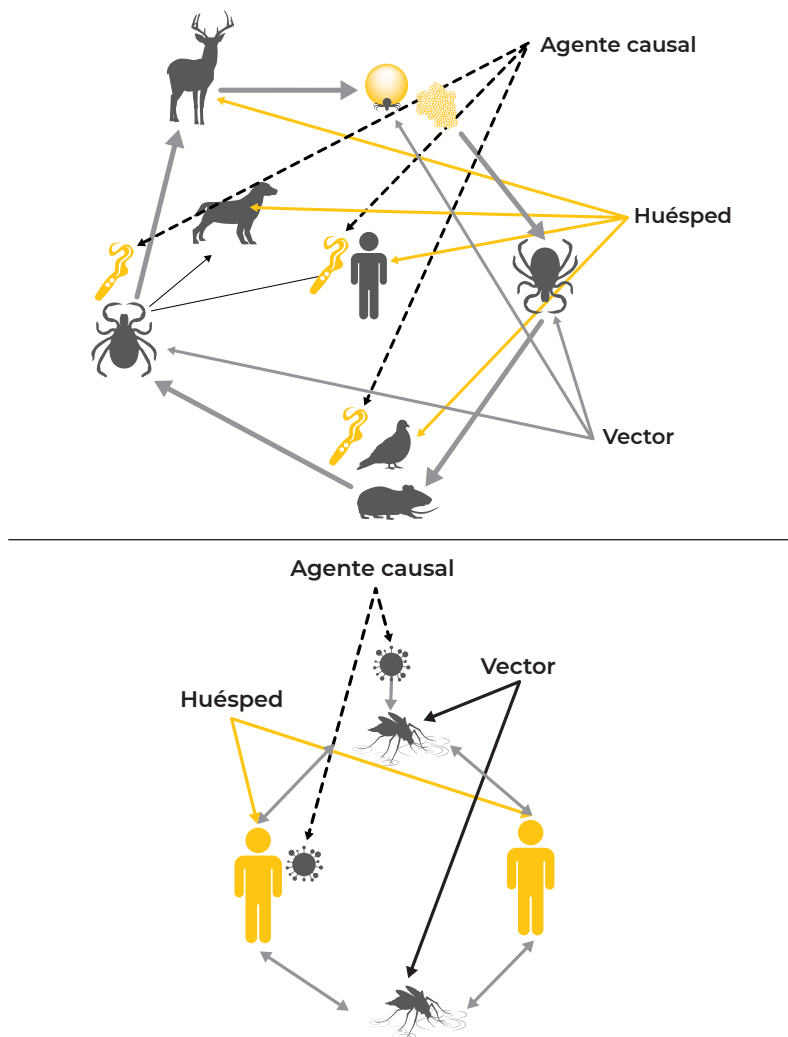
En su origen, los patógenos causantes de las ETV circulaban de forma natural entre artrópodos y animales silvestres, quienes son sus hospederos naturales. Sin embargo, actividades como la deforestación y el crecimiento de los asentamientos humanos han propiciado un contacto entre el ser humano y estos ciclos naturales de transmisión, lo que ha llevado a la adquisición incidental de infecciones por parte de los humanos, quienes no forman parte del ciclo natural. Incluso en la actualidad, numerosos microorganismos potencialmente infecciosos circulan en la naturaleza en ciclos de transmisión silenciosos entre vectores y animales silvestres, y pasan desapercibidos. De modo que cuando los seres humanos entran en contacto con estos ciclos, ya sea por la incursión en zonas naturales o por algún cambio ambiental, estos ciclos pueden desbordarse e infectar a la población humana (Gubler et al., 2001).

Aunque la mayoría de las ETV sigue manteniendo ciclos de transmisión que involucran a un gran número de animales vertebrados e

invertebrados silvestres, en algunos casos estos ciclos se han alterado por la intervención humana en los sistemas naturales. Actualmente, existen ciclos de transmisión que involucran animales domésticos, como el ganado o las mascotas, sin necesidad de animales silvestres. Este fenómeno, denominado “domiciliación de los ciclos de transmisión”, ha llegado al extremo de que el ser humano se ha convertido en el hospedero principal, sin requerir la participación de animales silvestres o domésticos para mantener la transmisión de los patógenos. Un ejemplo claro de este tipo de enfermedades es el dengue y la malaria.

Para comprender este fenómeno de domiciliación, consideramos el caso del dengue. Este virus es originario de Asia, donde se cree que circulaba en un ciclo selvático entre primates no humanos y mosquitos en la península de Malasia (Guzmán et al., 2008). El primer registro del virus en poblaciones humanas apareció en una enciclopedia médica china de la dinastía Jin (del año 266 a 420), donde se asocia la presencia de insectos con “agua venenosa” (Lage et al., 2015). A lo largo de la historia, se han registrado brotes epidémicos asociados al crecimiento de actividades humanas, como el comercio y los conflictos bélicos, lo que llevó a la dispersión del virus y de los mosquitos fuera de sus áreas de distribución originarias. Se cree que el mosquito transmisor del virus llegó a América desde África con los primeros europeos al continente americano. Los primeros brotes de dengue en la región de las Américas datan de 1635, aunque el primer caso formalmente descrito se atribuye a Benjamin Rush en 1789, quien denominó la enfermedad como “fiebre rompe huesos” debido a los síntomas que presentaban las personas infectadas en Filadelfia, Estados Unidos (Florián et al., 2015; Lage et al., 2015, Mattar et al., 2019). La dispersión de los mosquitos favorecida por los seres humanos ha dado lugar a una relación muy estrecha entre estos organismos y los ambientes antrópicos. En estos hábitats artificiales, las poblaciones de mosquitos se mantienen, y el ser humano se ha convertido en su principal fuente de alimento, eliminando la necesidad de interactuar con algún mamífero no humano o de establecerse en ambientes naturales.

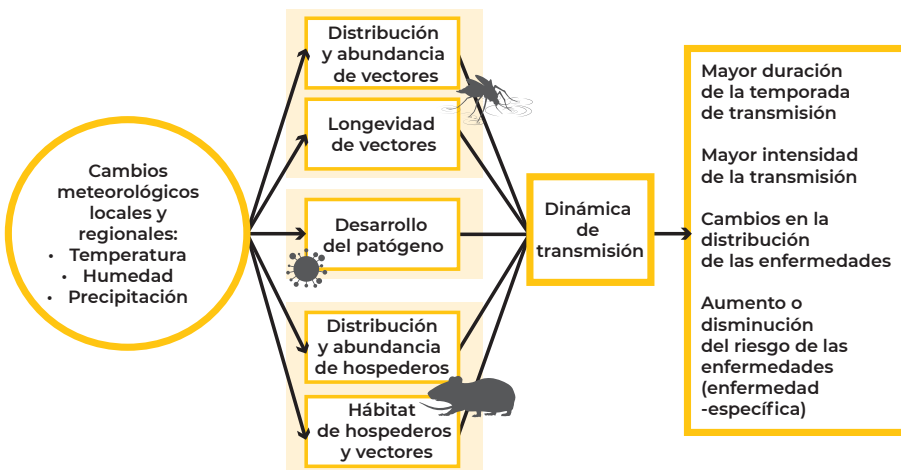
Figura 8. Ejemplo de dos ciclos de transmisión de un agente infeccioso



Nota: la imagen superior presenta un ciclo que involucra un gran número de especies silvestres y domésticas que interactúan con el vector. La imagen inferior es un ciclo donde el vector interactúa únicamente con el ser humano. **Fuente:** modificado a partir de Scott (2019).

Los cambios proyectados en la temperatura, precipitación y eventos meteorológicos extremos tendrán repercusiones sobre el medio ambiente en el que se distribuyen las especies de patógenos y los animales que mantienen sus ciclos de vida, modificando la ecología de estas especies. Dada la complejidad de los ciclos de transmisión, es de esperar que el cambio climático tenga efectos diferenciales dependiendo del agente que se evalúe, ya sea patógeno, vector u hospedero.

Figura 9. Esquema de los efectos del cambio climático sobre patógenos, vectores y hospederos, así como las posibles respuestas en la incidencia de enfermedades



Fuente: modificado a partir de Gubler y colaboradores (2001).

Al enfocarnos en los vectores, uno de los efectos esperados es que, en temperaturas más cálidas, los artrópodos desarrollen ciclos de vida más cortos, con más de una generación por año, lo que podría conducir a mayores densidades poblacionales. Este fenómeno se ha observado en mosquitos del género *Anopheles*, transmisor del agente causal de la malaria en Argentina (Carcavallo y de Casas, 1996), y en chinches del género *Triatoma*, transmisoras de agente causal de la enfermedad de

Chagas (Carcavallo, 1999). Una mayor abundancia de insectos hematófagos incrementará la tasa de encuentros con los humanos. Además, si se combinan altas temperaturas con baja humedad, los artrópodos hematófagos se desecarán más rápidamente, lo que aumentará su necesidad de alimentarse, incrementando así la tasa de picaduras en las personas (Carcavallo y de Casas, 1996; Khasnis y Nettleman, 2005). Las lluvias tienen además un efecto en la longevidad del vector, ya que al aumento de la humedad crea un hábitat favorable para su desarrollo (Berberian et al., 2012). Estos cambios fenológicos se reflejarán en una mayor duración e intensidad de la temporada de transmisión de los patógenos. Además, el cambio en las condiciones climáticas tiene el potencial de ampliar los rangos de distribución de las especies, al convertir algunas regiones que antes eran inhabitables en hábitats adecuados (González-Salazar et al., 2022; Lafferty, 2009). Se observan cambios en la distribución en los mosquitos *Aedes aegypti* y *A. albopictus*, originarios de Asia, que actualmente tienen una distribución casi global, aunque siguen en proceso de expansión, sobre todo hacia altitudes más elevadas.

En los animales silvestres que sirven de hospederos para los patógenos, las altas precipitaciones pueden favorecer una mayor disponibilidad de alimento vegetal, lo que incrementaría el volumen poblacional debido al acceso a más recursos. Diversas especies de roedores, comunes hospederos para varios patógenos, podrían incrementar sus números, aumentando los contactos con vectores (Patz et al., 2003). Al igual que los vectores, los hospederos también pueden modificar sus rangos geográficos, migrando a áreas donde las condiciones sean más favorables, lo cual podría llevar patógenos a nuevas zonas o integrar nuevos ciclos de transmisión. Otro tipo de migración ocurre cuando las condiciones se vuelven adversas, lo que lleva a estos animales hacia asentamientos humanos y genera procesos de sinantropismo en especies silvestres (Gubler et al., 2001). Uno de los impactos esperados del cambio climático es la reducción de la biodiversidad en diferentes regiones, lo

que pone en riesgo uno de los principales servicios ecosistémicos: la reducción de la incidencia de enfermedades zoonóticas. Se ha observado que en sitios con alta biodiversidad se amortigua la transmisión de patógenos a los seres humanos, un servicio conocido como el efecto de dilución (Keesing y Ostfeld, 2021; Schmidt y Ostfeld, 2001). Ante una reducción en la biodiversidad, este efecto podría perderse, lo que incrementaría la incidencia de enfermedades.

En cuanto a los patógenos, las variables climáticas pueden influir en su desarrollo dentro de los vectores. Por ejemplo, las altas temperaturas pueden acelerar el desarrollo de *Trypanosoma cruzi*, el parásito causante de la enfermedad de Chagas, y aumentar el número de formas infecciosas (por ejemplo, tripomastigote metacíclico y sanguíneo) en las chinches vectores (Asin y Catalá, 1995; Tamayo et al., 2018). De manera similar, *Plasmodium falciparum* y *P. vivax* se desarrollan más rápidamente en el interior de los mosquitos *Anopheles*, cuando aumentan las temperaturas (Lafferty, 2009). En la tabla 5 se presentan ejemplos de los efectos observados en un grupo de enfermedades en diferentes regiones.

Tabla 5. Ejemplos de factores climáticos que influyen en la transmisión y distribución de enfermedades transmitidas por vectores

	ENFERMEDAD (AGENTE CAUSAL)	VECTOR
ENFERMEDADES PARASITARIAS	Malaria (<i>Plasmodium vivax</i>)	Mosquitos
	Leishmaniasis (<i>Leishmania spp.</i>)	Moscas de arena
	Enfermedad de Chagas (<i>Trypanosoma cruzi</i>)	Triatominos
ENFERMEDADES VIRALES	Fiebre del dengue (virus del dengue)	Mosquitos
	Fiebre chikunguña (virus Chikungunya)	Mosquitos
	Enfermedad por el virus del Nilo Occidental (virus del Nilo Occidental)	Mosquitos
ENFERMEDADES BACTERIANAS	Enfermedad de Lyme (<i>Borrelia burgdorferi</i>)	Garrapatas
	Anaplasmosis humana (<i>Anaplasma phagocytophilum</i>)	Garrapatas

Fuente: modificado a partir de Gage y colaboradores (2008).

FACTORES CLIMÁTICOS RELEVANTES	EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA O CAMBIO CLIMÁTICO
Temperatura Precipitación Humedad Efectos de El Niño Temperaturas de la superficie del mar	Distribución de enfermedades Desarrollo de patógenos en vectores Desarrollo, reproducción, actividad y abundancia de vectores Patrones e intensidad de transmisión Brotos epidémicos
Temperatura Precipitación Efectos de El Niño	Incidencia de enfermedades Brotos epidémicos Abundancia, comportamiento y distribución de vectores
Temperatura Precipitación Humedad Climas extremos	Distribución de vectores Infestación de viviendas por vectores
Temperatura Precipitación	Brotos epidémicos Reproducción y abundancia de mosquitos Intensidad de transmisión
Temperatura Precipitación	Brotos epidémicos Reproducción y abundancia de mosquitos Intensidad de transmisión
Temperatura Precipitación	Tasas de transmisión Distribución de la enfermedad Distribución de vectores Desarrollo de patógenos en vectores
Temperatura Precipitación Humedad	Frecuencia de casos Interacción huésped-vector Distribución de vectores
Temperatura Precipitación	Frecuencia de casos Interacción huésped-vector Distribución de vectores

Para entender el impacto del cambio climático en las enfermedades transmitidas por vectores en México, se presenta una revisión de las investigaciones realizadas en el país sobre la enfermedad de Chagas y el dengue. Esta revisión forma parte del reporte *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*, publicado por el Programa de Investigación en Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).² Sólo se brinda información sobre estas dos enfermedades, ya que no existen datos disponibles sobre otras en el contexto del cambio climático.

De acuerdo con la revisión, hasta la fecha se carece de estudios que documenten explícitamente si el cambio climático contemporáneo ha tenido un efecto sobre las ETV presentes en México, ya sea 1) modificando la incidencia de la enfermedad y generando brotes epidémicos (por ejemplo, aumento inusual del número de casos de una enfermedad particular); 2) alterando la dinámica de transmisión de los patógenos entre vectores, hospederos y humanos, o 3) que ciertas especies de vectores, hospederos o patógenos sean registradas en sitios donde históricamente han estado ausentes. Estos vacíos de información, en temas que deberían ser prioritarios para las evaluaciones de riesgo sobre la emergencia y reemergencia de diversas zoonosis, plantean desafíos en la investigación que deben abordarse en el corto y mediano plazo.

Dengue

El dengue es una de las principales enfermedades, transmitidas por artrópodos, con alta morbilidad y mortalidad a nivel mundial, y con un elevado coste económico (Velandia y Castellanos, 2011). Fue identificado por primera vez en Filipinas y Tailandia; sin embargo, hoy en día está presente prácticamente en todo el mundo (OMS, 2020). En México, la

² Este reporte está disponible en <https://cambioclimatico.unam.mx/>

enfermedad se ha registrado desde 1941, pero se consideró endémica en el país hasta 1956 (López Arellano, 1990). El patrón de diseminación fue de sur a norte, a lo largo de los estados del sureste y el golfo de México, hacia la mayoría de las entidades del resto del país (Narro y Gómez, 1995).

Se estima que cada año se producen 390 millones de infecciones por el virus del dengue. El número de casos notificados a la oms se ha multiplicado por ocho en las últimas dos décadas. La oms ha estimado que un aumento de la temperatura global de entre 1 y 2 °C podría incrementar en varios cientos de millones los casos de dengue, así como aumentar entre 20 000 y 30 000 las muertes por año (Ávila Agüero, 2008). El virus del dengue es transmitido al humano por los mosquitos *Aedes aegypti* y *A. albopictus*, los cuales se han adaptado a entornos rurales, urbanos y suburbanos. Estos mosquitos viven y se reproducen alrededor de las casas donde habitan las personas. Como se mencionó anteriormente, la transmisión de este virus se da entre humanos y mosquitos, y no se requiere la presencia de otras especies animales para mantener las poblaciones de los mosquitos y el virus circulando. Aunque se han identificado algunos murciélagos con este virus (Aguilar-Setién et al., 2008; Sotomayor-Bonilla et al., 2014), aún se desconoce si desempeña algún papel en la transmisión o mantenimiento del virus, es decir, no hay estudios que determinen si son hospederos competentes.

Estos mosquitos se caracterizan por su preferencia por climas cálidos (de 15 a 40 °C) y con niveles de precipitación pluvial moderados a altos, donde se generan condiciones favorables para su reproducción. La precipitación y la temperatura han sido reportadas como factores que influyen no sólo en la dinámica poblacional de *A. aegypti*, sino también en su capacidad para transmitir el virus (López-Latorre y Neira, 2016). El límite de temperatura más bajo en el que *A. aegypti* deja de picar es 15 °C, mientras que su actividad máxima ocurre a los 28 °C (Tran et al., 2020). La oms estima que la probabilidad de transmisión del dengue se ha incrementado en un 12% desde los años cincuenta hasta la fecha.

En México, la mayor incidencia de casos de dengue se observa durante la temporada de lluvias (junio-octubre).³ Además, se ha documentado que los aumentos de la temperatura están estrechamente asociados a una mayor incidencia de dengue en México (Colón-González et al., 2011; Hurtado-Díaz et al., 2007). Análisis de los patrones de abundancia de *A. aegypti* han encontrado una relación positiva con mayores precipitaciones en Baja California Sur y Morelos (Tovar-Zamora et al., 2019; Betanzos-Reyes et al., 2018). En cuanto a cambios geográficos, se ha documentado la presencia de *A. aegypti* en altitudes mayores a sus límites originales (<1 200 metros sobre el nivel del mar) en Xalapa, Veracruz (Equihua et al., 2017) y Ciudad de México (Mejía-Guevara et al., 2020). Sin embargo, en estos estudios no se evaluó la presencia de algún patógeno ni el posible rol del clima, o los cambios en el paisaje que hayan favorecido estos movimientos.

Enfermedad de Chagas

También conocida como tripanosomiasis americana, es una de las enfermedades parasitarias con mayor costo económico en América Latina. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha estimado que aproximadamente 25 millones de personas corren riesgo de infección y entre seis y siete millones de personas están infectadas (Coura y Dias, 2009; OMS, 2010). Se estima que alrededor de cinco millones de personas en México están potencialmente en riesgo de contraer la enfermedad de Chagas, y anualmente se reportan alrededor de 69 000 nuevas infecciones (Carabarin-Lima et al., 2013). El agente causal de la enfermedad de Chagas es el protozoo *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) (*Kinetoplastida*, *Trypanosomatidae*), que se transmite por las

³ Ver la figura 5 del canal endémico de dengue.

heces infectadas de triatominos al ingresar al torrente sanguíneo humano. En condiciones naturales, el ciclo de vida de *T. cruzi* alterna entre insectos vectores (chinchas de la familia *Reduviidae*, subfamilia *Triatominae*) y huéspedes vertebrados (principalmente mamíferos) (Arce-Fonseca et al., 2017; Ramsey et al., 2015; Rengifo-Correa et al., 2017). En México, 21 especies de chinchas han sido confirmadas como positivas a *T. cruzi* y pueden ser consideradas vectores potenciales del parásito. Hasta el momento, se han confirmado 52 especies de mamíferos silvestres y 12 especies de mamíferos domésticos como positivas para *T. cruzi* (González-Salazar et al., 2022). Cabe destacar que en las especies domésticas se incluyen perros de zonas urbanas, lo cual indica un posible proceso de urbanización del ciclo de transmisión.

La enfermedad de Chagas presenta una estacionalidad definida, con la mayor incidencia de casos en las estaciones de primavera y verano (Ibáñez-Cervantes et al., 2019), debido en gran parte a la estacionalidad de los ciclos de vida de los vectores. La distribución de las chinchas se concentra en su mayoría en zonas tropicales (Ramsey et al., 2015); sin embargo, varias especies han comenzado a registrarse en zonas templadas y a mayores altitudes. En estos casos se han registrado individuos positivos al patógeno (*Trypanosoma cruzi*), observándose un efecto combinado de la modificación del paisaje y el aumento de la temperatura en la presencia de estas especies (González-Salazar et al., 2022). Un estudio realizado por Guzmán-Gómez y colaboradores (2021) para *Triatoma dimidiata*, vector confirmado de *T. cruzi*, encontró que el mayor número de casas infestadas por esta chinche se asocia positivamente con valores altos de temperatura y precipitación. En cuanto al patógeno, estudios de laboratorio con variables climáticas mostraron que las altas temperaturas aceleran el desarrollo de *T. cruzi* en los vectores (Carcavallo, 1999; Tamayo et al., 2018). Además, se considera que un aumento en la temperatura ambiental conduce a un incremento en las tasas de desarrollo y reproducción de los triatominos (Martínez-Ibarra

et al. 2008; Villegas-García y Santillán-Alarcón, 2004) y a eventos más frecuentes de alimentación (Asin y Catalá, 1995; Catalá, 1991).

Enfermedades transmitidas por roedores

Los roedores actúan como importantes reservorios de diversos patógenos zoonóticos, incluyendo bacterias, virus y protozoos. Participan en varios ciclos de transmisión de enfermedades transmitidas por vectores (Gubler et al., 2001). Sin embargo, también son reservorios de ciertos agentes infecciosos que pueden transmitir al ser humano sin la intervención de un vector. Los patógenos que transmiten son un riesgo para la salud, ya que los patrones de infección pueden variar con el clima y, posiblemente, por el cambio climático. Por ejemplo, en inviernos cálidos y con incrementos en la precipitación, la abundancia de roedores aumenta, lo que conlleva a un incremento en el número de individuos potencialmente infectados con algún patógeno. Eventos extremos, como altas precipitaciones e inundaciones, pueden generar condiciones que aumenten la probabilidad de contacto con roedores o con sus desechos (heces, orinas) potencialmente contaminados con patógenos (Patz et al., 2003).

Las enfermedades transmitidas por roedores se pueden clasificar en dos categorías: de transmisión directa o indirecta. En la primera categoría, las enfermedades se transmiten por mordeduras o inhalación de gérmenes en las heces de los roedores. En la segunda categoría, la transmisión es indirecta, y los humanos se infectan por el consumo de alimentos o agua contaminados con heces u orina de roedores. Además, los roedores consumidos accidentalmente por ganado pueden mediar en la transmisión de enfermedades a los humanos si los productos del ganado no se tratan adecuadamente antes de su consumo (Rabiee et al., 2018). A continuación, veremos dos de las principales enfermedades transmitidas por roedores y su relación con factores climáticos.

Hantaviriosis

El género *Hantavirus* incluye al menos 14 tipos de virus, entre los cuales se encuentran aquellos que causan la fiebre hemorrágica con síndrome renal (HFRS) y el síndrome pulmonar por hantavirus (HPS). El ser humano puede adquirir estos virus al inhalar partículas contaminadas de las heces de roedores. Los roedores de las familias *Sigmodontinae* y *Neotominae* son los principales reservorios naturales de hantavirus; sin embargo, se han detectado anticuerpos en animales domésticos y silvestres como gatos, perros, puercos, ganado y ciervos (Zeier et al., 2005). Los brotes epidémicos de hantavirus se han asociado con cambios en las densidades de población de roedores, que pueden variar considerablemente a lo largo del tiempo, tanto estacionalmente como año con año (Schmaljohn y Hjelle, 1997). Se estima que cada año se producen en todo el mundo entre 100 000 y 200 000 casos de infección por hantavirus.

En México, se han reportado 43 especies de roedores de las familias *Cricetidae*, *Heteromyidae*, *Sciuridae* y *Muridae* seropositivos a hantavirus del género *Orthohantavirus*. Estos roedores han sido colectados en 18 estados de México: Zacatecas, Colima, Guerrero, Morelos, Jalisco, Estado de México, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz, Coahuila, Ciudad de México, Chiapas, Michoacán, Hidalgo, Campeche, Yucatán y Nayarit (Moreno et al., 2014; Viguera-Galván et al., 2019). Estos resultados deberían alertar a las entidades académicas y de salud pública sobre el riesgo potencial de enfermedades por hantavirus en las comunidades humanas.

Los cambios que afectan la dinámica de las poblaciones de roedores incluyen la combinación de precipitaciones inusualmente altas seguidas de sequía, lo cual se refleja en brotes epidémicos por hantavirus. Por ejemplo, el brote epidémico de Four Corners en los Estados Unidos, en 1993, fue precedido por un aumento notable de las precipitaciones asociadas con El Niño en 1992-1993. Un patrón similar de

precipitaciones superiores al promedio seguido de sequía se observó antes de un brote de síndrome pulmonar por hantavirus en Paraguay durante 1995-1996 (Gubler et al., 2001). Aunque las enfermedades provocadas por hantavirus no se perciben como un problema de salud pública en México, la asociación observada entre brotes epidémicos y eventos meteorológicos extremos sugiere un posible riesgo ante los cambios climáticos esperados.

Leptospirosis

Es una zoonosis de amplia distribución mundial, pero se presenta con mayor frecuencia en climas tropicales y subtropicales. Es una enfermedad febril aguda causada por bacterias del género *Leptospira*, que infectan a varios animales domésticos y silvestres, los cuales frecuentemente se transforman en portadores asintomáticos. Los roedores sinantrópicos son sus principales reservorios, y el ser humano puede infectarse al entrar en contacto con agua contaminada con la orina de estos roedores. La leptospirosis se cataloga como una enfermedad emergente, con más de 500000 casos anuales y una mortalidad que supera el 10% (Torres-Castro et al., 2016). Se ha documentado que la prevalencia e incidencia de leptospirosis se relaciona con las malas condiciones de vida, higiene y laborales de poblaciones humanas, así como con cambios en los factores climáticos. Inundaciones extremas o huracanes pueden provocar brotes de leptospirosis (Karande et al., 2003). Una epidemia de leptospirosis en Nicaragua, en 1995, fue precedida por fuertes inundaciones (Gubler et al., 2001). En México se ha reportado una relación positiva entre las mayores incidencias de leptospirosis y la temporada de mayor lluvia en Yucatán (Vado-Solís et al., 2002). La estrecha relación entre las estaciones y la incidencia de casos clínicos es un indicativo del potencial de cambio temporal que se puede dar debido a las alteraciones en temperatura y precipitación ante el cambio climático.

EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS SAPRONOSIS

Las sapronosis se generan cuando el ser humano adquiere un agente infeccioso al entrar en contacto con elementos abióticos, como el agua o suelo, materia en descomposición o alimentos contaminados. Este tipo de patógenos pueden vivir de manera libre y también son capaces de desarrollar una vida parasitaria dentro de un organismo vivo. Un tercio de los agentes de enfermedades infecciosas humanas son sapronóticos, incluidas casi todas las enfermedades fúngicas. El reconocimiento de que una enfermedad infecciosa es sapronótica subraya la necesidad de estrategias efectivas de control ambiental (Kuris et al., 2014). La epidemiología de las sapronosis tiene algunas peculiaridades que la diferencia de otros agentes infecciosos, como las zoonosis o antroposis. Estos patógenos no siguen una “estrategia” específica de transmisión, sino que infectan a los huéspedes de forma incidental cuando entran en contacto o ingieren etapas pasivas de los patógenos, como quistes o esporas. En algunos casos, una herida puede favorecer la entrada del patógeno en el organismo. Los organismos saprófagos a menudo se restringen a un tipo de hábitat, por lo que las tasas de transmisión estarán determinadas por la frecuencia en que un potencial hospedero frecuenta dicho hábitat. A continuación, se revisan dos mecanismos de transmisión de sapronosis, a través del agua y de los alimentos, debido a que se ha reconocido que los efectos del cambio climático se reflejarán directamente en estos dos elementos.

Enfermedades transmitidas por agua

El agua es una necesidad básica y su disponibilidad es de suma importancia. Actualmente, 1100 millones de personas no tienen acceso a un suministro adecuado de agua potable (Khasnis y Nettleman, 2005). Anualmente, 1.4 millones de personas pierden la vida debido a

enfermedades relacionadas con la falta de agua potable, saneamiento e higiene básica en los hogares, los centros de atención de salud y las escuelas (Semenza, 2024). Las enfermedades transmitidas por el agua pueden resultar por la exposición a patógenos o sustancias químicas presentes en el agua potable o en el agua recreativa. De manera general, el agua contaminada ingresa al ser humano por ingestión, pero también puede hacerlo al inhalarse o absorberse, o al entrar en contacto con llagas o heridas abiertas. La mayoría de los padecimientos asociados con el agua se relacionan con problemas gastrointestinales, como náuseas, vómitos y diarrea. Muchas enfermedades diarreicas varían con las estaciones, lo que indica que son sensibles al clima. En los trópicos, alcanzan su máximo durante la estación lluviosa. Las principales causas de diarrea relacionadas con precipitaciones abundantes y la contaminación del abastecimiento de agua incluyen el cólera, las infecciones por *Escherichia coli*, las giardiasis, la fiebre tifoidea y las virosis como la hepatitis A, por mencionar algunas.

El cambio climático puede exacerbar estas condiciones. Varios estudios proporcionan evidencia cuantitativa de los vínculos de las enfermedades transmitidas por el agua con factores climáticos como la precipitación y la temperatura del aire. Las estimaciones mundiales sugieren que, entre 2050 y 2065, el exceso de muertes por infecciones entéricas atribuibles a la temperatura podría oscilar entre 10 000 y casi 75 000 por año (Chua et al., 2021). El calentamiento de los océanos está favoreciendo la dispersión de bacterias marinas del género *Vibrio*, responsables del cólera (Martínez Urtaza, 2011). Las infecciones por *Vibrio* pueden causar enfermedades gastrointestinales e infecciones de heridas esporádicas, pero potencialmente graves, que pueden provocar resultados como fascitis necrotizante, septicemia y muerte (Semenza, 2024).

Un estudio en el Estado de México sobre la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua entre 2000 y 2005 muestra que la incidencia de enfermedades era menor en las personas que vivían en zonas

urbanas en comparación con las poblaciones de áreas metropolitanas, posiblemente debido a un mejor acceso a los servicios de salud (Jiménez-Moleón y Gómez-Albores, 2011). Sin embargo, en México se carece de estudios sobre el cambio climático y las enfermedades transmitidas por el agua. Ante los problemas hídricos que presenta el país, es urgente establecer una agenda de investigación en esta área.

Enfermedades transmitidas por alimentos

Las enfermedades transmitidas por alimentos pueden ser parasitarias, bacterianas o tóxicas, y en su mayoría se adquieren mediante la ingestión de alimentos contaminados. Los síntomas resultantes de los patógenos transmitidos por los alimentos varían, desde problemas gastrointestinales (náuseas, vómitos, diarrea y dolor abdominal) hasta afecciones neurológicas (por ejemplo, el síndrome de Guillain-Barré, que puede ser causado por una infección por *Campylobacter*), insuficiencia renal aguda y síndrome urémico hemolítico, que puede ser provocado por una infección por *Escherichia coli* O157:H7, así como malformaciones congénitas por infección por *Toxoplasma gondii*.

La temperatura puede acelerar la tasa de replicación de ciertos patógenos, y así reducir la vida útil de los alimentos. Una de las infecciones más comunes es causada por la bacteria *Salmonella*. Esta infección es sensible al clima, siendo más frecuentes en los meses de verano (Semenza, 2024). En México, se ha identificado que la prevalencia más alta de *Salmonella* se presenta en áreas con temperaturas entre 35 y 37 °C en el noroeste del país, así como con precipitaciones superiores a los 1 000 mm (Flores Monter et al., 2021). La distribución temporal y geográfica de la bacteria *Campylobacter*, considerada la causa bacteriana más frecuente de gastroenteritis en el mundo, en el norte de Europa se asocia con aumentos de temperatura y fuertes lluvias, lo que puede aumentar el número de casos notificados. Según las proyecciones de cambio climático, se

prevé que el número de casos de *Campylobacter* aumentará casi un 200% para 2100, lo que equivale a casi 6000 casos adicionales por año, atribuidos a una extensión de la temporada de transmisión y otros cambios en el clima (Kuhn et al., 2020). Similar a lo que ocurre con las enfermedades transmitidas por agua, en México también faltan estudios sobre la relación entre enfermedades transmitidas por alimentos y el clima.

NUEVOS ENFOQUES EN ESTUDIOS DE ENFERMEDADES TRANSMISIBLES

Aunque los fundamentos básicos de la epidemiología para el estudio de las enfermedades infecciosas no han cambiado y esta rama de la medicina sigue manteniendo bases sólidas en sus propuestas metodológicas, los desafíos que representa el cambio climático para la salud pública requieren la implementación de nuevos enfoques que integren disciplinas complementarias a la epidemiología, tales como la ecología, la ciencia de datos, las ciencias de la complejidad y la ciencia del cambio climático. Además, los avances en el desarrollo de herramientas informáticas para el análisis masivo de información proveniente de diferentes orígenes (como datos clínicos y geográficos) han ampliado enormemente el campo de estudio para las enfermedades infecciosas.

Los estudios observacionales detallados sobre las interacciones entre todos los agentes potenciales, los factores ambientales y la influencia de diferentes factores de riesgo para una enfermedad son, en muchos casos, imposibles o prohibitivamente costosos. Por ejemplo, es una tarea complicada y costosa identificar qué especies de huéspedes y vectores participan en la transmisión de enfermedades y cómo sus requerimientos de hábitat y factores ambientales (como los rangos climáticos) afectan la presencia de un patógeno en un lugar determinado. Además, el estudio de enfermedades tradicionalmente se ha centrado en un único agente causal (un virus, bacteria o protozoo) y en un único vector u hospedero

(por ejemplo, flebótomos, roedores) implicados en la transmisión de ciertas enfermedades. Sin embargo, dada la aparición y rápida propagación mundial de nuevas cepas de influenza, los brotes de los virus chikunguña y zika, y la reciente pandemia de covid-19 es urgente mejorar la comprensión de los ciclos de transmisión y dispersión de enfermedades.

La revolución de los datos en las últimas décadas ha tenido dos resultados principales: en primer lugar, mucha información ahora es digital (por ejemplo, datos socioeconómicos, topográficos, climáticos, de infraestructura) y, en segundo lugar, cubren una gran parte del mundo. Esta información es de vital importancia para alcanzar objetivos urgentes en los estudios epidemiológicos.

Considerando que los cambios en las condiciones climáticas pueden reflejarse en variaciones en la distribución de especies de vectores y reservorios, ha habido un incremento en los trabajos enfocados en analizar las respuestas en la distribución geográfica de estas especies ante escenarios de cambio climático para inferir el riesgo potencial de presencia de varias enfermedades (Feria Arroyo et al., 2014; Garza et al., 2014). Sin embargo, estos estudios se enfocan en una o unas pocas especies de vectores. Evaluar el riesgo de aparición de zoonosis basado únicamente en los cambios de distribución en un agente causal (vector o reservorio) difícilmente capturará la complejidad de los ciclos de transmisión, y los factores ecológicos y sociales involucrados en la emergencia de brotes epidémicos (Escobar y Craft, 2016; Rengifo-Correa et al., 2023). En este sentido, para caracterizar la multifactorialidad y la dinámica adaptativa y evolutiva de patógenos vectores, hospederos y enfermedades es necesario adoptar enfoques interdisciplinarios que permitan el estudio del impacto del cambio climático en la salud pública desde la perspectiva de los sistemas complejos (Stephens et al., 2016, 2023).

Un campo reemergente que puede brindar resultados significativos en estudios sobre cambio climático y salud, considerando su complejidad inherente, es la epidemiología espacial. Esta disciplina busca

determinar, mediante el análisis de información espacio-temporal, las variaciones geográficas de las enfermedades y sus agentes con respecto a factores biológicos, demográficos, conductuales, socioeconómicos y ambientales (Elliott y Wartenberg, 2004; Ostfeld et al., 2005). La epidemiología espacial ofrece un marco teórico y analítico para evaluar cómo la exposición a algún determinante ambiental, como el cambio climático, se asocia con el incremento de ciertas enfermedades, con brotes epidémicos de una enfermedad particular o con la redistribución de los agentes causales de las enfermedades infecciosas (González-Salazar et al., 2022; Murray et al., 2018). En el campo concreto de los posibles efectos del cambio climático sobre la salud pública, la eco-epidemiología espacial debe enfocarse en desarrollar modelos para cuantificar los posibles efectos en salud, debido a los cambios previstos en el clima. No obstante, lograr estas metas presenta varios desafíos, entre ellos, la necesidad de contar con información estructurada sobre la incidencia de enfermedades y sus agentes. Además, se requiere contar con métodos analíticos y herramientas informáticas que nos permitan evaluar las relaciones entre agentes infecciosos y el ambiente. Sin duda, analizar y entender cómo el cambio climático puede afectar la salud humana dependerá de la disponibilidad de datos y herramientas de análisis.

CONCLUSIONES

Para abordar la relación entre cambio climático y salud, es fundamental considerar la complejidad inherente a este tema. Algunos aspectos clave son:

1. La influencia del clima en la salud a menudo se ve modulada por interacciones con otros procesos ecológicos, condiciones sociales y políticas de adaptación. Al buscar explicaciones, debe procurarse un equilibrio entre complejidad y simplicidad.

2. El cambio climático es sólo uno de los diversos cambios ambientales que afectan la salud humana y a menudo actúa de forma interactiva con otros factores. Por ejemplo, el contagio de infecciones transmitidas por vectores se ve afectado por una combinación de condiciones climáticas, deforestación, modos de uso de la tierra, reducción de la biodiversidad, recursos hídricos, movimientos de población y densidad de población humana. Esto implica generar propuestas teóricas y metodológicas que puedan caracterizar estas interacciones ambientales y ecológicas para generar escenarios de riesgo y vulnerabilidad respecto a estos padecimientos.

Considerando los vacíos de información, se identifican posibles líneas de investigación a realizar en el corto y mediano plazo:

- Analizar las tendencias históricas de incidencia de enfermedades transmisibles y su relación con los cambios climáticos observados.
- Impulsar investigaciones con una perspectiva ecosistémica donde se evalúe el efecto del cambio climático y otros cambios ambientales en la salud pública, integrando los determinantes de la salud intrínsecos y extrínsecos.
- Desarrollar marcos teóricos y analíticos para estimar los efectos del cambio climático en variables poblacionales (como abundancia), fenológicos (como cambios estacionales) y de comportamiento (como alimentación).

Entre las opciones políticas para reducir el impacto del cambio climático en la salud, se debe considerar:

1. Incluir la salud en todas las políticas, estrategias y medidas actuales y futuras de adaptación y mitigación del cambio climático.

2. Fortalecer los sistemas y servicios de salud pública para mejorar la capacidad de prevenir, prepararse y responder al impacto del cambio climático.
3. Fomentar la concientización de todos los sectores para promover beneficios comunes en la salud.
4. Promover la investigación y el desarrollo tecnológico, así como compartir datos e información.

REFERENCIAS

- Aguilar-Setién, A., Romero-Almaraz, M. L., Sánchez-Hernández, C., Figueroa, R., Juárez-Palma, L. P., García-Flores, M. M., Vázquez-Salinas, C., Salas-Rojas, M., Hidalgo-Martínez, A. C., Pierlé, S. A., García-Estrada, C. y Ramos, C. (2008). Dengue Virus in Mexican Bats. *Epidemiology and Infection*, 136(12), 1678-1683. <https://doi.org/10.1017/S0950268808000460>
- Allen, T., Murray, K. A., Zambrana-Torrelío, C., Morse, S. S., Rondinini, C., Di Marco, M., Breit, N., Olival, K. J. y Daszak, P. (2017). Global Hotspots and Correlates of Emerging Zoonotic Diseases. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00923-8>
- Arce-Fonseca, M., Carrillo-Sánchez, S. C., Molina-Barrios, R. M., Martínez-Cruz, M., Cedillo-Cobián, J. R., Henao-Díaz, Y. A. y Rodríguez-Morales, O. (2017). Seropositivity for *Trypanosoma cruzi* in Domestic Dogs From Sonora, Mexico. *Infectious Diseases of Poverty*, 6(120), 3-9. <https://doi.org/10.1186/s40249-017-0333-z>
- Arguin, P. M., Marano, N. y Freedman, D. O. (2009). Globally Mobile Populations and the Spread of Emerging Pathogens. *Emerging Infectious Diseases*, 15(11), 1713-1714. <https://doi.org/10.3201/eid1511.091426>
- Arredondo-García, J. L., Aguilar-López Escalera, C. G., Aguilar Lugo-Gerez, J. J., Osnaya-Romero, N., Pérez-Guillé, G. y Medina-Cortina, H. (2020). Panorama epidemiológico de dengue en México 2000-2019. *Revista Latinoamericana de Infectología Pediátrica*, 33(2), 78-83. <https://doi.org/10.35366/94418>

- Asin, S. y Catalá, S. (1995). Development of *Trypanosoma cruzi* in *Triatoma infestans*: Influence of Temperature and Blood Consumption. *The Journal of Parasitology*, 81(1), 1-7. <https://doi.org/10.2307/3283997>
- Ávila Agüero, M. L. (2008). Dengue. *Acta Médica Costarricense*, 50(3), 128-130. <https://doi.org/10.51481/amc.v50i3.22>
- Baker, R. E., Mahmud, A. S., Miller, I. F., Rajeev, M., Rasambainarivo, F., Rice, B. L., Takahashi, S., Tatem, A. J., Wagner, C. E., Wang, L. F., Wesolowski, A. y Metcalf, C. J. E. (2022). Infectious disease in an era of global change. *Nature Reviews Microbiology*, 20(4), 193-205. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00639-z>
- Berberian, G., Garrahan, J. P. y Rosanova, M. T. (2012). Impacto del cambio climático en las enfermedades infecciosas. *Archivos Argentinos de Pediatría*, 110, 39-45. <https://doi.org/10.5546/aap.2012.39>
- Betanzos-Reyes, Á. F., Rodríguez, M. H., Romero-Martínez, M., Sesma-Medrano, E., Rangel-Flores, H. y Santos-Luna, R. (2018). Association of Dengue Fever With *Aedes* spp. Abundance and climatological effects. *Salud pública de México*, 60(1)12-20. <https://doi.org/10.21149/8141>
- Boire, N. A., Riedel, V. A. A., Parrish, N. M. y Riedel, S. (2014). Lessons Learned From Historic Plague Epidemics: The Relevance of an Ancient Disease in Modern Times. *Journal of Ancient Diseases and Preventive Remedies*, 2(2). <https://doi.org/10.4172/2329-8731.1000114>
- Bosco-Lauth, A. M., Porter, S. M., Fox, K. A., Wood, M. E., Neubaum, D. y Quilici, M. (2022). Experimental Infection of Brazilian Free-Tailed Bats (*Tadarida brasiliensis*) with Two Strains of Sars-CoV-2. *Viruses*, 14(8), 1809. <https://doi.org/10.3390/v14081809>
- Brearley, G., Rhodes, J., Bradley, A., Baxter, G., Seabrook, L., Lunney, D., Liu, Y. y Mcalpine, C. (2013). Wildlife Disease Prevalence in Human-Modified Landscapes. *Biological Reviews*, 88(2), 427-442. <https://doi.org/10.1111/brv.12009>
- Bueno-Marí, R., Gouveia Almeida, A. P. y Navarro, J. C. (2015). Editorial: Emerging Zoonoses: Eco-Epidemiology, Involved Mechanisms, and Public

- Health Implications. *Frontiers in Public Health*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2015.00157>
- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J. y Esper, J. (2011). 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science*, 331(6017), 578-582. <https://doi.org/10.1126/science.1197175>
- Carabarin-Lima, A., González-Vázquez, M. C., Rodríguez-Morales, O., Baylón-Pacheco, L., Rosales-Encina, J. L., Reyes-López, P. A. y Arce-Fonseca, M. (2013). Chagas Disease (*American trypanosomiasis*) in Mexico: An Update. *Acta Tropica*, 127(2), 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2013.04.007>
- Carcavallo, R. U. (1999). Climatic Factors Related to Chagas Disease Transmission. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 94(1), 367-369. <https://doi.org/10.1590/S0074-02761999000700071>
- Carcavallo, R. U. y de Casas, S. C. (1996). Some Health Impacts of Global Warming in South America: Vector-Borne Diseases. *Journal of Epidemiology*, 6(4), 153-157.
- Castañeda Guillot, C. y Ramos Serpa, G. (2020). Principales pandemias en la historia de la humanidad. *Revista Cubana de Pediatría*, 92. <https://revpediatria.sld.cu/index.php/ped/article/view/1183>
- Castillo-Salgado, C., Mujica, O. J., Loyola, E. y Canela, J. (2011). Módulos de principios de epidemiología para el control de enfermedades (Mopece). *Revista Facultad de Salud Pública*, 31(1). <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.15281>
- Catalá, S. (1991). The Biting Rate of *Triatoma infestans* in Argentina. *Medical and Veterinary Entomology*, 5(3), 325-334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.1991.tb00558.x>
- Cerda, J. y Valdivia, G. (2007). John Snow, la epidemia de cólera y el nacimiento de la epidemiología moderna. *Revista Chilena de Infectología*, 24(4), 331-334. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182007000400014>
- Chen, L. H. y Hamer, D. H. (2016). Zika Virus: Rapid Spread in the Western Hemisphere. *Annals of Internal Medicine*, 164(9). <https://doi.org/10.7326/M16-0150>

- Chua, P. L. C., Huber, V., Ng, C. F. S., Seposo, X. T., Madaniyazi, L., Hales, S., Woodward, A. y Hashizume, M. (2021). Global Projections of Temperature-Attributable Mortality Due to Enteric Infections: a Modelling Study. *The Lancet Planetary Health*, 5(7), e436-e445. [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(21\)00152-2/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(21)00152-2/fulltext)
- Cissé, G. y McLeman, R. (coords.) (2023). Health, Wellbeing and the Changing Structure of Communities. En Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1041 – 1170). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.009>
- Colón-González, F. J., Lake, I. R. y Bentham, G. (2011). Climate Variability and Dengue Fever in Warm and Humid Mexico. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 84(5), 757-763. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2011.10-0609>
- Coura, J. R. y Dias, J. C. P. (2009). Epidemiology, Control and Surveillance of Chagas Disease - 100 Years After its Discovery. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 104(1), 31-40. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762009000900006>
- Cunha, C. B. y Cunha, B. A. (2006). Impact of Plague on Human History. *Infectious Disease Clinics of North America*, 20(2), 253-272. <https://doi.org/10.1016/j.idc.2006.03.001>
- Daszak, P., Cunningham, A. A. y Hyatt, A. D. (2000). Emerging Infectious Diseases of Wildlife: Threats to Biodiversity and Human Health. *Science*, 287(5452), 443-449. <https://doi.org/10.1126/science.287.5452.443>
- De la Torre-Ugarte-Guanilo, M. y Oyola-García, A. (2014). Los determinantes sociales de la salud: una propuesta de variables y marcadores/indicadores para su medición. *Revista Peruana de Epidemiología*, 18(1), 1-6. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203132677002>
- Díaz, J., Follos, F. y Linares, C. (2020). *Cambio climático y salud*. Foro Transiciones.

- Dirección General de Información en Salud (DGIS) (2020). *Panorama epidemiológico de dengue*. http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/Datos_Abiertos_gobmx.html.
- Elliott, P. y Wartenberg, D. (2004). Spatial Epidemiology: Current Approaches and Future Challenges. *Environmental Health Perspectives*, 112(9), 998-1006. <https://doi.org/10.1289/ehp.6735>
- Equihua, M., Ibáñez-Bernal, S., Benítez, G., Estrada-Contreras, I., Sandoval-Ruiz, C. A. y Mendoza-Palmero, F. S. (2017). Establishment of *Aedes aegypti* (L.) in Mountainous Regions in Mexico: Increasing Number of Populations at Risk of Mosquito-Borne Disease and Future Climate Conditions. *Acta tropical*, 166, 316-327. <https://doi: 10.1016/j.actatropica.2016.11.014>
- Escobar, L. E. y Craft, M. E. (2016). Advances and Limitations of Disease Biogeography Using Ecological Niche Modeling. *Frontiers in Microbiology*, 7(8), 1-21. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01174>
- Feria Arroyo, T. P., Castro-Arellano, I., Gordillo-Peréz, G., Cavazos, A. L., Vargas-Sandoval, M., Grover, A., Torres, J., Medina, R. F., Pérez de León, A. A. y Esteve-Gassent, M. D. (2014). Implications of Climate Change on the Distribution of the Tick Vector *Ixodes Scapularis* and Risk for Lyme Disease in the Texas-Mexico Transboundary Region. *Parasites and Vectors*, 7(1), 199. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-7-199>
- Fèvre, E. M., Bronsvoort, B. M. D. C., Hamilton, K. A. y Cleaveland, S. (2006). Animal Movements and the Spread of Infectious Diseases. *Trends in Microbiology* 14(3), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.01.004>
- Flores Monter, Y. M., Chaves, A., Arellano-Reynoso, B., López-Pérez, A. M., Suzán-Azpíri, H. y Suzán, G. (2021). Edaphoclimatic Seasonal Trends and Variations of the *Salmonella* spp. Infection in Northwestern Mexico. *Infectious Disease Modelling*, 6, 805-819. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2021.05.002>
- Florián, D., Vargas, S. y Alvarado, M. (2015). Dengue: un reto constante. *Revista Pediátrica de Panamá*, 44(1), 16-22.

- Franco-Paredes, C., Lammoglia, L. y Santos-Preciado, J. (2004). Perspectiva histórica de la viruela en México: aparición, eliminación y riesgo de reaparición por bioterrorismo. *Gaceta médica de México*, 140(3), 321-327.
- Gage, K. L., Burkot, T. R., Eisen, R. J. y Hayes, E. B. (2008). Climate and Vectorborne Diseases. *American Journal of Preventive Medicine*, 35(5), 436-450. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.08.030>
- Galvão, L. A. C., Edwards, S., Corvalan, C., Fortune, K. y Akerman, M. (2009). Climate Change and Social Determinants of Health: Two Interlinked Agendas. *Global Health Promotion*, 16(1), 81-84. <https://doi.org/10.1177/1757975909103761>
- Garza, M., Feria Arroyo, T. P., Casillas, E. A., Sanchez-Cordero, V., Rivaldi, C.-L. y Sarkar, S. (2014). Projected Future Distributions of Vectors of *Trypanosoma cruzi* in North America under Climate Change Scenarios. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002818>
- Gibb, R., Redding, D. W., Chin, K. Q., Donnelly, C. A., Blackburn, T. M., Newbold, T. y Jones, K. E. (2020). Zoonotic Host Diversity Increases in Human-Dominated Ecosystems. *Nature*, 584(7821), 398-402. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2562-8>
- González-Salazar, C., Meneses-Mosquera, A. K., Aguirre-Peña, A., Fernández-Castel, K. P. J., Stephens, C. R., Mendoza-Ponce, A., Velasco, J. A., Calderón-Bustamante, O. y Estrada, F. (2022). Toward New Epidemiological Landscapes of *Trypanosoma cruzi* (Kinetoplastida, Trypanosomatidae) Transmission Under Future Human-Modified Land Cover and Climatic Change in Mexico. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 7(9), 221. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7090221>
- Gubler, D. J., Reiter, P., Ebi, K. L., Yap, W., Nasci, R. y Patz, J. A. (2001). Climate Variability and Change in the United States: Potential Impacts on Vector- and Rodent-Borne Diseases. *Environmental Health Perspectives*, 109(2), 223-233. <https://doi.org/10.2307/3435012>
- Guzmán-Gómez, D., Salas-González, G., López-Monteón, A., Welsh-Rodríguez, C. M., Torres-Montero, J., Dumonteil, E., Waleckx, E. y Ramos-Ligonio, A. (2021).

- Risk Factors for Infestation by *Triatoma Dimidiata* in a Rural Locality of Veracruz, Mexico, With Active Transmission of *Trypanosoma Cruzi*: Weather and Rain as Factors. *Tropical Medicine and International Health*, 26(8), 916-926. <https://doi.org/10.1111/tmi.13589>
- Guzmán, M. G., García, G. y Kourí, G. (2008). Dengue y fiebre hemorrágica del dengue: un problema de salud mundial. *Revista cubana de medicina tropical*, 60(1), 5-16.
- Heredia, H. L., Naranjo, M. y Suárez, B. (2011). El cambio climático y los determinantes sociales de la salud desde la perspectiva de la equidad. *Comunidad y Salud*, 9(2), 58-65. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=375740249008>
- Hernández-Mesa, N., Hernández-Llanes, J. y Llanes Betancourt, C. (2020). Las grandes epidemias de la Historia. De la peste de Atenas a la covid-19. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 19(5). <http://www.revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/3687>
- Hortal, M. (2015). Enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes: información actualizada. *Revista Médica del Uruguay*, 32(1), 52-58. <https://revista.rmu.org.uy/index.php/rmu/article/view/186>
- Hubálek, Z. y Rudolf, I. (2010). Types of Human Disease by Source of the Infectious Agent. En Z. Hubálek y I. Rudolf (eds.), *Microbial Zoonoses and Sapronoses* (pp. 5-8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9657-9_2
- Hurtado-Díaz, M., Riojas-Rodríguez, H., Rothenberg, S. J., Gómez-Dantés, H. y Cifuentes, E. (2007). Short Communication: Impact of Climate Variability on the Incidence of Dengue in Mexico. *Tropical Medicine and International Health*, 12(11), 1327-1337. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2007.01930.x>
- Hurtado Hoyo, D. E., Losardo, R. J. y Bianchi, R. I. (2021). Salud plena e integral: un concepto más amplio de salud. *Revista de la Asociación Médica Argentina*, 134(1), 18-25. https://www.ama-med.org.ar/uploads_archivos/2147/Rev-1-2021_pag-18-25_Losardo.pdf

- Ibáñez-Cervantes, G., León-García, G., Castro-Escarpulli, G., Mancilla-Ramírez, J., Victoria-Acosta, G., Cureño-Díaz, M. A., Sosa Hernández, O. y Bello-López, J. M. (2019). Evolution of Incidence and Geographical Distribution of Chagas Disease in Mexico During a Decade (2007-2016). *Epidemiology and Infection*, 147, 1-7. <https://doi.org/10.1017/S0950268818002984>
- Idrovo, A. J. (2000). Epidemias, endemias y conglomerados: conceptos básicos. *Revista de la Facultad de Medicina*, 48(2), 175-180.
- Jiménez-Moleón, M. C. y Gómez-Albores, M. A. (2011). Waterborne Diseases in the State of Mexico, Mexico (2000-2005). *Journal of Water and Health*, 9(1), 200-207. <https://doi.org/10.2166/wh.2010.149>
- Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J. L. y Daszak, P. (2008). Global Trends in Emerging Infectious Diseases. *Nature*, 451(7181), 990-993. <https://doi.org/10.1038/nature06536>
- Karande, S., Bhatt, M., Kelkar, A., Kukarni, M., de, A. y Varaiya, A. (2003). An Observational Study to Detect Leptospirosis in Mumbai, India, 2000. *Archives of Disease in Childhood*, 88(12), 1070-1075. <https://doi.org/10.1136/ad.88.12.1070>
- Keesing, F., Belden, L. K., Daszak, P., Dobson, A., Harvell, C. D., Holt, R. D., Hudson, P., Jolles, A., Jones, K. E., Mitchell, C. E., Myers, S. S., Bogich, T. y Ostfeld, R. S. (2010). Impacts of Biodiversity on the Emergence and Transmission of Infectious Diseases. *Nature*, 468(7324), 647-652. <https://doi.org/10.1038/nature09575>
- Keesing, F. y Ostfeld, R. S. (2021). Impacts of Biodiversity and Biodiversity Loss on Zoonotic Diseases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(17), e2023540118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023540118/-/DCSupplemental>
- Khasnis, A. A. y Nettleman, M. D. (2005). Global Warming and Infectious Disease. *Archives of Medical Research*, 36(6), 689-696. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2005.03.041>

- Kilpatrick, A. M. y Randolph, S. E. (2012). Drivers, Dynamics, and Control of Emerging Vector-Borne Zoonotic Diseases. *The Lancet*, 380(9857), 1946-1955. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61151-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61151-9)
- Koganti, R. y Molumby, A. (2019). Range Expansion of Insect Vectors Due to Climate Change. *American Journal of Biomedical Science and Research*, 6(5), 435-436. <https://doi.org/10.34297/ajbsr.2019.06.001078>
- Kuhn, K. G., Nygård, K. M., Guzman-Herrador, B., Sunde, L. S., Rimhanen-Finne, R., Trönnberg, L., Jepsen, M. R., Ruuhela, R., Wong, W. K. y Ethelberg, S. (2020). Campylobacter Infections Expected to Increase Due to Climate Change in Northern Europe. *Scientific Reports*, 10(1), 13874. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70593-y>
- Kuris, A. M., Lafferty, K. D. y Sokolow, S. H. (2014). Saprosonis: A Distinctive Type of Infectious Agent. *Trends in Parasitology*, 30(8), 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2014.06.006>
- Lafferty, K. D. (2009). The Ecology of Climate Change and Infectious Diseases. *Ecology*, 90(4), 888-900. <https://doi.org/10.1890/08-0079.1>
- Lage, R. J., Graña, T. H., Johnson, B. S. y Torres, Z. Z. (2015). Aspectos actualizados sobre dengue. *Revista de Información Científica*, 90(2), 374-390. <https://www.redalyc.org/pdf/5517/551757251018.pdf>
- Lindahl, J. F., Grace, D. y Strand, T. (2015). The Consequences of Human Actions on Risks for Infectious Diseases: A Review. *Infection Ecology and Epidemiology* 5(1). <https://doi.10.3402/iee.v5.30048>
- López Arellano, O. (1990). *La Política de Salud en México (1982-1988): una visión crítica* [tesis doctoral]. Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Xochimilco.
- López-Cervantes, M., García Moreno, J., Pacheco Domínguez, R. L., Escamilla Santiago, R. A. y Villanueva Lozano, M. (2010). La influenza A/H1N1 2009. Una crónica de la primera pandemia del siglo XXI. *Revista Digital Universitaria*, 11(4). <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num04/art37/int37.htm>

- López-Latorre, M. A. y Neira, M. (2016). Influencia del cambio climático en la biología de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) mosquito transmisor de arbovirosis humanas. *Revista Ecuatoriana de Medicina y Ciencias Biológicas*, 37(2), 11-21. <https://doi.org/10.26807/remcb.v37i2.2>
- Martínez-Ibarra, J. A., Salazar-Schettino, P. M., Solorio-Cibrián, M., Cabrera Bravo, M., Novelo-López, M., Vences, M. O., Montes-Ochoa, J. Y. y Nogueta-Torres, B. (2008). Influence of Temperature and Humidity on the Biology of *Triatoma Mexicana* (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) Under Laboratory Conditions. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 103(7), 719-723. <https://doi.org/10.1590/s0074-02762008000700015>
- Martínez Urtaza, J. (2011). Cambio climático y patógenos en el agua: el fenómeno de El Niño y su impacto en la salud. *Revista de Salud Ambiental*, 11(1-2), 46-51.
- Mattar, S., Montero, J. y González, M. (2019). La historia del dengue aún no termina. *Revista mvz Córdoba*, 24(2), 7177-7179. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1597>
- McMichael, A. (2003). Global Climate Change and Health: An Old Story Writ Large. En A. J. McMichael, D. H. Campbell-Lendrum, C. F. Corvalán, K. L. Ebi, A. K. Githeko, J. D. Scherega y A. Woodward (eds.), *Climate change and health: risk and responses* (pp. 1-17). World Health Organization.
- Mejía-Guevara, M. D, Correa-Morales, F., González-Acosta, C., Dávalos-Becerril, E., Peralta-Rodríguez, J. L., Martínez-Gaona, A., Hernández-Nava, M., Ramírez-Huicochea, C., Rosas-Trinidad, L., Carmona-Pérez, M., Salazar-Bueyes, V., Tapia-Olarte, F. y Moreno-García, M. (2020). El mosquito del dengue en la Ciudad de México. Invasión incipiente de *Aedes aegypti* y sus potenciales riesgos. *Gaceta Médica de México*, 156(5), 388-395. <https://doi.org/10.24875/GMM.20000009>
- Mills, J. N., Gage, K. L. y Khan, A. S. (2010). Potential Influence of Climate Change on Vector-Borne and Zoonotic Diseases: A Review and Proposed Research Plan. *Environmental Health Perspectives*, 118(11), 1507-1514. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901389>

- Mora, C., McKenzie, T., Gaw, I. M., Dean, J. M., von Hammerstein, H., Knudson, T. A., Setter, R. O., Smith, C. Z., Webster, K. M., Patz, J. A. y Franklin, E. C. (2022). Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. *Nature Climate Change*, 12, 869-875 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01426-1>
- Moreno, S., Rangel, G. y Thompson, B. (2014). Síndrome pulmonar por hantavirus, una amenaza latente en México. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 19(1), 96-103. <https://www.redalyc.org/pdf/473/47330738014.pdf>
- Morens, D. M. y Taubenberger, J. K. (2018). The Mother of All Pandemics is 100 Years Old (and Going Strong)! *American Journal of Public Health*, 108(11), 1449-1454. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2018.304631>
- Murray, K. A., Olivero, J., Roche, B., Tiedt, S. y Guégan, J. F. (2018). Pathogeography: Leveraging the Biogeography of Human Infectious Diseases for Global Health Management. *Ecography*, 41(9), 1411-1427. <https://doi.org/10.1111/ecog.03625>
- Narro, J. y Gómez, H. (1995). El dengue en México: un problema prioritario de salud pública. *Salud Pública de México*, 37(1), 12-20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10609203>
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2010). *Chagas disease: control and elimination*. https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/wha63/a63_17-en.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (24 de junio de 2020). *Dengue y dengue grave*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>
- Oromí Durich, J. (2000). Enfermedades emergentes y reemergentes: algunas causas y ejemplos. *Medicina Integral*, 36(3), 79-82. <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-enfermedades-emergentes-reemergentes-algunas-causas-15322>
- Ostfeld, R. S., Glass, G. E. y Keesing, F. (2005). Spatial Epidemiology: An Emerging (or Re-Emerging) Discipline. *Trends in Ecology and Evolution* 20(6), 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.03.009>

- Palinkas, L. A. y Wong, M. (2020). Global Climate Change and Mental Health. *Current Opinion in Psychology*, 32, 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.06.023>
- Patz, J. A., Confalonieri, U. E., Amerasinghe, F. P., Bing Chua, K., Daszak, P., Hyatt, A. D., Molyneux, D., Thomson, M., Yameogo, L., Vasconcelos, P. y Rubio-Palis. (2005). Human Health: Ecosystem Regulation of Infectious Diseases. En R. Hassan, R. Scholes y N. Ash (eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group (Millennium Ecosystem Assessment Series)* (pp. 391-415). Island Press.
- Patz, J. A., Githeko, A. K., MacCarty, J. P., Hussein, S., Confalonieri, U. y de Wet, N. (2003). Climate change and infectious diseases. En A. J. McMichael, D. H. Campbell-Lendrum, C. F. Corvalán, K. L. Ebi, A. K. Githeko, J. D. Scherega y A. Woodward (eds.), *Climate Change and Human Health: Risk and Responses* (pp. 103-132). World Health Organization.
- Patz, J. A., Graczyk, T. K., Geller, N. y Vittor, A. Y. (2000). Effects of environmental change on emerging parasitic diseases. *International Journal for Parasitology*, 30, (12-13), 1395-1415. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7519\(00\)00141-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7519(00)00141-7)
- Pimentel, D., Cooperstein, S., Randell, H., Filiberto, D., Sorrentino, S., Kaye, B., Nicklin, C., Yagi, J., Brian, J., O'Hern, J., Habas, A. y Weinstein, C. (2007). Ecology of Increasing Diseases: Population Growth and Environmental Degradation. *Human Ecology*, 35(6), 653-668. <https://doi.org/10.1007/s10745-007-9128-3>
- Piret, J. y Boivin, G. (2021). Pandemics Throughout History. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.631736>
- Prieto Ortiz, R. G. (2020). La plaga de Justiniano (541-542). *Revista Medicina*, 42(2), 182-195. <https://doi.org/10.56050/01205498.1513>
- Rabiee, M. H., Mahmoudi, A., Siah sarvie, R., Kryštufek, B. y Mostafavi, E. (2018). Rodent-Borne Diseases and Their Public Health Importance in Iran. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 12(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006256>

- Rabozzi, G., Bonizzi, L., Crespi, E., Somaruga, C., Sokooti, M., Tabibi, R., Vellere, F., Brambilla, G. y Colosio, C. (2012). Emerging Zoonoses: The “One Health Approach.” *Safety and Health at Work*, 3(1), 77-83. <https://doi.org/10.5491/SHAW.2012.3.1.77>
- Ramsey, J. M., Peterson, A. T., Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A., Nakazawa, Y., Butrick, M., Tun-Ku, E., de la Cruz-Félix, K. e Ibarra-Cerdeña, C. N. (2015). Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas disease. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 110(3), 339-352. <https://doi.org/10.1590/0074-02760140404>
- Rengifo-Correa, L., González-Salazar, C. y Stephens, C. R. (2023). Disentangling the Contributions of Biotic and Abiotic Predictors in the Niche and the Species Distribution Model of *Trypanosoma cruzi*, Etiological Agent of Chagas Disease. *Acta Tropica*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2022.106757>
- Rengifo-Correa, L., Stephens, C. R., Morrone, J. J., Téllez-Rendón, J. L. y González-Salazar, C. (2017). Understanding Transmissibility Patterns of Chagas Disease Through Complex Vector-Host Networks. *Parasitology*, 144(6), 760-772. <https://doi.org/10.1017/S0031182016002468>
- Rivera-Ávila, R. C. (2014). Fiebre chikungunya en México: caso confirmado y apuntes para la respuesta epidemiológica. *Salud Pública de México*, 56(4), 402. <https://doi.org/10.21149/spm.v56i4.7361>
- Romanello, M., Di Napoli, C., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Walawender, M., Ali, Z., Ameli, N., Ayeb-Karlsson, S., Beggs, P. J., Belesova, K., Berrang Ford, L., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cross, T. J., ... Costello, A. (2023). The 2023 Report of the *Lancet* Countdown on Health and Climate Change: the Imperative for a Health-Centred Response in A World Facing Irreversible Harms. *The Lancet*, 402(10419), 2346-2394. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(23\)01859-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7)
- Rosenthal, J. (2011). Climate Change and the Geographical Distribution of Infectious Diseases. *EcoHealth*, 414-423. <https://doi.org/10.1002/9781119971641.ch30>

- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C. L., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D. y Watson, J. E. M. (2016). The Broad Footprint of Climate Change from Genes to Biomes to People. *Science*, 354(6313). <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Schmaljohn, C. y Hjelle, B. (1997). Hantaviruses: A Global Disease Problem. *Emerging Infectious Diseases*, 3(2), 95-104. <https://doi.org/10.3201/eid0302.970202>
- Schmidt, K. A. y Ostfeld, R. S. (2001). Biodiversity and the Dilution Effect in Disease Ecology. *Ecology*, 82(3), 609-619. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0609:BATDEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0609:BATDEI]2.0.CO;2)
- Scott, J. D. (2019). *Lyme disease basics*. <https://lymeontario.com/wp-content/uploads/2019/10/Lyme-Disease-Basics-Brochure-October-2019.pdf>
- Semenza, J. C. (2024). Climate Change and Contagion: The Circuitous Impacts from Infectious Diseases. *The Journal of Infectious Diseases*, 229(4), 928-930. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiad571>
- Service, M. W. (1991). Agricultural Development and Arthropod-Borne Diseases: A Review. *Revista de Saúde Pública*, 25(3), 165-178. <https://doi.org/10.1590/s0034-89101991000300002>
- Short, E. E., Caminade, C. y Thomas, B. N. (2017). Climate Change Contribution to the Emergence or Re-Emergence of Parasitic Diseases. *Infectious Diseases: Research and Treatment*, 10. <https://doi.org/10.1177/1178633617732296>
- Sotomayor-Bonilla, J., Chaves, A., Rico-Chávez, O., Rostal, M. K., Ojeda-Flores, R., Salas-Rojas, M., Aguilar-Setien, A., Ibáñez-Bernal, S., Barbachano-Guerrero, A., Gutiérrez-Espeleta, G., Aguilar-Faisal, J. L., Aguirre, A. A., Daszak, P. y Suzán, G. (2014). Dengue Virus in Bats From Southeastern Mexico. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 91(1), 129-131. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.13-0524>
- Stenseth, N. C., Atshabar, B. B., Begon, M., Belmain, S. R., Bertherat, E., Carniel, E., Gage, K. L., Leirs, H. y Rahalison, L. (2008). Plague: Past, Present,

- and Future. *PLOS Medicine*, 5(1), e3. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0050003>
- Stephens, C. R., González-Salazar, C. y Romero-Martínez, P. (2023). “Does a Respiratory Virus Have an Ecological Niche, and If So, Can It Be Mapped?” Yes and Yes. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 8(3), 178. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8030178>
- Stephens, C. R., González-Salazar, C., Sánchez-Cordero, V., Becker, I., Rebollar-Téllez, E., Rodríguez-Moreno, Á., Berzunza-Cruz, M., Domingo Balcells, C., Gutiérrez-Granados, G., Hidalgo-Mihart, M., Ibarra-Cerdeña, C. N., Ibarra López, M. P., Iñiguez Dávalos, L. I. y Ramírez Martínez, M. M. (2016). Can You Judge A Disease Host by the Company it Keeps? Predicting Disease Hosts and their Relative Importance: A Case Study for Leishmaniasis. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 10(10), e0005004. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005004> October
- Straif-Bourgeois, S., Ratard, R. y Kretzschmar, M. (2014). Infectious Disease Epidemiology. En W. Ahrens y I. Pigeot (eds.), *Handbook of Epidemiology* (pp. 2041-2119). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09834-0>
- Suzán, G., García-Peña, G., García-Rejón, J., Machain-Williams, C., Ojeda-Flores, R., Rico-Chávez, O. y Sotomayor-Bonilla, J. (2017). Ecología viral: interacciones bióticas y abióticas. En C. F. Arias Ortiz (ed.), *La Virología en México: Situación Actual, Retos y Oportunidades* (pp. 169-167). Academia Mexicana de Ciencias.
- Tamayo, L. D., Guhl, F., Vallejo, G. A. y Ramírez, J. D. (2018). The Effect of Temperature Increase on the Development of *Rhodnius prolixus* and the Course of *Trypanosoma cruzi* metacyclogenesis. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 12(8), 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006735>
- Torres-Castro, M., Hernández-Betancourt, S., Agudelo-Flórez, P., Arroyave-Sierra, E., Zavala-Castro, J. y Puerto, F. I. (2016). Revisión actual de la epidemiología de la leptospirosis. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 54(5), 620-625. <https://www.medigraphic.com/pdfs/imss/im-2016/im165k.pdf>

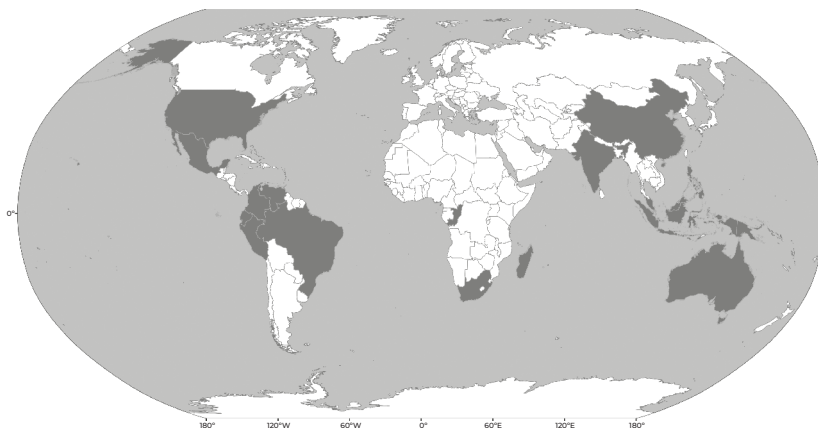
- Tovar-Zamora, I., Caraveo-Patiño, J., Penilla-Navarro, R. P., Serrano-Pinto, V., Méndez-Galván, J., Guerrero-Cárdenas, I. y Servín-Villegas, R. (2019). Seasonal Variation in Abundance of Dengue Vector in the Southern Part of the Baja California Peninsula, Mexico. *Southwestern Entomologist*, 44(4), 885-895. <https://doi.org/10.3958/059.044.0404>
- Tran, B. L., Tseng, W. C., Chen, C. C. y Liao, S. Y. (2020). Estimating the Threshold Effects of Climate on Dengue: A Case Study of Taiwan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4), 1392. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041392>
- Vado-Solís, I. A., Cárdenas-Marrufo, M. F., Laviada-Molina, H., Vargas-Puerto, F., Jiménez-Delgadillo, B. y Zavala-Velázquez, J. E. (2002). Estudio de casos clínicos e incidencia de leptospirosis humana en el estado de Yucatán, México durante el período 1998 a 2000. *Revista Biomédica*, 13(3), 157-164. <https://doi.org/10.32776/revbiomed.v13i3.312>
- Velandia, M. L. y Castellanos, J. E. (2011). Virus del dengue: estructura y ciclo viral. *Infectio*, 15(1), 33-43. [https://doi.org/10.1016/s0123-9392\(11\)70074-1](https://doi.org/10.1016/s0123-9392(11)70074-1)
- Vigueras-Galván, A. L., López-Pérez, A. M., García-Peña, G. E., Rico-Chávez, O., Sarmiento-Silva, R. E. y Suzán, G. (2019). Current Situation and Perspectives on Hantaviruses in Mexico. *Viruses*, 11(7), 642. <https://doi.org/10.3390/v11070642>
- Villegas-García, J. C. y Santillán-Alarcón, S. (2004). The Influence of Two Different Temperatures on Meccus Pallidipennis Stål, 1872 (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) in laboratory. *Entomología y Vectores*, 11, 445-456.
- Wilcox, B. A. y Gubler, D. J. (2005). Disease Ecology and the Global Emergence of Zoonotic Pathogens. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 10(5), 263-272. <https://doi.org/10.1007/BF02897701>
- Williams, E. S., Yuill, T., Artois, M., Fischer, J. y Haigh, S. A. (2002). Emerging Infectious Diseases in Wildlife. *Revue Scientifique et Technique*, 21(1), 139-157. <https://doi.org/10.20506/rst.21.1.1327>

- Wolfe, N., Daszak, P., Kilpatrick, M. y Donal, B. (2005). Bushmeat Hunting, Deforestation, and Prediction of Zoonotic Disease. *Emerging Infectious Diseases*, 11(12), 1822-1827. <https://doi.10.3201/eid1112.040789>
- Woolhouse, M. E., Taylor, L. H. y Haydon, D. T. (2001). Population Biology of Multihost Pathogens. *Science*, 292(5519), 1109-1112. <https://doi.10.1126/science.1059026>
- Zeier, M., Handermann, M., Bahr, U., Rensch, B., Müller, S., Müller, M., Kehm, R., Muranyi, W. y Darai, G. (2005). New Ecological Aspects of Hantavirus Infection: A Change of a Paradigm and a Challenge of Prevention- A Review. *Virus Genes*, 30(2), 157-180. <https://doi.10.1007/s11262-004-5625-2>

4. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático en la biodiversidad de México

LA BIODIVERSIDAD DE MÉXICO

México forma parte del grupo de 17 naciones que ostentan una rica diversidad de flora y fauna, ecosistemas y diversidad genética, situándose como un país megadiverso. Junto a México, integran este grupo Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Congo, Madagascar, China, India, Malasia, Indonesia, Australia, Papúa Nueva Guinea, Sudáfrica, Estados Unidos, Filipinas y Venezuela (Mittermeier et al., 2011; Myers et al., 2000). Se estima que en estos países se concentra entre el 60 y el 80 % de la biodiversidad global. Para calificar como país megadiverso, se deben cumplir con dos criterios cuantitativos: la presencia de al menos 1 500 especies de plantas vasculares endémicas (que representan más del 0.5% del total mundial) y que su vegetación original haya sido reducida al 30% o menos de su extensión original (Myers et al., 2000).

Figura 10. Los 17 países megadiversos

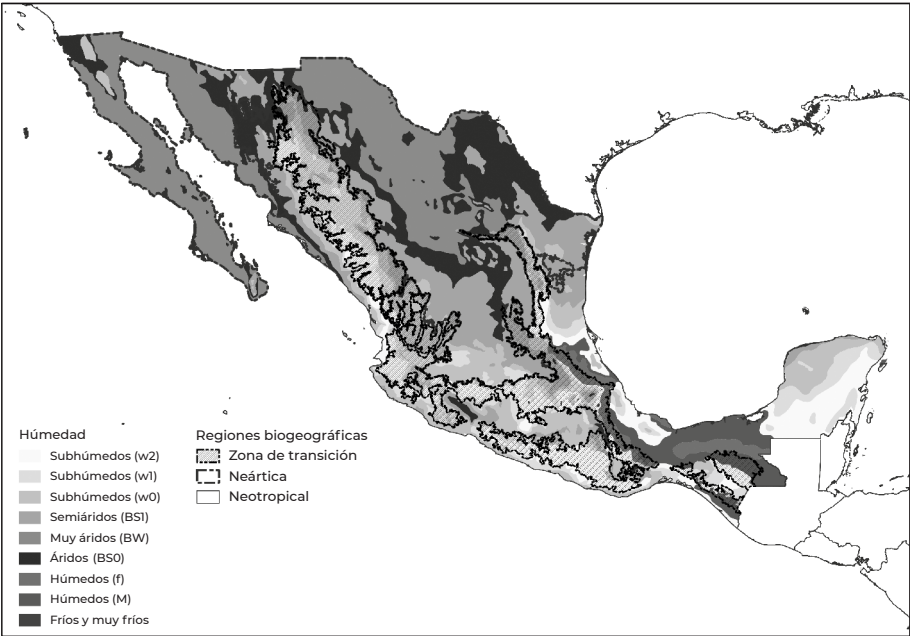
Fuente: elaboración propia.

México cuenta con una extensión territorial de 1 millón 964 375 km² en tierra firme y 3 149 920 km² de mar territorial (Conabio, 1998). Sus ríos, mares, montañas, cuevas y valles albergan una vasta gama de especies, algunas aún por descubrir. Esta biodiversidad excepcional se atribuye principalmente a factores biogeográficos que han dado lugar a una topografía compleja y una diversidad climática, pues más del 65% del territorio mexicano se encuentra a una altitud superior a los 1 000 metros sobre el nivel del mar (Conabio, 1998, 2008).

La diversidad biológica de México tiene su origen en su marcada heterogeneidad ambiental y en la confluencia de las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical, las cuales están conectadas por una zona de transición. La región Neártica abarca las zonas áridas subtropicales del norte, mientras que la región Neotropical engloba las zonas tropicales húmedas y subhúmedas del sur. La intersección de estas dos regiones da lugar a la zona de transición (Espinosa et al., 2008), lo que ha generado un mosaico de distribución de especies y ecosistemas que están íntimamente ligados

al medio físico y a la historia geológica de la región, resultando en una notable riqueza de especies y una alta presencia de especies endémicas (Sarukhán et al., 2017).

Figura 11. Regiones biogeográficas de México y rangos de humedad



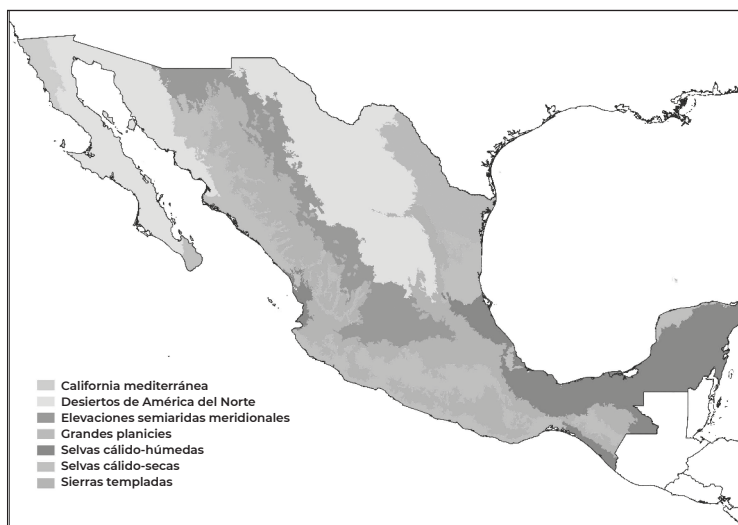
Fuente: elaboración propia con base en Morrone et al. (2017), y García (1990).

LAS ECORREGIONES TERRESTRES Y MARINAS DE MÉXICO

En México se encuentran casi todos los ecosistemas del mundo, gracias a su notable heterogeneidad ambiental que abarca zonas que van desde lo árido hasta lo húmedo y frío. Las ecorregiones de México ofrecen una síntesis de los más de 50 tipos de vegetación presentes en el país (Koleff et al., 2018). Estas ecorregiones se definen por comunidades ecológicas,

condiciones ambientales y topografía similares, y pueden agruparse en siete regiones distintas. Hacia la región Neártica, encontramos la ecorregión de California mediterránea, los desiertos de América del Norte, las elevaciones semiáridas meridionales y las grandes planicies, caracterizadas por matorrales xerófilos, pastizales y bosques espinosos. En las grandes planicies se encuentran poblaciones de bisontes (*Bison bison*), berrendos (*Antilocapra americana*) y osos grizzly (*Ursus arctos*), que también se extienden a las elevaciones semiáridas meridionales. Además, estas regiones han sido el hogar del lobo mexicano (*Canis lupus*), cuyas poblaciones actuales son resultado de esfuerzos significativos de reintroducción (Koleff et al., 2018; Martínez-Meyer et al., 2021).

Figura 12. Distribución de las ecorregiones terrestres de México



Fuente: Inegi et al. (2008).¹

¹ Para mayor información sobre las ecorregiones anidadas que conforman estas regiones,; <https://biodiversidad.gob.mx/region/ecorregiones>.

En la región de los desiertos de América, la familia de las cactáceas alcanza su máxima diversidad. En cuanto a la fauna, el género *Crotalus spp.* es el más diverso, con 21 especies, de las cuales ocho son endémicas de esta región. La región de California se caracteriza principalmente por su clima mediterráneo, con una topografía compleja de montañas, cimas y planicies. Entre las especies características de esta región, destacan la lagartija sin patas de Baja California (*Anniella geronimensis*) y la rata canguro de San Quintín (*Dipodomys gravipes*), ambas endémicas de la región mediterránea de Baja California (Koleff et al., 2018).

La zona de transición se caracteriza por albergar la ecorregión de las sierras templadas: la sierra Madre Oriental, sierra Madre Occidental, sierra Madre del Sur, sierra Madre de Chiapas, Oaxaca y el eje Neovolcánico Transversal, en donde además es posible encontrar los volcanes más representativos de México. Esta región se distingue por su abundancia de pinos y encinos, ya que México es un centro de diversificación de estos dos grupos. Por otra parte, los bosques templados mexicanos se encuentran entre las regiones con mayor biodiversidad del mundo (Myers et al., 2000), y albergan alrededor de 7000 especies de plantas (Villers Ruiz et al., 1998). En México se encuentran aproximadamente el 40% de las especies de *Quercus* (161 especies, de las cuales el 67.7% son endémicas) y aproximadamente el 50% de las especies de *Pinus* (43) (Farjon, 1996; Koleff et al., 2018; Valencia, 2004).

En cuanto a la fauna, esta región exhibe una alta tasa de endemismos, especialmente en el bosque de niebla o bosque mesófilo de montaña. Algunos ejemplos de aves son la codorniz coluda veracruzana (*Dendrortyx barbatulus*), hojarasquero pecho canela (*Sclerurus mexicanus*) o el quetzal (*Pharomachrus mocinno*), que logra distribuirse hasta el norte de Nicaragua (Martínez-Morales, 2007). Entre los mamíferos, destaca el ratón arborícola (*Habromys delicatulus*), que se distribuye específicamente en una cañada del Estado de México (Romo-Vázquez et al., 2005). Estos bosques juegan un papel crucial en la captura y regulación de los

flujos de agua, pues proporcionan un beneficio natural tanto a las personas que viven en áreas urbanas como rurales. A pesar de su importancia, estos bosques están entre los más afectados por las perturbaciones antropogénicas, ya que más de la mitad de la población del país reside en estas áreas (Brizuela-Torres et al., 2023; Galicia y Gómez-Mendoza, 2010).

En el sur del país se encuentran dos ecorregiones con condiciones climáticas contrastantes y distribuciones disyuntas. Hacia el golfo de México, con una pequeña porción hacia el Pacífico Central, se extiende la ecorregión de selvas cálido-húmedas. Por otro lado, de manera predominante hacia la costa del Pacífico, rodeando la sierra Madre del Sur, con porciones que se extienden hacia la costa del golfo de México en la región tamaulipeca y alcanzando el Petén en la península de Yucatán, se distribuyen las selvas cálido-secas.

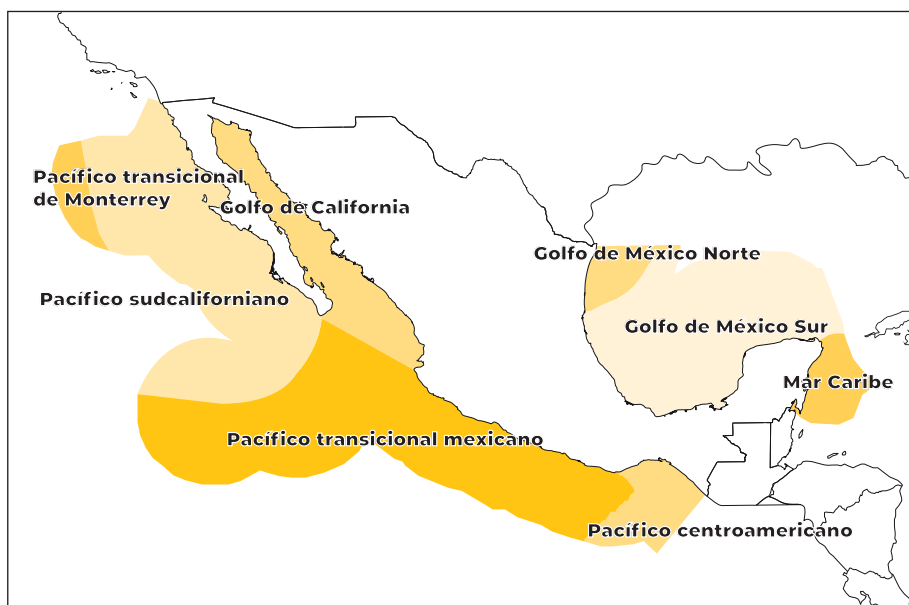
Las selvas cálido-húmedas están caracterizadas por una vegetación perennifolia, que mantiene su follaje durante todo el año, con un estrato arbóreo que alcanza al menos 30 metros de altura. Estas selvas albergan una diversidad notable de especies vegetales, incluyendo géneros característicos como *Ficus* y *Clusia*, así como una alta riqueza de especies de las familias *Bromeliaceae*, *Arecaceae* y *Orchidaceae*. Algunos de los árboles emblemáticos de la ecorregión son la caoba (*Swietenia macrophylla*), el cedro rojo (*Cedrela odorata*), la ceiba (*Ceiba pentandra*), y la flor de corazón (*Talauma mexicana*) (Conabio, 2023b; Koleff et al., 2018).

Esta ecorregión también es el hogar de diversos mamíferos, entre los que destacan las tres especies de monos presentes en el país: el mono araña (*Ateles geoffroyi*), el saraguato de manto (*Alouatta palliata*) y el mono aullador negro (*Alouatta villosa*). Además, se distribuye el único perisodáctilo del país: el tapir centroamericano (*Tapirus bairdii*). En cuanto a las aves, las especies características incluyen la guacamaya roja (*Ara macao*), el tucán real (*Ramphastos sulfuratus*) y el tucán de collar (*Pteroglossus torquatus*), entre muchas otras (Conabio, 2023b).

Las ecorregiones marinas abarcan todas las aguas costeras y de plataforma hasta una profundidad de 200 metros. Albergan una biodiversidad única y proporcionan valiosos recursos alimentarios, además de desempeñar un papel crucial en la mitigación del cambio climático como sumidero de carbono antropogénico (Sala et al., 2021). En términos de litorales y extensión marina, México ocupa el duodécimo lugar a nivel mundial. Sus costas se extienden tanto en el océano Pacífico como en el Atlántico y el mar Caribe, además de contar con un mar propio, el golfo de California, también conocido como el mar de Cortés (Sarukhán et al., 2017).

La diversidad de los ecosistemas marinos se debe a la variedad de relieves oceánicos, como taludes continentales, llanuras abisales, islas oceánicas, fosas y cadenas montañosas submarinas, así como a la heterogeneidad vertical derivada de la profundidad (Sarukhán et al., 2017; Tittensor et al., 2010). La región marina de Norteamérica está compuesta por 21 ecorregiones a nivel de cuenca oceánica, de las cuales ocho se encuentran en la zona económica exclusiva de México (CCA, 2009). Éstas comprenden el Pacífico transicional de Monterey, el Pacífico sudcaliforniano, el golfo de California, el Pacífico transicional mexicano y el Pacífico centroamericano. Hacia el Atlántico, se encuentran el golfo de México Norte, el golfo de México Sur y el mar Caribe. Los niveles anidados dentro de estos ocho representan en mayor detalle la distribución de los ambientes bentónicos y pelágicos, considerando su profundidad y topografía (Koleff et al., 2018; Sarukhán et al., 2017).

Figura 13. Distribución de las ecorregiones marinas dentro de la zona económica exclusiva de México



Fuente: Commission for Environmental Cooperation (2008).

En los ecosistemas epicontinentales y humedales la diversidad es igualmente alta, con la presencia destacada de especies endémicas, especialmente peces. La red hidrológica de estos ecosistemas abarca aproximadamente 633 000 km de longitud, y los manglares, que se extienden a lo largo de las costas del país, cubrían una superficie de 9 051 km en el año 2020. Además, estas zonas costeras también albergan dunas, lagunas y arrecifes de coral (Koleff et al., 2018).

Los manglares se distribuyen en los 17 estados de la República que tienen zonas costeras; uno de los más grandes es el de la laguna de Términos del estado de Campeche. El tipo de vegetación dominante en los manglares son los árboles y arbustos, que alcanzan alturas de 1 a 30

metros. En el país se encuentran cinco especies de manglares: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, *Avicennia germinans* y *Rhizophora harrisonii*; los cuatro primeros son los más ampliamente distribuidos y abundantes (Koleff et al., 2018).

Los manglares son vitales como zonas de cría y reproducción para una amplia variedad de peces, crustáceos, aves, reptiles, mamíferos y otros organismos semiterrestres y estuarinos. Además, desempeñan un papel crucial en la mitigación de la erosión costera y en la protección contra los impactos de fenómenos extremos, como ciclones (Alongi, 2002), lo que los convierte en una solución vital para mitigar el impacto del cambio climático.

Estos ecosistemas exhiben una alta persistencia frente a los cambios ambientales, gracias a una combinación de propiedades terrestres y marinas, junto con su capacidad para ser grandes almacenes de carbono (Alongi, 2015). Sin embargo, enfrentan una grave amenaza debido a la deforestación causada por el establecimiento de complejos turísticos y residenciales. Esta deforestación no sólo aumenta la vulnerabilidad de las comunidades humanas que habitan estas áreas frente a eventos climáticos extremos, sino que también conduce a la pérdida de medios de subsistencia tradicionales de las comunidades locales (Alongi, 2015; Sarukhán et al., 2017). La alta capacidad de los manglares para acumular carbono se presenta como un medio para mitigar las crecientes concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera, razón por la cual la restauración de este ecosistema se presenta como una solución basada en la naturaleza para enfrentar el cambio climático (Lovelock et al., 2014).

Un ecosistema estrechamente vinculado a los manglares son los arrecifes de coral, que se encuentran tanto en el Pacífico como en el Caribe mexicano. Hacia el Pacífico, existen tres grupos distintos de arrecifes de coral. El primero se ubica en el golfo de California, donde hay abundantes parches de coral, aunque sólo tres estructuras pueden considerarse

arrecifes. El segundo se encuentra en el archipiélago de Revillagigedo, que cuenta con arrecifes marginales en Clarión y Socorro, y que posee la mayor riqueza de especies de coral del occidente de México. El tercero está presente en el Pacífico tropical mexicano, especialmente en Nayarit y Oaxaca. Estos arrecifes muestran el mejor desarrollo arrecifal de México, con alta cobertura coralina pero baja diversidad (Reyes-Bonilla, 2003).

En cuanto a los arrecifes del Caribe mexicano, éstos se extienden desde las costas de Veracruz y Campeche hasta la costa oriental de la península de Yucatán. En esta última zona se encuentra una parte de la segunda barrera arrecifal más grande del mundo, conocida como el “arrecife mesoamericano”, que se extiende por las costas de Belice y Guatemala. En México, se estima que los arrecifes ocupan aproximadamente 1 780 kilómetros cuadrados (Koleff et al., 2018).

LA BIODIVERSIDAD DE MÉXICO EN CIFRAS

La posición de México en comparación con otros países considerados megadiversos varía según el grupo biológico que se tome en cuenta (Llorente-Bousquets y Ocegueda, 2008). En el caso de los vertebrados, México alberga aproximadamente 6 000 de las 68 724 especies reportadas en el mundo. Destaca como el segundo país con mayor número de especies descritas de reptiles, únicamente superado por Australia. En el caso de los mamíferos, México ocupa la tercera posición, después de Brasil e Indonesia. El grupo que resalta en México es el de los murciélagos, que desempeñan funciones cruciales en los ecosistemas, como la polinización y el control de plagas (Ramírez-Fráncel et al., 2022). Respecto a los anfibios, el país se sitúa en la quinta posición a nivel mundial. En cuanto a las aves, el grupo más numeroso de vertebrados, México ocupa el puesto número 11 en términos de diversidad, con un 10 % de especies endémicas.

Tabla 6. Especies de hongos, plantas y animales en México y el mundo

GRUPO	DESCRITAS EN MÉXICO	ENDÉMICAS EN MÉXICO	DESCRITAS DEL MUNDO
Mamíferos	564	162	5 707
Anfibios	389	261	7 621
Reptiles	887	501	10 450
Aves	1 106	104	10 672
Peces	2 781	289*	34 274
Hongos	4 474	ND	99 426
Artrópodos	42 578	1 745	1 257 047
Plantas vasculares	26 520	9 420	308 312

*Peces dulceacuícolas.

Fuente: datos obtenidos de Sarukhán y colaborados (2017) y Koleff y colaborados (2018), correspondientes a los catálogos de especies de la Conabio.

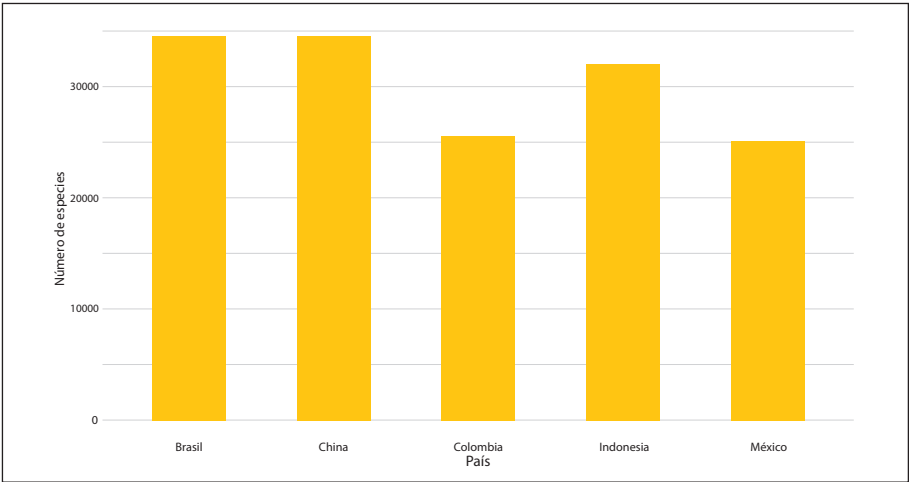
México alberga una sorprendente variedad de ecosistemas terrestres, que van desde montañas hasta áreas tropicales semiáridas y subhúmedas. Esta diversidad ha dado lugar a un alto número de grupos de flora y fauna con un elevado nivel de endemismo, convirtiendo al país en un refugio para especies que no se encuentran en ninguna otra parte del mundo. Entre los vertebrados, los anfibios, reptiles y mamíferos son los grupos con los mayores porcentajes de endemismo, con un 64%, 56% y 28%, respectivamente (Sarukhán et al., 2017). Las islas del Pacífico mexicano son especialmente ricas en especies endémicas, albergando al menos 218; los mamíferos son el grupo con el mayor número, aproximadamente 100.

El grupo más numeroso corresponde a los insectos, con más de un millón de especies descritas en el mundo, de las cuales alrededor de 40 000 han sido identificadas en México. Sin embargo, se estima que este número podría alcanzar casi las 100 000 especies. Del mismo modo, los hongos presentan una situación similar, ya que sólo se han descrito alrededor de 6 500 especies hasta la fecha, pero las estimaciones sugieren la presencia

de aproximadamente 20000 especies (Acosta-Aguirre et al., 2014). Este es uno de los grupos menos estudiados, para el cual se estima que a nivel mundial podrían existir más de cinco millones de especies (Blackwell, 2011; Sarukhán et al., 2017).

En términos de plantas vasculares, México se destaca entre los cuatro países con mayor diversidad de especies, muchas de las cuales son endémicas (Sarukhán et al., 2017). Recientemente, se estimó que la riqueza de especies de plantas vasculares en México representa el 7% del total global (Murguía-Romero et al., 2023). Hasta la fecha, se han registrado alrededor de 23300 especies de plantas vasculares (Koleff et al., 2018), con la mitad de la flora del país considerada endémica (Villaseñor, 2004). Destacan cinco familias de plantas por su alto endemismo: *Zamiaceae* lidera con un 80%, seguida de cerca por *Crassulaceae*, *Asparagaceae*, *Cactaceae* y *Bromeliaceae*, todas con proporciones superiores al 70 por ciento (Koleff et al., 2018).

Figura 14. Los cinco países megadiversos



Fuente: elaboración con datos de Sarukhán y colaboradores (2017).

AMENAZAS A LA BIODIVERSIDAD

La biodiversidad, que abarca la variedad de especies, formas de vida, genes y ecosistemas, es crucial para el funcionamiento saludable de los ecosistemas y el bienestar humano. Sin embargo, está disminuyendo a tasas sin precedentes, estimadas en dos a tres órdenes de magnitud mayores que las tasas naturales de extinción (De Vos et al., 2015; Rockström et al., 2009). La comunidad científica considera que cinco amenazas globales son las principales responsables de esta disminución: la destrucción del hábitat, la sobreexplotación, las invasiones biológicas, el cambio climático y la contaminación. Además, existen numerosas perturbaciones y factores estresantes locales que también influyen (Bellard et al., 2022).

La destrucción de biodiversidad altera los ecosistemas. Esto es más significativo en las regiones donde la pérdida es más pronunciada, lo que provoca cambios intensos en los procesos ecológicos (Cepic et al., 2022). Esta destrucción puede ocurrir en diferentes dimensiones de la biodiversidad: genética, taxonómica y funcional. Dependiendo del nivel, los efectos pueden ser más o menos notorios. Por ejemplo, la extinción de algunas especies y sus características puede llevar a una disrupción del funcionamiento del ecosistema. Esto es más severo que la pérdida de una sola especie (Cardinale et al., 2012). Mantener un alto grado de biodiversidad en los ecosistemas garantiza la presencia de redundancia funcional, lo que significa que, si una especie se pierde otra puede asumir su función, para asegurar la resiliencia del ecosistema frente a disturbios antropogénicos y proteger su integridad a largo plazo (Loreau et al., 2001). Por lo tanto, la pérdida de biodiversidad no sólo se refiere a extinciones generalizadas, sino también a la reducción de poblaciones a tamaños pequeños y aislados que desempeñan una función mínima en el paisaje. Un ecosistema fuertemente explotado y funcionalmente empobrecido es altamente vulnerable al colapso, especialmente cuando se enfrenta a invasiones de especies exóticas o a eventos estocásticos como incendios y tormentas severas (Sage, 2020).

En México, las principales amenazas para la biodiversidad en la mayoría de los ecosistemas corresponden a la destrucción de hábitat y la sobreexplotación de los recursos naturales. Las selvas húmedas y los bosques nublados son los ecosistemas que presentan pérdidas mayores al 40 %, y todos los ecosistemas terrestres presentan valores altos de deterioro ambiental. La destrucción del hábitat se produce mediante la deforestación para la agricultura, la urbanización y la construcción de carreteras. La sobreexplotación ocurre cuando los recursos naturales se extraen a un ritmo que excede su capacidad de regeneración.

La deforestación, que afecta a las selvas y bosques, y la defaunación, que impacta a la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas, genera una pérdida y reducción de las poblaciones de plantas, animales y hongos. Esto se observa en actividades como la agricultura intensiva, el sobrepastoreo, la pesca y caza excesivas, así como en el comercio ilegal de especies (Dirzo et al., 2014; Sarukhán et al., 2017).

Tabla 7. Porcentaje de pérdida y deterioro de los ecosistemas terrestres de México

ECOSISTEMA	PORCENTAJE DE PÉRDIDA	PORCENTAJE DE DETERIORO
Matorrales	13	9.31
Pastizales	40.1	38.92
Selvas secas	37.3	65.72
Selvas húmedas	48.9	67.23
Bosques templados	26.2	38.86
Bosques nublados	41.8	54.12

Fuente: datos tomados de la serie 6 de Inegi (2016).²

² Para mayor información consulte el siguiente enlace electrónico: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex>

En las regiones insulares y bosques templados de México, las invasiones biológicas representan una preocupación significativa. Éstas ocurren cuando especies no nativas se establecen en un nuevo entorno y se propagan sin control, causando daños significativos al ecosistema, a las especies locales, a la salud pública y a la economía (Conabio, 2023a; Doherty et al., 2016). Es importante tener en cuenta que las evaluaciones de estos impactos pueden estar sesgadas, ya que sólo se han enfocado a ciertos grupos taxonómicos, nivel biológico o temporalidad, lo que sugiere que el efecto real de las especies invasoras podría ser aún mayor (Crystal-Ornelas y Lockwood, 2020).

El cambio climático, por su parte, exacerba estas amenazas y aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas y su biodiversidad. Aunque el cambio climático no es el impulsor principal de la pérdida actual de biodiversidad (Pörtner et al., 2021), cada vez más observaciones indican impactos generalizados y constantes del cambio climático en las dimensiones estructurales, de composición y funcionales de la biodiversidad, desde los genes hasta los ecosistemas (Arneth et al., 2020). Esto incluye fenómenos como el aumento del nivel del mar, la alteración de los patrones de precipitación y el incremento de eventos climáticos extremos, algunos de los cuales pueden tener efectos opuestos en ciertas especies. Sus efectos son más evidentes en especies de latitudes y altitudes más elevadas, aunque también afectan a zonas húmedas y áridas, principalmente a través de eventos climáticos extremos como sequías extendidas o huracanes intensificados. Por ejemplo, algunas plantas pueden beneficiarse de los aumentos de CO₂, mientras que otras se ven afectadas por los cambios en el régimen de precipitaciones. Por lo tanto, el cambio climático se suma a las amenazas previamente mencionadas, con impactos variables según las regiones del país y el grupo taxonómico (Bellard et al., 2022).

La actual disminución de la biodiversidad plantea una grave amenaza a los procesos ecológicos y podría llevar al planeta hacia “puntos de

quiebre” globales. Estos son puntos en los sistemas naturales y el clima donde incluso cambios pequeños pueden tener consecuencias fundamentales (Scheffer et al., 2009) como el colapso de los sistemas de arrecifes de coral, el derretimiento de los casquetes polares y la interrupción de los patrones de circulación oceánica (Dakos et al., 2019). Una vez cruzados estos umbrales, revertir los cambios puede ser difícil o imposible, lo que impactaría profundamente en la biodiversidad y el bienestar de las personas (Dakos et al., 2019; Scheffer et al., 2009).

La humanidad puede ser víctima inmediata de sus propias acciones. La destrucción de la biodiversidad favorece la transmisión de enfermedades zoonóticas y la propagación de patógenos. De manera similar, la producción de alimentos bajo el enfoque de procesos intensivos, que compactan los suelos, reduce la presencia de polinizadores a partir de la destrucción del hábitat y el uso de pesticidas, y aumenta la vulnerabilidad de la humanidad ante la destrucción de la biodiversidad. Esto subraya la relación intrincada entre las acciones humanas y sus consecuencias para la biodiversidad y la salud humana (Cepic et al., 2022; Pongsiri et al., 2009).

Ante esta situación, resulta urgente tomar medidas para limitar la sobreexplotación y los cambios en el uso de la tierra, lo que puede brindar un tiempo crucial para abordar el cambio climático. Sin embargo, también es imperativo abordar los patrones de consumo desiguales que subyacen a estas amenazas. En última instancia, lograr soluciones sostenibles requiere tanto reducir el consumo general de recursos como garantizar su distribución más equitativa. Para revertir las tendencias actuales y facilitar la recuperación de la biodiversidad, es esencial actuar de manera integral y coordinada (Dirzo et al., 2014).

Ilustración 12. La biodiversidad



Autoría: Adriana Corach.

RESPUESTA DE LAS ESPECIES AL CAMBIO CLIMÁTICO

La biología del cambio climático, como disciplina, fue establecida en 1980 por Rob Peters y Thomas E. Lovejoy, con el propósito de examinar el impacto del cambio climático en los sistemas naturales. Su objetivo es comprender los efectos futuros del cambio climático antropogénico y encontrar soluciones naturales que promuevan la adaptación, tanto de las especies como de las personas. Para proyectar los potenciales impactos del cambio en el futuro, esta disciplina se apoya en la respuesta histórica de las especies, los cambios observados, la teoría biológica y la modelización. Además, integra diversas ramas del conocimiento, como la ecología, la biogeografía y la evolución, y se nutre de disciplinas externas como la climatología y la paleoecología (Hannah, 2015a).

La relación entre la biodiversidad y el clima es intrínseca y bidireccional. El planeta y el bienestar humano dependen de las contribuciones de la naturaleza a las personas, que incluyen la estabilización de la atmósfera y los océanos, la purificación del aire y el agua, la producción de alimentos y energía, y el suministro de recursos naturales (Sage, 2020). Las interacciones entre las plantas y la atmósfera determinan los hábitats en los que pueden vivir la flora y la fauna, lo que a su vez influye en su distribución geográfica, capacidad de dispersión y velocidad de movimiento (Hannah, 2015a). En general, las respuestas biológicas al cambio climático incluyen cambios en la fenología, la abundancia y la distribución de las especies. La fenología estudia la floración de las plantas, la migración de las aves o la época de reproducción de los animales.

El cambio climático también tiene efectos en la fisiología de las especies, que pueden incluir cambios en las tolerancias a altas temperaturas, así como en la proporción de sexos de aquellos grupos que tienen una dependencia del clima en la determinación de los sexos de las crías. Muchas especies, tanto en sistemas acuáticos como terrestres, presentan cambios en la morfología, como la reducción del tamaño corporal en condiciones donde la temperatura ha aumentado (Scheffers et al., 2016).

Para muchas especies, las señales ambientales son cruciales para iniciar diferentes etapas de su ciclo de vida, como la migración, la reproducción, la puesta de huevos, la germinación de semillas o la hibernación (Foden et al., 2013; Hannah, 2015a). Por ejemplo, el oso negro (*Ursus americanus*), presente principalmente en los bosques templados de pino-encino de la sierra Madre Occidental y sierras adyacentes, entra en hibernación de diciembre a abril y emerge de esta fase para iniciar su ciclo reproductivo (Doan-Crider y Hellgren, 1996). Por lo tanto, la llegada de la primavera es crucial para que concluya la hibernación y comience la reproducción. Este es sólo un ejemplo, pero, en general, las alteraciones en las señales climáticas pueden generar desajustes, como la falta de sincronización entre los picos de disponibilidad de alimentos en primavera y las fechas de eclosión, afectando así la interacción entre especies y las dinámicas de las comunidades biológicas (Foden et al., 2013; Hannah, 2015a).

Como resultado del cambio climático se han observado respuestas en las especies, con miles de cambios registrados en los límites superior e inferior de las áreas de distribución de plantas, aves, mamíferos, anfibios e insectos (Parmesan y Yohe, 2003). Estos cambios, tanto latitudinales como altitudinales, ocurren debido a las modificaciones en los gradientes climáticos provocadas por el calentamiento global. Aunque las tolerancias climáticas de las especies no cambian, o lo hacen a un ritmo mucho más lento que el clima, éstas deben desplazarse para encontrar condiciones climáticas adecuadas que les permitan sobrevivir. Sin embargo, los paisajes actuales han sido fuertemente afectados por la deforestación y la sobreexplotación, lo que limita la movilidad de las especies y les impide seguir un clima adecuado.

Aunque la disciplina de la biología del cambio climático tiene ya varios años establecida, sigue siendo relativamente joven dentro del campo de la biología. En México, se están realizando diversos esfuerzos desde diferentes enfoques para comprender cómo responden las especies al cambio climático y qué se puede hacer para reducir estos impactos. Sin

embargo, la comprensión de los efectos de los gases de efecto invernadero en la biología está en sus primeras etapas; la mayoría del conocimiento se ha centrado en los cambios pasados como el origen de las especies, la evolución y la biogeografía. No obstante, esto abre un espacio para el desarrollo de un campo de creciente interés para las nuevas generaciones de personas interesadas en la biología, las ciencias de la tierra y otros campos relacionados con las ciencias ambientales. Lo anterior, en un momento crítico en el que es necesario tomar decisiones para la adaptación y mitigación, que coadyuven a la conservación de la biodiversidad y el bienestar de todas las personas (Scheffers et al., 2016).

A continuación, se presenta una revisión del estado del conocimiento del impacto del cambio climático en diferentes procesos ecológicos de la biodiversidad de México. Para esto, se utilizó la base de artículos científicos sobre las evaluaciones del efecto del cambio climático antropogénico sobre la biodiversidad del país, compilados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (Vargas-Castro et al., 2022). Se citan ejemplos de impactos en las áreas de distribución, cambios en la fenología y la dinámica de poblaciones, así como modificaciones a nivel genético, de ecosistemas, de diferentes grupos taxonómicos y niveles de organización biológica.

CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE LAS ESPECIES

Los factores que determinan la presencia de una especie en un lugar y momento específicos se han conceptualizado como nicho ecológico (Peterson et al., 2011). Existen diversas definiciones de nicho, y cada una refleja una perspectiva particular sobre las variables que influyen en la distribución de las especies (Soberón, 2007). Todas estas definiciones, de una forma u otra, están vinculadas al clima (Austin, 2012). Soberón (2007) menciona que en ecología existen enfoques que se centran principalmente en los impactos a corto plazo de las especies en la utilización

de recursos, es decir en las relaciones bióticas (Elton, 1927; Macarthur y Levins, 1967; Odling-Smee et al., 1996), mientras que otras perspectivas se refieren más a los requisitos ambientales específicos de las especies (Grinnell, 1917; Hutchinson, 1957; Whittaker et al., 1973). En este último caso, muchas de las variables ambientales relevantes están relacionadas con el clima, como la temperatura, la precipitación y la estacionalidad de las lluvias (Hannah, 2015b; Peterson et al., 2011). Es a partir de esta información y bajo estas definiciones que ha sido posible evaluar el efecto del cambio climático sobre los procesos ecológicos de las especies.

Una de las respuestas más observadas, tanto en especies marinas como de agua dulce y terrestres, corresponde a los cambios en la distribución (Tomiole y Ward, 2018). Por su propia naturaleza, los cambios de distribución de las especies tienen lugar en los bordes de la distribución, y las poblaciones en los bordes de distribución desempeñan un papel fundamental en la respuesta ante los cambios impulsados por el clima. El borde principal de la distribución corresponde al extremo del área de distribución de una especie que está avanzando o colonizando nuevas áreas. En este extremo, las poblaciones pueden actuar como focos de dispersión y como reservorios de adaptaciones genéticas que promueven la colonización a nuevas áreas con condiciones climáticas adecuadas (Gibson et al., 2009; Hampe y Petit, 2005). Además, en el borde de distribución rezagado, que se refiere al extremo del área de distribución de una especie que está retrocediendo o disminuyendo en respuesta a cambios ambientales, las poblaciones se caracterizan por presentar altos grados de adaptación local para la persistencia de las especies en climas futuros (Hampe y Petit, 2005).

En este sentido, se han propuesto tres hipótesis respecto a cómo podrían responder las especies para seguir su nicho ecológico o climático a lo largo de gradientes espaciales: 1) una respuesta de cambio hacia los polos o latitudes más altas; 2) cambios en la distribución cuesta arriba hacia elevaciones más altas, esto en especies terrestres y de agua dulce, y 3) cambios a mayores profundidades, tanto para especies marinas y

de agua dulce. Adicionalmente, ya que con el aumento de la temperatura los sitios pierden las características que los hacen adecuados para las especies, pueden presentar extinciones globales o locales. Generalmente se espera que el borde principal de la distribución, que se desplaza en latitud y altitud, lo haga más rápidamente en respuesta a los aumentos de temperatura que el borde de distribución rezagado, o que el centroide del área de distribución de las especies (Rubenstein et al., 2023). A nivel global, el patrón general es que especies marinas amplíen su borde principal hacia el límite frío (Chen et al., 2011; Lenoir et al., 2020).

En el caso de México, los cambios detectados en la distribución de las especies se han documentado en diversos estudios realizados en aves (Machado-Stredel et al., 2022; Peterson et al., 2015) y mamíferos (Montalvo et al., 2019; Santos-Moreno et al., 2016). Además, existen investigaciones sobre pastizales (Jiménez-García et al., 2021) y plancton (Jiménez-Quiroz et al., 2019). Aunque hay estudios globales que ofrecen inferencias sobre lo que podría estar sucediendo en el país, actualmente en México no se han realizado observaciones específicas sobre los cambios en la distribución de especies que habitan los ecosistemas marinos o de cuerpos de agua dulce.

Las aves utilizan datos históricos y actuales de colecciones científicas y observaciones de ciencia ciudadana para determinar si en el último siglo ha habido un recambio de especies en las comunidades de aves y cuáles son los factores que lo han impulsado, (Peterson et al., 2015; Machado-Stredel et al., 2022). Ambos estudios comparan los cambios entre dos periodos: uno histórico, que representa las colectas científicas anteriores a 1980, y otro posterior a este año.

Peterson y colaboradores se enfocan, por un lado, en especies endémicas de México y detectan cambios significativos, principalmente impulsados por el aumento de la temperatura. Observaron altas pérdidas en las comunidades de aves de los estados de Sonora, Sinaloa, Durango, Jalisco, Guanajuato, Querétaro y Chiapas, mientras que se registraron

relativamente pocas ganancias en el norte del desierto chihuahuense y el noroeste de Baja California.

Por otro lado, Machado-Stredel y colaboradores (2022) utilizaron principalmente bases de datos de Canadá y los Estados Unidos, centrándose en la localidad de Chichén-Itzá, la cual se ha propuesto como un lugar muy estudiado en términos de especies de aves presentes en México (Peterson et al., 2016). A diferencia del estudio de Peterson y asociados (2015), encontraron que el aumento de la precipitación se correlaciona con la pérdida de algunas especies. En esta localidad, evaluaron 265 especies y detectaron la pérdida de la paloma escamosa (*Patagioenas speciosa*), así como la detección de invasiones recientes de *Streptopelia decaocto*, una especie de Eurasia que llegó a América después de 1980. También se reportaron nuevas aves acuáticas que no se habían registrado antes de 1980.

Ambos estudios ofrecen una perspectiva sobre cómo el cambio climático ha afectado significativamente el recambio de especies de aves en México. Además, destacan el valor de las colecciones biológicas como una herramienta importante para comprender cómo la biodiversidad ha sido afectada por el cambio global, y subrayan la importancia de monitorear y comprender estos cambios para procurar su conservación.

En el caso de los mamíferos, Montalvo y colaboradores (2018) proporcionan una revisión exhaustiva de las amenazas del cambio climático en poblaciones silvestres del venado de cola blanca (*Odocoileus virginianus*). Aunque su trabajo abarca una síntesis de la literatura que examina el impacto del cambio climático o las variaciones climáticas en toda el área de distribución de la especie, desde Canadá hasta México, hasta el momento no se han realizado estudios directamente relacionados con cambios observados en la distribución de las especies de venado. No obstante, estudios documentados informan sobre cambios en los movimientos y en el comportamiento migratorio, así como en las fluctuaciones de las poblaciones. De estos, sólo uno aborda específicamente los cambios en los movimientos debido a las variaciones en los patrones de precipitación de las

poblaciones de venados presentes en México (Bello et al., 2004). Aunque este caso no está directamente vinculado al cambio climático, sino más bien a la variabilidad climática, proporciona información relevante para comprender la relación de esta especie con las precipitaciones.

Santos-Moreno y colaboradores (2016) informan sobre la expansión del límite superior del área de distribución de tres especies de mamíferos: el oso hormiguero *Tamandua mexicana*, así como los murciélagos *Natalus mexicanus* y *Desmodus rotundus*. De estas tres especies, sugieren que sólo el caso del oso hormiguero podría corresponder a un proceso de colonización como respuesta al cambio climático. Esta especie, fácilmente reconocible y bien documentada, no se había avistado previamente según los habitantes de La Cofradía, en el estado de Oaxaca, ubicada a unos 2850 metros sobre el nivel del mar. Por lo tanto, los autores sugieren que la presencia del oso hormiguero en esta zona montañosa podría ser una respuesta al cambio climático. En cuanto a los murciélagos, los autores no afirman que su presencia se deba a colonizaciones como respuesta al cambio climático, ya que ambas especies han sido poco estudiadas, lo que sugiere que los registros en el límite superior de su área de distribución podrían deberse a la falta de investigaciones en amplias zonas del estado de Oaxaca. Aunque la evidencia no es concluyente, proporciona un punto de partida para iniciar programas de monitoreo de las especies en esta región.

Un estudio centrado en analizar la respuesta histórica de los pastizales y bosques de pino que rodean 15 volcanes en México se enfocó específicamente en el Eje Neovolcánico Transversal, hogar de las montañas más altas del país (Jiménez-García et al., 2021). Mediante el uso de imágenes de satélite desde 1985 hasta 2018, los investigadores caracterizaron los límites de ambos tipos de vegetación y observaron un desplazamiento del límite superior hacia las partes más altas de las montañas mexicanas. En la actualidad, la línea de árboles se encuentra entre los 2043 y 3921 metros sobre el nivel del mar, reportando un desplazamiento promedio de aproximadamente 490 metros durante el

periodo de análisis. Además, los autores revisaron fotografías históricas de las sierras de los volcanes y lograron capturar imágenes del mismo lugar en la actualidad. Una de ellas muestra el cambio en la línea de árboles en la sierra Negra de Puebla, como se presenta en la figura 15, donde se destaca cómo la línea de árboles es notablemente más alta en la cara noreste de la sierra en 2018, en comparación con una fotografía tomada por Edward W. Nelson y Edward A. Goldman en 1984.

Figura 15. Comparación de vistas idénticas de la sierra Negra de Puebla entre 1984 (arriba) y 2018 (abajo)



Fuente: imágenes modificadas a partir de Jiménez-García y colaboradores (2021).

También evaluaron el cambio en el índice de verdor (NDVI por sus siglas en inglés) con respecto a la elevación, entre los años 1986, 2008 y 2018, utilizando imágenes de satélite. Con esto fue posible detectar cambios en el índice de nueve de los volcanes presentes en el eje. Los cambios en los valores del NDVI indican un aumento en la densidad de la vegetación y la productividad en elevaciones más altas. Estos cambios se observan a medida que la vegetación se expande hacia elevaciones más altas, posiblemente debido a temperaturas más cálidas y cambios en los patrones de precipitación.

Este tipo de enfoques, que emplean imágenes de satélite para evaluar los efectos del cambio climático en la distribución de las especies, son ejemplos de cómo la tecnología puede aprovecharse para comprender y atender los impactos del cambio climático en la biodiversidad. El estudio realizado por Jiménez-García y colaboradores (2021) es un caso ejemplar de cómo el análisis de imágenes satelitales puede proporcionar información valiosa sobre cómo las comunidades vegetales están respondiendo a los cambios en el clima. Sin embargo, es importante destacar que este enfoque todavía no se utiliza ampliamente en la evaluación de los efectos del cambio climático en la biodiversidad. Por ejemplo, hasta la fecha, sólo se ha realizado otro estudio similar en las selvas y bosques de México (Galicia y Fernández, 2014), donde también se identificaron patrones similares a los observados en el trabajo de Jiménez-García y colaboradores (2021). Por una parte, esto sugiere que existe un gran potencial sin explotar en el uso de imágenes de satélite para monitorear y comprender los impactos del cambio climático en la biodiversidad. El uso generalizado de estas técnicas podría proporcionar una visión más completa y detallada de cómo las especies están respondiendo a los cambios ambientales, lo que a su vez podría informar de manera más efectiva las estrategias de conservación y restauración.

Por otra parte, el cambio climático puede influir en la abundancia total de las especies, es decir, en el tamaño de sus poblaciones. Estos cambios pueden manifestarse incluso sin que haya una alteración en

los límites de distribución de las especies (Lenoir y Svenning, 2015). Los patrones de cambios en la abundancia pueden servir como indicadores tempranos de posibles cambios en la distribución de las especies a nivel global (Martins et al., 2024). Además, estos cambios no sólo están relacionados con la distribución, sino también con alteraciones en la fenología y las interacciones entre especies (Van der Putten et al., 2010). En el contexto de México, se han llevado a cabo estudios que evalúan los cambios observados en la abundancia de especies, en la mayoría de los casos como respuesta a la variabilidad climática o a eventos climáticos extremos. Estos factores se pueden agudizar con el cambio climático.

En el país, entre los pocos estudios que existen sobre este aspecto la mayoría examina el efecto de la variabilidad climática, y casi todos se centran en plantas (Agraz Hernández et al., 2015; Badano y Sánchez-Montes de Oca, 2022; Cruzado-Vargas et al., 2021; Rodríguez-Buritica et al., 2019). No obstante, también se han realizado estudios con mariposas monarcas (Zylstra et al., 2021), nematodos (Gingold et al., 2013), copépodos (Kozak et al., 2018) y floraciones de algas planctónicas (Jiménez-Quiroz et al., 2019; Meave del Castillo y Zamudio-Reséndiz, 2018).

En cuanto a los vertebrados, hasta el momento se han realizado evaluaciones únicamente en aves y reptiles. Para las aves, se han llevado a cabo tres estudios (Anderson et al., 2017; Brabata et al., 2019; Hinojosa-Huerta et al., 2013), los cuales se enfocan en las sequías a corto plazo como sustitutos para proyectar los efectos de las tendencias de sequía a largo plazo, inducidas por el cambio climático. Por ejemplo, Hinojosa-Huerta y colaboradores (2013) evaluaron el impacto de las sequías y la reducción del flujo de agua superficial en las poblaciones de aves a lo largo del río Colorado en México. Durante el periodo de 2002 a 2007 monitorean a las poblaciones de aves y al cambio en la vegetación riparia utilizando análisis de percepción remota. Los resultados indicaron una disminución en la densidad y abundancia de especies exclusivas de la vegetación riparia, mientras que las especies generalistas mostraron un

aumento en sus abundancias. Este estudio ofrece una visión de los desafíos que enfrenta el corredor ripario, incluida su vegetación, así como la resiliencia de algunas especies de aves frente al estrés ambiental.

Del mismo modo, Bravata y colaboradores (2019) llevaron a cabo un estudio comparativo de las comunidades de aves presentes en el humedal de Chametla, ubicado en el estado de Baja California Sur, durante tres periodos diferentes. Su objetivo fue analizar los cambios en la composición y diversidad de especies como respuesta al cambio climático. Para ello, realizaron censos durante tres periodos, cada uno de 12 meses de duración. El primer periodo abarcó de enero a diciembre de 1992, el segundo de junio de 1997 a mayo de 1998, y el tercero de agosto de 2005 a agosto de 2006. Los resultados revelaron que las comunidades de aves experimentaron cambios significativos a lo largo de los años, en respuesta a las condiciones climáticas y sus características fenológicas. Se observó un aumento en la dominancia de ciertas especies entre 1991 y 2006, así como una disminución en el número de aves playeras, junto con un cambio en la dominancia de especies. Además, se encontró que la riqueza de especies alcanzó su punto máximo durante el periodo de El Niño-Oscilación del Sur.

En otro estudio enfocado en el pelícano de California (*Pelecanus occidentalis californicus*), Anderson y colaboradores (2017) documentaron un bajo rendimiento reproductivo en las poblaciones de esta especie durante el periodo comprendido entre 2014 y 2016, aunque también consultaron estudios previos en los que se midieron los intentos de anidación desde 1970. Este bajo rendimiento reproductivo lo atribuyeron a tres factores: en primer lugar, a que un menor número de individuos reproductores llegó a las colonias de anidación; en segundo lugar, a que aquellos individuos que llegando abandonaron las colonias y realizaron migraciones a gran escala antes de lo previsto; en tercer lugar, a que el éxito reproductivo de las pocas parejas que intentaron reproducirse fue subóptimo. Estas respuestas se atribuyen a la presencia del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur, el cual generó un periodo de calentamiento sin precedentes.

Aunque los ejemplos anteriores se centran en aves de ecosistemas áridos, también existe un estudio con reptiles del desierto sonoreño, (Flesch et al., 2017). Este estudio examinó la dinámica poblacional de cinco especies de lagartijas durante un periodo de 25 años, desde 1989 hasta 2013. Durante este tiempo registraron la especie y la edad en cada transecto, junto con la hora del día y la temperatura del aire a un metro de altura del suelo, así como la temperatura de la superficie del suelo. Aunque se esperaba que las especies con preferencias por altas temperaturas prosperaran, los resultados mostraron que aquellas por climas más fríos y asociadas a ambientes áridos aumentaron en abundancia, mientras que las que se inclinaban por temperaturas más altas disminuyeron. En general, las especies que aumentaron o permanecieron estables eran arbóreas, viviendo principalmente en la sombra o reproduciéndose durante el invierno o la primavera, lo que las aislaba de los extremos abióticos. Por el contrario, las especies que disminuyeron utilizaban microhábitats más abiertos en el suelo y se reproducían principalmente durante el verano, lo que aumenta su exposición a extremos abióticos (Flesch et al., 2017).

Si bien los resultados de las investigaciones se centran en la respuesta de las especies a fenómenos climáticos extremos, en lugar de abordar directamente el cambio climático es crucial destacar la relevancia de esta información para elaborar estrategias efectivas de conservación y manejo de la biodiversidad en un contexto de cambio climático. Estas investigaciones sugieren que las respuestas de las especies a los cambios climáticos son diversas y dependen de factores como las preferencias de hábitat, la capacidad reproductiva y las adaptaciones a condiciones extremas. Además, subrayan la necesidad de explorar otros grupos taxonómicos y ecosistemas para obtener una comprensión más completa de los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad del país.

FENOLOGÍA, EL DESPERTAR DE LA NATURALEZA
ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

La fenología corresponde al estudio de los ciclos estacionales en la naturaleza. La generación de brotes y flores en una planta es un ejemplo de ésta. La temperatura y la precipitación desencadenan una serie de respuestas hormonales que conducen a la floración, por lo que, a medida que las condiciones se calientan, la floración en plantas ocurre antes. Este fenómeno afecta no sólo a las plantas con flor, sino también a otras plantas y animales (Hannah, 2015c).

En México, por ejemplo, en las selvas caducifolias se observan distintas etapas fenológicas a lo largo del año. Durante la temporada húmeda, la vegetación exhibe un verdor exuberante, mientras que en la época seca las plantas pierden su follaje (Trejo Vázquez, 1999). La migración de las ballenas también ilustra la fenología: estas especies viajan miles de kilómetros para reproducirse en aguas más cálidas durante el invierno (Meynecke et al., 2021), y son avistadas a lo largo de la costa del Pacífico mexicano entre noviembre y febrero. Otro ejemplo se encuentra en los patrones de actividad de especies de anfibios fosoriales. La rana *Smilisca fodiens* pasa parte del año en madrigueras subterráneas, emergiendo brevemente en la superficie cuando las condiciones climáticas lo permiten (Encarnación-Luévano et al., 2013; Sullivan et al., 1996).

Por esta razón, la fenología ha sido una de las formas más directas de evaluar la relación de las especies con el clima, con cambios estacionales documentados como respuesta al cambio climático (Parmesan y Yohe, 2003; van Weelden et al., 2021). Se ha observado que eventos clave en el ciclo de vida de las especies, influenciados por el clima, están ocurriendo en fechas adelantadas en una amplia gama de taxones, aunque la magnitud y la dirección de estos cambios varían entre especies (Parmesan, 2007). Sin embargo, los cambios fenológicos pueden mitigar los efectos negativos del cambio climático o generar desajustes que afectan la capacidad

de respuesta de la biodiversidad (Inouye, 2022). Dada la integralidad de la fenología en varios aspectos de las historias de vida de las especies, sus repercusiones podrían ser significativas para la salud del ecosistema y de las personas (Chmura et al., 2019; Inouye, 2022).

En México, los estudios históricos sobre la fenología como respuesta a la variabilidad climática son limitados, y aún más lo son las evaluaciones a largo plazo que se vinculan directamente al cambio climático. Sin embargo, es crucial reconocer la importancia de estos estudios, aunque abarquen periodos cortos, ya que representan un primer paso para comprender la sensibilidad de las especies al cambio climático. La mayoría de estos estudios se centran en plantas (Agraz Hernández et al., 2015; Albarrán et al., 2017; Jiménez-Quiroz et al., 2019), aunque también hay ejemplos que abordan la fenología en murciélagos (Ferreira-García et al., 2018), aves (Brabata et al., 2019) y ballenas (Rugh et al., 2001).

Los murciélagos son animales con hábitos alimenticios diversos y con capacidad de adaptarse a diferentes ambientes. El estudio de este grupo es esencial para entender el rol que tienen en los ecosistemas, en la polinización y dispersión de semillas, así como su capacidad de adaptarse al cambio climático. El que sean tan sensibles a la estacionalidad climática dependerá de la variación en la dieta. Se ha visto que especies con dieta omnívora no son afectadas por la estacionalidad, al poder utilizar diferentes recursos disponibles en el tiempo. Sin embargo, para algunas especies la estacionalidad representa una época del año en la que deben buscar refugios de maternidad y alimento en otros bosques tropicales secos, donde existe una gran variedad de plantas en floración. Por esto, las especies que se ven afectadas por la estacionalidad corren mayores riesgos ante el cambio climático, debido a la dependencia de recursos alimenticios específicos (Ferreira-García et al., 2018).

En los entornos marinos, los estudios de Rugh y colaboradores (2021) han revelado retrasos en la migración de la ballena gris hacia el sur, consistentes con cambios en el régimen climático después de la década de

1970. El cambio en el régimen climático puede haber influido en la disponibilidad de alimentos, lo que sugiere que dio lugar a una redistribución de ballenas en las zonas de alimentación y provocó un retraso en las fechas de migración. Estos hallazgos, documentados desde Alaska hasta Baja California, subrayan la importancia de comprender cómo el cambio climático está alterando los patrones fenológicos en una amplia gama de especies marinas.

Tabla 8. Calendario migratorio de las ballenas grises durante su migración hacia el sur

ESTACIÓN COSTERA	DISTANCIA	TIEMPO DE VIAJE	MEDIANA DE LAS FECHAS	
			Esperado	Observado
Point Vicente, California	790 km	3.3 días	18 de enero	18 de enero
Laguna Guerrero Negro, México	30 km	5.47 días	23 de enero	Inicios de febrero
Laguna Ojo de Liebre, México	350 km	1 día	24 de enero	25-29 de enero
Laguna San Ignacio, México		2.4 días	26 de enero	9 de febrero o después

Fuente: modificado a partir de Rugh y colaboradores (2001).

Una posible consecuencia de los cambios fenológicos en respuesta al cambio climático es la falta de sincronización entre las especies que interactúan en un ecosistema. Los desajustes tróficos en sistemas marinos son un ejemplo claro de esto. Las interacciones entre especies, como las relaciones depredador-presa, herbívoro-planta, polinizador-planta, y otras, pueden volverse más sensibles cuando implican cambios en múltiples señales climáticas (Hannah, 2015c; Inouye, 2022). En México, un ejemplo notable de esta dinámica es la migración de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*), que depende de una señal ambiental para iniciar

la migración y se alimenta de las plantas del género *Asclepias*. Además del desajuste que podría surgir en la migración como respuesta al cambio climático, un experimento demostró que un aumento de la temperatura puede llevar a un incremento de los cardenólidos en la planta, lo que podría representar una trampa ecológica para la especie, ya que el exceso de estas moléculas reduce la aptitud física de las larvas (Faldyn et al., 2018).

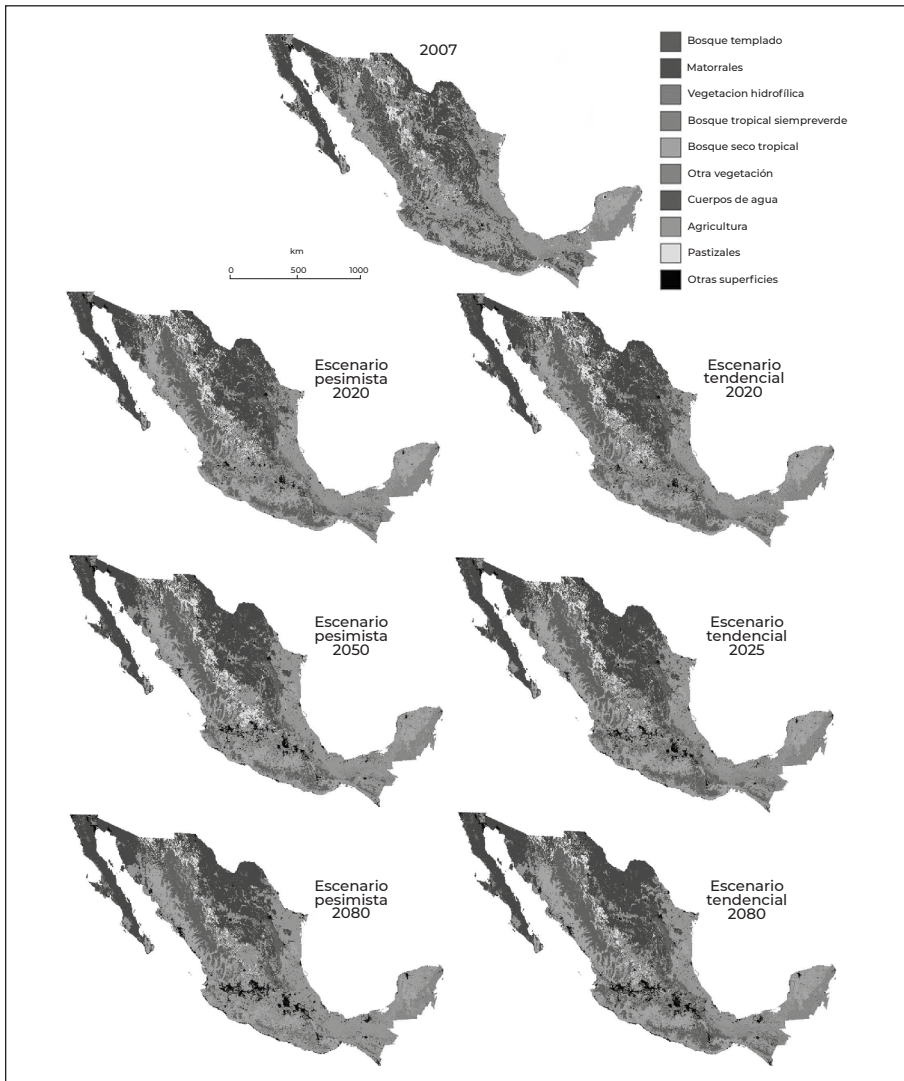
Incluso dentro de una comunidad de plantas con flores, no todas las especies responden de la misma manera al cambio climático, lo que dificulta hacer generalizaciones sobre las consecuencias y pronosticar el futuro de la comunidad. Esta incertidumbre es aún mayor en las interacciones que involucran a más de dos especies, como el caso de las orugas que se alimentan de las hojas de un árbol y que, a su vez, son presa de especies de aves insectívoras (Hannah, 2015c; Inouye, 2022). La escasez de investigaciones sobre este tema subraya la importancia de profundizar la respuesta de los mecanismos ecológicos; sin embargo, es concebible aprovechar los datos históricos alojados en repositorios científicos o colecciones fotográficas. Estos procesos de cambio están fomentando una nueva comprensión de la funcionalidad de los ecosistemas y de la interacción entre las diversas especies, así como de su entorno cambiante.

LA MODELACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA ENTENDER LA RESPUESTA DE LAS ESPECIES

Gran parte del conocimiento actual sobre el impacto del cambio climático antropogénico en la biodiversidad, y en consecuencia en el desarrollo de la disciplina de la biología del cambio climático, proviene de la modelación. A partir de modelos matemáticos, es posible obtener una visión tanto del clima presente como del futuro (consultar capítulo 1), y de cómo los ecosistemas y las especies pueden responder al cambio climático.

Existen modelos dinámicos de vegetación que describen procesos como la fotosíntesis, ciclos de carbono y la fisiología de las plantas para simular el crecimiento de diferentes tipos de vegetación. Estos modelos incorporan los efectos múltiples del cambio global que interactúan sobre la dinámica de la comunidad de plantas y áreas de las especies (Shugart, 1998). También hay modelos que incorporan tasas de cambio observadas entre tipos de vegetación, junto con variables antropogénicas y ambientales, para proyectar modificaciones en la vegetación bajo diferentes escenarios de cambio global (Soares-Filho et al., 2002). Por ejemplo, en México existe un modelo para informar sobre escenarios futuros de uso del suelo, que incorpora trayectorias socioeconómicas y condiciones climáticas contrastantes, lo que sugiere posibles futuros basados en las decisiones actuales. Según este modelo, si se continúa con un desarrollo dependiente de la quema de combustibles fósiles y aumenta la inequidad socioeconómica, los bosques perennifolios y los pastizales corren un mayor riesgo. Además, se proyecta un significativo crecimiento en tierras agrícolas para 2050 y 2080 en áreas a lo largo de la costa del golfo de México, la región central norte y el estado de Chiapas. Factores socioeconómicos como la distancia de los asentamientos humanos, la densidad poblacional, el producto interno bruto (PIB) y la marginación influyen notablemente en los cambios de bosques templados y matorrales de tierras agrícolas, lo que demuestra que las actividades humanas y las condiciones económicas afectan el uso del suelo (Mendoza-Ponce et al., 2019).

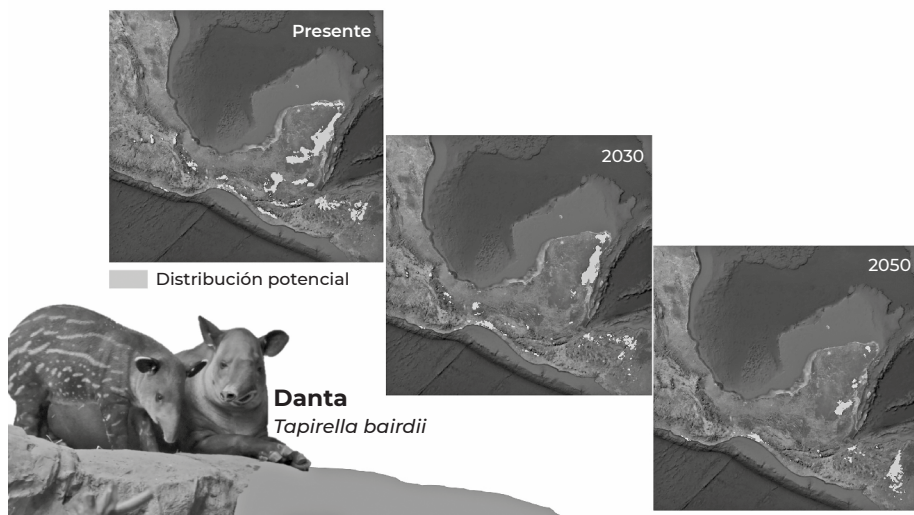
Figura 16. Cambio en el uso de la tierra bajo escenarios de cambio socioeconómico y cambio climático en México



Fuente: imagen tomada de Mendoza-Ponce y colaboradores (2019).

Asimismo, los modelos de nicho ecológico y distribución geográfica potencial (MNE-DP) simulan la distribución de especies en un espacio ambiental y geográfico en relación con el clima. Los MNE-DP crean un modelo estadístico de la relación entre el clima actual y las coordenadas de presencia de una especie. Esta relación es posteriormente proyectada a las condiciones climáticas presentes y futuras, con el propósito de obtener una hipótesis del cambio en la distribución potencial de la especie (Peterson et al., 2011). Existen modelos correlativos, mecanísticos o basados en un proceso ecológico. Cualquiera de estos modelos es útil para estudiar especies cuya respuesta al cambio climático es muy poco conocida; sin embargo, los modelos correlativos, que requieren sólo variables ambientales y observaciones de especies, han permitido su amplio uso sobre los demás (Elith et al., 2010).

Figura 17. Resultados de un modelo de distribución potencial bajo escenarios climáticos al 2030 y 2050



Fuente: elaboración propia.

La mayoría de las investigaciones sobre el impacto del cambio climático en la biodiversidad de México se ha llevado a cabo utilizando MNE-DP (Vargas-Castro et al., 2022). Hasta ahora, este enfoque se ha aplicado principalmente en el estudio de las plantas. Sin embargo, es importante destacar que estos métodos ofrecen sólo una perspectiva limitada de lo que podría ocurrir con las especies en el futuro. Los MNE-DP se basan en las preferencias climáticas actuales de las especies y en cómo éstas pueden cambiar en el futuro, sin incorporar otros factores como las características ecológicas intrínsecas que podrían hacer que las especies sean más o menos susceptibles al cambio climático. Esto implica que, aunque los MNE-DP puedan sugerir que las condiciones climáticas adecuadas para una especie no estarán disponibles en el futuro, la especie misma puede tener características que le permitan adaptarse al cambio climático. Es fundamental destacar este punto, ya que es común malinterpretar los resultados de estos modelos como predicciones de extinciones locales o globales. Por esta razón se recomienda que las evaluaciones para identificar las especies en mayor riesgo ante el cambio climático utilicen un marco conceptual que permita evaluar de forma más completa la vulnerabilidad de la biodiversidad (Foden et al., 2013; Pacifici et al., 2015).

En el contexto de México, se han realizado nueve estudios que evalúan la sensibilidad, capacidad adaptativa y exposición de las especies al cambio climático. La mayoría de estos trabajos se centran en uno o más grupos taxonómicos específicos (Esperón-Rodríguez y Barradas, 2015; Lara-Resendiz et al., 2019; Ramírez-Bautista et al., 2020; Sinervo et al., 2010). Además, hay investigaciones enfocadas en ecosistemas específicos, como los arrecifes (Alva-Basurto y Arias-González, 2014; Bozec et al., 2015) y los manglares (Cinco-Castro y Herrera-Silveira, 2020), así como un estudio a nivel regional (Esperón-Rodríguez et al., 2019). Sin embargo, es relevante destacar que sólo el estudio realizado por Ureta y colaboradores (2022) incorpora el marco conceptual más reciente del IPCC, que evalúa el riesgo de los sistemas ante el cambio climático.

Este marco considera tres variables: la vulnerabilidad de las especies –la cual en este caso está en función de su sensibilidad y capacidad adaptativa–, así como la exposición y los peligros climáticos. En este estudio se aplicó dicho marco para calificar las especies de mamíferos terrestres de México según su nivel de riesgo frente al cambio climático, lo que reveló que incluso especies catalogadas como de “preocupación menor”, como *Caluromys derbianus* y *Chironectes minimus*, enfrentan un alto riesgo. Entre los grupos tróficos en mayor riesgo se destacan los herbívoros-folívoros, cuya ausencia podría desencadenar un desequilibrio en los ecosistemas y una pérdida significativa de los beneficios que la naturaleza proporciona a las personas.

Es importante resaltar el papel que desempeñan las áreas naturales en la adaptación de las especies al cambio climático. Cuanto mayor sea el porcentaje del área de distribución de una especie que esté protegida por áreas naturales protegidas, mayor capacidad tendrán las poblaciones para enfrentar y adaptarse al cambio climático. Esta aproximación subraya la importancia de conservar y gestionar adecuadamente estas áreas para garantizar la supervivencia y resiliencia de la biodiversidad frente a los desafíos del cambio climático.

ADAPTACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

En el primer capítulo de este libro, se define la adaptación como la capacidad de un sistema para reducir riesgos e impactos negativos (Martínez, 2020). En los sistemas biológicos, la capacidad adaptativa está estrechamente relacionada con las características intrínsecas de las especies. Esta capacidad puede manifestarse a través de la persistencia *in situ* de la especie o mediante el cambio de su distribución hacia zonas más adecuadas. Incluye la capacidad adaptativa evolutiva (capacidad de evolucionar), la capacidad de dispersión (que abarca desde movimientos locales hacia microclimas más favorables hasta migraciones más

allá del espacio histórico de la especie) y la plasticidad fenotípica (como ajustes en el comportamiento o aclimatación). Estos factores juegan un papel crucial en la adaptación de las especies a los cambios en su entorno (Beever et al., 2016; Nicotra et al., 2015; Williams et al., 2008).

La investigación en México ha contribuido de manera significativa al conocimiento en esta área, principalmente a través de la modelación y su combinación con otros de los elementos que se utilizan para evaluar la vulnerabilidad o riesgo de las especies frente al cambio climático, por ejemplo, la sensibilidad y exposición (ver capítulo 1). Varios estudios, mediante la revisión de la literatura o el uso de *proxies*, han recopilado información sobre los rasgos que facilitan la adaptación de las especies (Ramírez-Bautista et al., 2020; Schloss et al., 2012; Ureta et al., 2022; Velo-Antón et al., 2013). Por ejemplo, el uso de características funcionales como el peso corporal, el tipo de dieta y la longitud de las generaciones han permitido estimar que muchos mamíferos de México, especialmente aquellos ubicados hacia la península de Yucatán o los desiertos de América del Norte, no responderán a la misma velocidad que las poblaciones de otras regiones (Schloss et al., 2012).

Otra contribución importante de la investigación en México es la realización de experimentos para estudiar la adaptación de las especies tanto en laboratorio como en el campo. Aunque se han realizado experimentos para varios grupos de organismos, especialmente plantas, hay ejemplos recientes que incluyen reptiles (Lara-Reséndiz et al., 2019; Lara-Reséndiz et al., 2015). Estos estudios han evaluado la respuesta fisiológica de las especies y su capacidad de aclimatación. Por ejemplo, mediante trasplantes recíprocos en el campo, se observa cómo las poblaciones de organismos se adaptan a diferentes condiciones climáticas. Este tipo de experimento implica recolectar individuos de una población que vive en un ambiente cálido y trasladarlos a un ambiente frío, mientras que individuos de una población que vive en un ambiente frío sean trasladados al ambiente cálido. Esto permite observar cómo se

comportan y reproducen en un entorno diferente al que están acostumbrados, lo que brinda información valiosa sobre la plasticidad fisiológica de la especie (Rosado-Calderón et al., 2020). Estos experimentos son comunes en ingeniería forestal, ya que se utilizan para probar la plasticidad fenotípica, e identificar especies más aptas para crecer en ambientes extremos, con el fin de llevar a cabo una migración asistida. En México estos experimentos se han realizado principalmente en especies de pinos en zonas templadas (Cruzado-Vargas et al., 2021; García-Hernández y Toledo-Aceves, 2020; Gómez-Pineda et al., 2021; Loya-Rebollar et al., 2013).

Las zonas que concentran condiciones ambientales también pueden ser consideradas indirectamente como facilitadoras de la adaptación de las especies. Tal es el caso de las áreas naturales protegidas, que corresponden a entornos con mínima alteración por la actividad humana, lo que permite conservar ecosistemas con niveles significativos de integridad y funcionamiento (WDPA, 2024). Estas áreas ofrecen una amplia gama de beneficios, desde la preservación de la biodiversidad hasta la sensibilización de la población sobre la importancia de la naturaleza. Además, éstas sirven para amortiguar los efectos del cambio climático, así como para enfriar la temperatura de la superficie terrestre, ya que actúan como refugios al preservar la biodiversidad y estabilizar los climas locales (Xu et al., 2022).

Por lo tanto, estudios han sugerido que en regiones tropicales es necesario ampliar el porcentaje de área protegida para conservar al menos el 30% de la superficie terrestre y marina para 2030. Estas estrategias de conservación basadas en el área se deben hacer considerando la respuesta de las especies al cambio climático (Hannah et al., 2020). Es fundamental reconocer que la efectividad de las áreas protegidas depende de la aplicación rigurosa de normativas, la asignación adecuada de presupuesto para su mantenimiento y monitoreo, y la participación activa de las comunidades locales en su protección (Eklund y Cabeza,

2017). Estos aspectos son cruciales para garantizar la preservación de la biodiversidad y los recursos de la naturaleza a las personas en todo el mundo.

En México existen 226 áreas naturales protegidas a nivel federal, de las cuales 187 son terrestres, 31 son mixtas (terrestres y marinas) y ocho son exclusivamente marinas, lo que constituye más de 93 millones de hectáreas en total. También existen áreas protegidas a nivel estatal y municipal, así como áreas ejidales, comunitarias y privadas. Para estas últimas, existe la figura de áreas destinadas voluntariamente para la conservación (ADVC) en 28 estados, que suman más de 800 000 hectáreas. Las áreas naturales a nivel federal son administradas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, que también apoya a las ADCV.

Varios estudios destacan la necesidad de complementar las áreas naturales existentes con áreas adicionales, identificadas a partir de análisis sistemáticos que consideren amenazas como el cambio climático, tanto a nivel estatal (Chacón-Prieto et al., 2021) como nacional (Esperón-Rodríguez et al., 2019; Prieto-Torres et al., 2021). A pesar de esto, las áreas naturales protegidas han demostrado ser efectivas para mejorar la resiliencia de la biodiversidad marina frente al cambio climático (Micheli et al., 2012). Las reservas marinas, en particular, han mostrado aumentar la resiliencia de las poblaciones ante eventos de mortalidad masiva, posiblemente causados por la hipoxia relacionada con el clima. En un estudio realizado en Baja California, México, se observó una reducción en la alta mortalidad de invertebrados bentónicos gracias a la presencia de nuevos juveniles, derivados de la alta producción de huevos de los adultos protegidos de una especie vital para las economías locales. Este efecto beneficioso se extendió a áreas circundantes, amplificando así el impacto positivo de las reservas marinas (Micheli et al., 2012).

En México las áreas naturales terrestres han demostrado ser efectivas para mitigar el impacto de la expansión agrícola (Figueroa y Sánchez-Cordero, 2008). Sin embargo, bajo escenarios de cambio climático, es

probable que estas áreas no sean suficientes. Las especies tienden a desplazarse en respuesta a los cambios climáticos, y los modelos sugieren que pueden llevar a las especies fuera de las áreas naturales existentes, pero también pueden atraer nuevas especies a estas áreas (Hannah, 2008). Por lo tanto, se requiere la creación de nuevas reservas naturales que complementen las existentes (Hannah et al., 2020), o una gestión más dinámica que facilite la adaptación de las especies al cambio climático (Mendoza-Maya et al., 2022; Sáenz-Romero et al., 2020).

En 2020, un consorcio de instituciones gubernamentales lanzó el Explorador de Cambio Climático y Biodiversidad,³ cuyo objetivo principal es ayudar a comprender las tendencias del cambio climático y su impacto en la biodiversidad de México (Conabio et al., 2020). Este explorador proporciona datos sobre temperatura y precipitación, tanto en condiciones actuales como futuras, para todas las áreas naturales a nivel federal del país. Además, ofrece la posibilidad de acceder a una amplia gama de cartografía asociada al cambio climático.

Entre las funciones más destacadas del explorador se encuentran la identificación de zonas donde históricamente el calentamiento y la pérdida de precipitación han superado un grado y 10 mm, así como la visualización de mapas que señalan las áreas con mayor impacto humano y aquellas en las que se proyectan como climáticamente estables en el futuro, lo que las convierte en posibles refugios para la biodiversidad. En cuanto a la biodiversidad, el explorador proporciona información sobre los cambios en la distribución de algunos grupos taxonómicos y también identifica aquellos sitios que son prioritarios para la conservación y restauración en el país.

Esta herramienta constituye un esfuerzo importante para el desarrollo de planes de adaptación al cambio climático (Conanp y PNUD, 2021),

³ El recurso puede consultarse en el siguiente enlace: <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/cambio-climatico>

permitiendo a los tomadores de decisiones acceder a información detallada y actualizada para realizar acciones concretas.

El explorador también proporciona cartografía sobre la conectividad ecológica entre las áreas naturales de México ante escenarios de cambio climático. La conectividad desempeña un papel fundamental al mostrar hábitats que conectan áreas protegidas y cumplen objetivos adicionales de conservación. Esto facilita el movimiento de especies de gran tamaño y con amplios rangos de dispersión, mejorando el flujo génico entre poblaciones (Correa Ayram et al., 2017). En términos de cambio climático, la conectividad facilita a las especies encontrar nuevas áreas adecuadas, promoviendo su dispersión en búsqueda de sus preferencias climáticas, lo que ayuda a reducir el impacto del cambio climático sobre las poblaciones que atraviesan “cuellos de botella” genéticos. Los corredores ecológicos actúan como conectores que permiten el movimiento de las especies entre las áreas protegidas estáticas y la matriz del paisaje (Hannah, 2008; Hannah et al., 2014).

La propuesta nacional de corredores bioclimáticos realizada por la Conabio es un enfoque importante en la conservación de la biodiversidad y la adaptación al cambio climático. Estos corredores están diseñados para considerar gradientes climáticos y hábitats naturales menos perturbados, identificando rutas óptimas entre parches de vegetación de crecimiento antiguo, que incluyen áreas naturales protegidas. Para ello, se utilizaron datos climáticos actuales y proyectados, así como medidas de impacto humano, como el índice de huella humana, que se integraron al modelo para identificar corredores climáticos que minimizan la influencia humana. Los resultados de este estudio revelaron la existencia de alrededor de 4000 corredores en todo el país, con una alta coincidencia espacial en la ubicación geográfica de los corredores actuales y futuros (Godínez-Gómez et al., 2019).

EL PAPEL DE LA BIODIVERSIDAD EN LA MITIGACIÓN

La estrecha relación entre la biodiversidad y el clima ha llevado a considerar la biodiversidad como una solución natural a los esfuerzos por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las acciones destinadas a mitigar estas emisiones se encuentran la reforestación, la restauración ecológica, la bioenergía y el uso de energías renovables, todas con el potencial de eliminar grandes cantidades de carbono de la atmósfera (Pörtner et al., 2021). Además, estas medidas plantean sustituir materiales como el acero por otros basados en madera, lo que reduciría la dependencia de la industria siderúrgica y sus emisiones asociadas (Churkina et al., 2020). Sin embargo, expertos en biodiversidad y clima han destacado la necesidad de implementar estas medidas de mitigación con precaución. La conversión de grandes extensiones de tierra para la reforestación, la dedicación de cultivos a la generación de bioenergía, la extracción de minerales para la producción de energías renovables, y la instalación de granjas eólicas, pueden tener un impacto negativo tanto en la biodiversidad como en las comunidades humanas. En este último caso, podrían provocar desplazamientos forzados, contaminación ambiental y otros impactos. Por ejemplo, en el caso de la reforestación, es crucial que estos nuevos paisajes incluyan una amplia variedad de especies nativas en lugar de centrarse en la reforestación de una sola especie, para favorecer la restauración ecológica (Pörtner et al., 2021).

Los cambios en el uso del suelo han contribuido significativamente al cambio climático y México no es una excepción, ya que es responsable de al menos el 2 % del total de las emisiones globales debido al cambio de uso de suelo (Mendoza-Ponce et al., 2018). Sin embargo, nuestro país tiene un gran potencial como reservorio de carbono, desde los bosques templados (Mendoza-Ponce y Galicia, 2010; Santini et al., 2019, 2020) hasta los manglares (Adame et al., 2015) y sus cenotes (Adame et al., 2021).

Los esfuerzos de conservación y restauración en los ecosistemas son ahora mucho más relevantes y urgentes. Existen programas a nivel nacional que buscan reforestar al menos un millón de hectáreas. Este esfuerzo en conjunto por parte de instituciones públicas y privadas es cada vez más necesario. Conocer dónde se han realizado y dónde se podrían llevar a cabo esfuerzos de restauración es crucial para definir prioridades de conservación. México cuenta con el primer mapa nacional en el que se identifican prioridades de restauración ecológica, el cual sirve como guía para continuar con este tipo de esfuerzos (Tobón et al., 2017). Recientemente, la Conabio lanzó el Sistema Nacional de Información para la Restauración Ambiental, que busca compilar experiencias de restauración en México, comunicar los resultados de estos proyectos, así como las especies que se han utilizado, y contribuir en el diseño y desarrollo de nuevos proyectos de restauración (Conabio, 2024).

CONCLUSIONES

México enfrenta desafíos significativos en la conservación de su biodiversidad, y el cambio climático es una amenaza adicional que incrementa la vulnerabilidad de las especies. La investigación científica y la colaboración entre instituciones gubernamentales, académicas y de la sociedad civil ofrecen una base sólida para abordar estos desafíos. Es crucial que las políticas y acciones futuras se basen en datos científicos sólidos, por lo que es prioritario fortalecer el conocimiento sobre cómo los ecosistemas y la biodiversidad que los habitan están respondiendo al cambio climático.

Este conocimiento debe considerar la biodiversidad en su sentido más amplio, desde la genética hasta los ecosistemas. Sólo a través de una comprensión integral de estos aspectos será posible diseñar e implementar estrategias de conservación y restauración efectivas. Es evidente que existen varios vacíos en el conocimiento, con grupos biológicos y

ecosistemas que aún no han sido suficientemente estudiados en el ámbito de la biología del cambio climático. Además, se requieren monitoreos a largo plazo para determinar tendencias en las especies y profundizar en sus respuestas a los cambios climáticos.

Estos esfuerzos son esenciales para garantizar la salud y la resiliencia de los ecosistemas mexicanos en un futuro incierto. La capacidad de adaptación de la biodiversidad frente al cambio climático puede hacer la diferencia entre la supervivencia o la extinción de muchas especies. La protección de estos ecosistemas no sólo es vital para la conservación de la diversidad biológica, sino también para el bienestar humano. Por lo tanto, hoy es fundamental tomar medidas decisivas para proteger y restaurar nuestros ecosistemas, asegurando así un futuro sostenible para las generaciones futuras.

REFERENCIAS

- Acosta-Aguirre, C. E., Ulloa, M., Aguilar, S., Cifuentes, J. y Valenzuela, R. (2014). Biodiversidad de hongos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85. <https://doi.org/10.7550/rmb.33649>
- Adame, M. F., Santini, N. S., Torres-Talamante, O. y Rogers, K. (2021). Mangrove Sinkholes (*cenotes*) of the Yucatan Peninsula, a Global Hotspot of Carbon Sequestration. *Biology Letters*, 17(5), 20210037. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2021.0037>
- Adame, M. F., Santini, N. S., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L. y Guevara, M. (2015). Carbon Stocks and Soil Sequestration Rates of Tropical Riverine Wetlands. *Biogeosciences*, 12(12), 3805-3818. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3805-2015>
- Agraz Hernández, C. M., Chan Keb, C. A., Iriarte-Vivar, S., Posada Venegas, G., Vega Serratos, B. y Osti Sáenz, J. (2015). Phenological Variation of *Rhizophora* Mangle and Ground Water Chemistry Associated to Changes of the Precipitation. *Hidrobiológica*, 25(1), 49-61.

- Albarrán, M., Silva-Montellano, A. y Valverde, T. (2017). Reproductive Biology of the Threatened Species *Furcraea parmentieri* (Aspargaceae). *Botanical Sciences*, 95(3), 409-422. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1019>
- Alongi, D. M. (2002). Present State and Future of the World's Mangrove Forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331-349. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000231>
- Alongi, D. M. (2015). The Impact of Climate Change on Mangrove Forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30-39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Alva-Basurto, J. C. y Arias-González, J. E. (2014). Modelling the Effects of Climate Change on a Caribbean Coral Reef Food Web. *Ecological Modelling*, 289, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.014>
- Anderson, D. W., Godínez-Reyes, C. R., Velarde, E., Avalos-Téllez, R., Ramírez-Delgado, D., Moreno-Prado, H., Bowen, T., Gress, F., Trejo-Ventura, J., Adrean, L. y Meltzer, L. (2017). Brown Pelicans, *Pelecanus occidentalis californicus* (Aves: Pelecanidae): Five Decades With ENSO, Dynamic Nesting, and Contemporary Breeding Status in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 43(1), 1-34. <https://doi.org/10.7773/cm.v43i1.2710>
- Arneth, A., Shin, Y.-J., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., Midgley, G. F., Oberdorff, T., Palomo, I. y Saito, O. (2020). Post-2020 Biodiversity Targets Need to Embrace Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(49), 30882-30891. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009584117>
- Badano, E. I. y Sánchez-Montes de Oca, E. J. (2022). Seed Fate, Seedling Establishment and the Role of Propagule Size in Forest Regeneration Under Climate Change Conditions. *Forest Ecology and Management*, 503, 119776. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119776>
- Beever, E. A., O'Leary, J., Mengelt, C., West, J. M., Julius, S., Green, N., Magness, D., Petes, L., Stein, B., Nicotra, A. B., Hellmann, J. J., Robertson, A. L., Staudinger, M. D., Rosenberg, A. A., Babij, E., Brennan, J., Schuurman, G. W. y Hofmann, G. E. (2016). Improving Conservation Outcomes with

- a New Paradigm for Understanding Species' Fundamental and Realized Adaptive Capacity. *Conservation Letters*, 9(2), 131-137. <https://doi.org/10.1111/conl.12190>
- Bellard, C., Marino, C. y Courchamp, F. (2022). Ranking Threats to Biodiversity and Why It Doesn't Matter. *Nature Communications*, 13(1), 2616. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30339-y>
- Bello, J., Gallina, S. y Equihua, M. (2004). Movements of the White-Tailed Deer and their Relationship with Precipitation in Northeastern Mexico. *Interciencia*, 29(7), 357-361. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33909403>
- Blackwell, M. (2011). The Fungi: 1, 2, 3 ... 5.1 Million Species? *American Journal of Botany*, 98(3), 426-438. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000298>
- Bozec, Y. M., Alvarez-Filip, L. y Mumby, P. J. (2015). The Dynamics of Architectural Complexity on Coral Reefs Under Climate Change. *Global Change Biology*, 21(1), 223-235. <https://doi.org/10.1111/gcb.12698>
- Brabata, G., Battisti, C., Carmona, R. y Sánchez-Caballero, C. A. (2019). Bird Population Declines in the Chametla wetland (Southern Gulf of California): Evidence of Stress at the Assemblage Level. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 65(3-4), 119-129. <https://doi.org/10.1163/22244662-20191051>
- Brizuela-Torres, D., Villavicencio-García, R., Ruiz-Corral, J. A. y Cuervo-Robayo, A. P. (2023). Effects of Climate Change on the Potential Distribution of a Dominant, Widely Distributed Oak Species, *Quercus Candicans*, in Mexico. *Atmósfera*, 37, 455-480. <https://doi.org/10.20937/ATM.53182>
- Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., Mace, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S. y Naeem, S. (2012). Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity. *Nature*, 486(7401), 59-67. <https://doi.org/10.1038/nature11148>
- Cepic, M., Bechtold, U. y Wilfing, H. (2022). Modelling Human Influences on Biodiversity at a Global Scale-A Human Ecology Perspective. *Ecological Modelling*, 465, 109854. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109854>

- Chacón-Prieto, F., Rodríguez-Soto, C., Cuervo-Robayo, A. P., Monroy, J. C. C. y Alagador, D. (2021). Protected Areas in Central Mexico—Are They Fit in Promoting Species Persistence Under Climate and Land Use Changes? *Biological Conservation*, 260, 109186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109186>
- Chen, I.-C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B. y Thomas, C. D. (2011). Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>
- Chmura, H. E., Kharouba, H. M., Ashander, J., Ehlman, S. M., Rivest, E. B. y Yang, L. H. (2019). The Mechanisms of Phenology: The Patterns and Processes of Phenological Shifts. *Ecological Monographs*, 89(1), e01337. <https://doi.org/10.1002/ecm.1337>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E. y Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a Global Carbon Sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269-276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Cinco-Castro, S. y Herrera-Silveira, J. (2020). Vulnerability of Mangrove Ecosystems to Climate Change Effects: The Case of the Yucatan Peninsula. *Ocean and Coastal Management*, 192, 105196. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105196>
- Commission for Environmental Cooperation (CEC) (2008). *Marine Ecoregions of North America*. Vector Digital Data [mapa]. <http://www.cec.org/north-american-environmental-atlas/marine-ecoregions/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (1998). *La diversidad biológica de México: Estudio de País*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/divBiolMexEPais1.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2008). *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2023a). *Especies exóticas invasoras*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras>

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2023b). *Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Registros de ejemplares*. <https://www.snib.mx/ejemplares/descarga/>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2024). *Sistema Nacional de Información para la Restauración Ambiental (SNIRA)*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/snira>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2020). *Conservación, restauración y conectividad: La biodiversidad de México ante el cambio global. Síntesis y mensajes clave*.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2021). *Herramienta para la elaboración de Programas de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas*. https://www.conanp.gob.mx/cambioclimatico/PACC_2020_V11.pdf
- Correa Ayram, C. A., Mendoza, M. E., Etter, A. y Pérez Salicrup, D. R. (2017). Anthropogenic Impact on Habitat Connectivity: A Multidimensional Human Footprint Index Evaluated in a Highly Biodiverse Landscape of Mexico. *Ecological Indicators*, 72, 895-909. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.007>
- Cruzado-Vargas, A. L., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., Gómez-Romero, M., Lopez-Toledo, L., de la Barrera, E. y Sáenz-Romero, C. (2021). Reciprocal Common Garden Altitudinal Transplants Reveal Potential Negative Impacts of Climate Change on *Abies religiosa* Populations in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve Overwintering Sites. *Forests*, 12(1), 69. <https://doi.org/10.3390/f12010069>
- Crystal-Ornelas, R. y Lockwood, J. L. (2020). The 'Known Unknowns' of Invasive Species Impact Measurement. *Biological Invasions*, 22(4), 1513-1525. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02200-0>

- Dakos, V., Matthews, B., Hendry, A. P., Levine, J., Loeuille, N., Norberg, J., Nosil, P., Scheffer, M. y de Meester, L. (2019). Ecosystem Tipping Points in an Evolving World. *Nature Ecology and Evolution*, 3(3), 355-362. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0797-2>
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. y Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345(6195), 401-406. <https://doi.org/10.1126/science.1251817>
- De Vos, J. M., Joppa, L. N., Gittleman, J. L., Stephens, P. R. y Pimm, S. L. (2015). Estimating the Normal Background Rate of Species Extinction. *Conservation Biology*, 29(2), 452-462. <https://doi.org/10.1111/cobi.12380>
- Doan-Crider, D. L. y Hellgren, E. C. (1996). Population Characteristics and Winter Ecology of Black Bears in Coahuila, Mexico. *The Journal of Wildlife Management*, 60(2), 398-407. <https://doi.org/10.2307/3802242>
- Doherty, T. S., Glen, A. S., Nimmo, D. G., Ritchie, E. G. y Dickman, C. R. (2016). Invasive Predators and Global Biodiversity Loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 11261-11265. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602480113>
- Eklund, J. y Cabeza, M. (2017). Quality of Governance and Effectiveness of Protected Areas: Crucial Concepts for Conservation Planning. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1399(1), 27-41. <https://doi.org/10.1111/nyas.13284>
- Elith, J., Kearney, M. y Phillips, S. (2010). The Art of Modelling Range-Shifting Species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(4), 330-342. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x>
- Elton, C. S. (1927). *Animal ecology*. Macmillan Co.
- Encarnación-Luévano, A., Rojas-Soto, O. R. y Sigala-Rodríguez, J. J. (2013). Activity Response to Climate Seasonality in Species with Fossorial Habits: A Niche Modeling Approach Using the Lowland Burrowing Treefrog (*Smilisca fodiens*). *PLOS ONE*, 8(11), e78290. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078290>
- Esperón-Rodríguez, M. y Barradas, V. L. (2015). Ecophysiological Vulnerability to Climate Change: Water Stress Responses in Four Tree Species from

- the Central Mountain Region of Veracruz, Mexico. *Regional Environmental Change*, 15(1), 93-108. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0624-x>
- Esperón-Rodríguez, M., Beaumont, L. J., Lenoir, J., Baumgartner, J. B., McGowan, J., Correa-Metrio, A. y Camac, J. S. (2019). Climate Change Threatens the Most Biodiverse Regions of Mexico. *Biological Conservation*, 240, 108215. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108215>
- Espinosa, D., Ocegueda, S., Aguilar, C., Flores, O. y Llorente-Bousquet, J. (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En J. Soberón, G. Halffter, J. Llorente-Bousquet (coords.), *Capital Natural de México* (pp. 33-65). Conabio.
- Faldyn, M. J., Hunter, M. D. y Elder, B. D. (2018). Climate Change and an Invasive, Tropical Milkweed: An Ecological Trap for Monarch Butterflies. *Ecology*, 99(5), 1031-1038. <https://doi.org/10.1002/ecy.2198>
- Farjon, A. (1996). Biodiversity of *Pinus* (Pinaceae) in Mexico: Speciation and Palaeo-Endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 121(4), 365-384. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1996.tb00762.x>
- Ferreira-García, D., Saldaña-Vázquez, R. A. y Schondube, J. E. (2018). La estacionalidad climática no afecta la fenología de murciélagos cavernícolas con dieta omnívora. *Revista mexicana de biodiversidad*, 89(2), 488-496. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.2.2016>
- Figueroa, F. y Sánchez-Cordero, V. (2008). Effectiveness of Natural Protected Areas to Prevent Land Use and Land Cover Change in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 17(13), 3223-3240. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9423-3>
- Flesch, A. D., Rosen, P. C. y Holm, P. (2017). Long-Term Changes in Abundances of Sonoran Desert Lizards Reveal Complex Responses to Climatic Variation. *Global Change Biology*, 23(12), 5492-5508. <https://doi.org/10.1111/gcb.13813>
- Foden, W. B., Butchart, S. H. M., Stuart, S. N., Vié, J.-C., Akçakaya, H. R., Angulo, A., DeVantier, L. M., Gutsche, A., Turak, E., Cao, L., Donner, S. D., Katariya, V., Bernard, R., Holland, R. A., Hughes, A. F., O'Hanlon, S. E., Garnett,

- S. T., Şekercioğlu, Ç. H. y Mace, G. M. (2013). Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLOS ONE*, 8(6), e65427. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065427>
- Galicia, L. y Fernández, M. L. C. (2014). Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: Un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*, 39(6), 368-374.
- Galicia, L. y Gómez-Mendoza, L. (2010). Temperate Forests and Climate Change in Mexico: From Modelling to Adaptation Strategies. En S. Simard (ed.), *Climate Change and Variability* (pp. 195-210). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/9809>
- García, E. (1990). *Rangos de humedad. Extraído de Climas. IV.4.10. Atlas Nacional de México. 2.* [mapa]. Instituto de Geografía, UNAM. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/humed4mgw.html>
- García-Hernández, M. de los Á. y Toledo-Aceves, T. (2020). Is There Potential in Elevational Assisted Migration for the Endangered *Magnolia Vovidesii*? *Journal for Nature Conservation*, 53, 125782. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2019.125782>
- Gibson, S. Y., Van Der Marel, R. C. y Starzomski, B. M. (2009). Climate Change and Conservation of Leading-Edge Peripheral Populations. *Conservation Biology*, 23(6), 1369-1373. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01375.x>
- Gingold, R., Moens, T. y Rocha-Olivares, A. (2013). Assessing the Response of Nematode Communities to Climate Change-Driven Warming: A Microcosm Experiment. *PLOS ONE*, 8(6), e66653. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066653>
- Godínez-Gómez, O., Cuervo-Robayo, A., Ramírez-Mejía, D., Tobón, W., Alarcón, J., Koleff, P. y Urquiza-Haas, T. (2019). Planning Landscape Connectivity in Mexico under Global Change. *Biodiversity Information Science and Standards*, 3, e38199. <https://doi.org/10.3897/biss.3.38199>
- Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R., O'Neill, G. A., Lopez-Toledo, L. y Sáenz-Romero, C. (2021). *Pinus pseudostrubus* Assisted

- Migration Trial with Rain Exclusion: Maintaining Monarch Butterfly Biosphere Reserve Forest Cover in an Environment Affected by Climate Change. *New Forests*, 52(6), 995-1010. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09838-1>
- Grinnell, J. (1917). The Niche-Relationships of the California Thrasher. *The Auk*, 34(4), 427-433. <https://doi.org/10.2307/4072271>
- Hampe, A. y Petit, R. J. (2005). Conserving Biodiversity Under Climate Change: the Rear Edge Matters. *Ecology Letters*, 8(5), 461-467. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00739.x>
- Hannah, L. (2008). Protected Areas and Climate Change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), 201-212. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.009>
- Hannah, L. (2015a). A New Discipline: Climate Change Biology. En L. Hannah (ed.), *Climate Change Biology* (pp. 3-11). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00001-9>
- Hannah, L. (2015b). Species Range Shifts. En L. Hannah (ed.), *Climate Change Biology* (pp. 57-81). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00003-2>
- Hannah, L. (2015c). Phenology: Changes in Timing of Biological Events Due to Climate Change. En L. Hannah (ed.), *Climate Change Biology* (pp. 83-102). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00004-4>
- Hannah, L., Flint, L., Syphard, A. D., Moritz, M. A., Buckley, L. B. y McCullough, I. M. (2014). Fine-Grain Modeling of Species' Response to Climate Change: Holdouts, Stepping-Stones, and Microrefugia. *Trends in Ecology and Evolution*, 29(7), 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.006>
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Marquet, P. A., Enquist, B. J., Midgley, G., Foden, W., Lovett, J. C., Corlett, R. T., Corcoran, D., Butchart, S. H. M., Boyle, B., Feng, X., Maitner, B., Fajardo, J., McGill, B. J., Merow, C., Morueta-Holme, N., Newman, E. A., Park, D. S., ... Svenning, J.-C. (2020). 30% land Conservation and Climate Action Reduces Tropical Extinction Risk by More Than 50%. *Ecography*, 43(7), 943-953. <https://doi.org/10.1111/ecog.05166>

- Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P. L., Carrillo-Guererro, Y. K. y Glenn, E. P. (2013). Effects of Drought on Birds and Riparian Vegetation in the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering*, 51, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.082>
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427. <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2016). *Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (Capa Union)* [mapa]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) e Instituto Nacional de Ecología (INE). (2008). *Ecorregiones Terrestres de México* [mapa]. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/ecorregionesmx.html>
- Inouye, D. W. (2022). Climate Change and Phenology. *WIREs Climate Change*, 13(3), e764. <https://doi.org/10.1002/wcc.764>
- Jiménez-García, D., Li, X., Lira-Noriega, A. y Peterson, A. T. (2021). Upward Shifts in Elevational Limits of Forest and Grassland for Mexican Volcanoes Over Three Decades. *Biotropica*, 53(3), 798-807. <https://doi.org/10.1111/btp.12942>
- Jiménez-Quiroz, M. del C., Cervantes-Duarte, R., Funes-Rodríguez, R., Barón-Campis, S. A., García-Romero, F. de J., Hernández-Trujillo, S., Hernández-Becerril, D. U., González-Armas, R., Martell-Dubois, R., Cerdeira-Estrada, S., Fernández-Méndez, J. I., González-Ania, L. V., Vásquez-Ortiz, M. y Barrón-Barraza, F. J. (2019). Impact of “The Blob” and “El Niño” in the SW Baja California Peninsula: Plankton and Environmental Variability of Bahía Magdalena. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00025>
- Koleff, P., Urquiza-Haas, T., Ruiz-González, S. P., Hernández-Robles, D. R., Mastretta-Yanes, A., Quintero, E. y Sarukhán, J. (2018). Biodiversity in

- Mexico: State of Knowledge. En T. Pullaiah (ed.). *Global Biodiversity*. Apple Academic Press.
- Kozak, E. R., Olivos-Ortiz, A., Franco-Gordo, C., Pelayo-Martínez, G., Kozak, E. R., Olivos-Ortiz, A., Franco-Gordo, C. y Pelayo-Martínez, G. (2018). Seasonal Variability of copepod Community Structure and Abundance Modified by the El Niño-La Niña Transition (2010), Pacific, Mexico. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1449-1468. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32058>
- Lara-Reséndiz, R. A., Gadsden, H., Rosen, P. C., Sinervo, B. y Méndez-De la Cruz, F. R. (2015). Thermoregulation of Two Sympatric Species of Horned Lizards in the Chihuahuan Desert and Their Local Extinction Risk. *Journal of Thermal Biology*, 48, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.11.010>
- Lara-Reséndiz, R. A., Galina-Tessaro, P., Pérez-Delgadillo, A. G., Valdez-Villavicencio, J. H. y Méndez-de La Cruz, F. R. (2019). Efectos del cambio climático en una especie de lagartija termófila de amplia distribución (*Dipsosaurus dorsalis*): Un enfoque ecofisiológico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(1). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2888>
- Lenoir, J., Bertrand, R., Comte, L., Bourgeaud, L., Hattab, T., Muriénne, J. y Grenouillet, G. (2020). Species Better Track Climate Warming in the Oceans Than on Land. *Nature Ecology and Evolution*, 4(8), 1044-1059. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2>
- Lenoir, J. y Svenning, J.-C. (2015). Climate-Related Range Shifts - a Global Multidimensional Synthesis and New Research Directions. *Ecography*, 38(1), 15-28. <https://doi.org/10.1111/ecog.00967>
- Llorente-Bousquets, J. y Ocegueda, S. (2008). Estado del conocimiento de la biota. En J. Saukhán (coord.), *Capital natural de México vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 283-322). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J. P., Hector, A., Hooper, D. U., Huston, M. A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D. y Wardle, D. A. (2001). Biodiversity and Ecosystem Functioning: Current

- Knowledge and Future Challenges. *Science*, 294(5543), 804-808. <https://doi.org/10.1126/science.1064088>
- Lovelock, C. E., Adame, M. F., Bennion, V., Hayes, M., O'Mara, J., Reef, R. y Santini, N. S. (2014). Contemporary Rates of Carbon Sequestration Through Vertical Accretion of Sediments in Mangrove Forests and Saltmarshes of South East Queensland, Australia. *Estuaries and Coasts*, 37(3), 763-771. <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9702-4>
- Loya-Rebollar, E., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Lobit, P., Villegas-Moreno, J. A. y Sánchez-Vargas, N. M. (2013). Clinal Variation in *Pinus Hartwegii* Populations and Its Application for Adaptation to Climate Change. *Silvae Genetica*, 62(1-6), 86-95. <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Macarthur, R. y Levins, R. (1967). The Limiting Similarity, Convergence, and Divergence of Coexisting Species. *The American Naturalist*, 101(921), 377-385.
- Machado-Stredel, F., Freeman, B., Jiménez-García, D., Cobos, M. E., Núñez-Penichet, C., Jiménez, L., Komp, E., Perktas, U., Khalighifar, A., Ingenloff, K., Tapondjou, W., de Silva, T., Fernando, S., Osorio-Olvera, L. y Peterson, A. T. (2022). On the Potential of Documenting Decadal-Scale Avifaunal Change from Before-and-After Comparisons of Museum and Observational Data Across North America. *Avian Research*, 13, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.avrs.2022.100005>
- Martínez-Meyer, E., González-Bernal, A., Velasco, J. A., Swetnam, T. L., González-Saucedo, Z. Y., Servín, J., López-González, C. A., Oakleaf, J. K., Liley, S. y Heffelfinger, J. R. (2021). Rangewide Habitat Suitability Analysis for the Mexican Wolf (*Canis lupus baileyi*) to Identify Recovery Areas in Its Historical Distribution. *Diversity and Distributions*, 27(4), 642-654. <https://doi.org/10.1111/ddi.13222>
- Martínez-Morales, M. A. (2007). Avifauna del bosque mesófilo de montaña del noroeste de Hidalgo, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 78(1), 149-162.
- Martins, P. M., Anderson, M. J., Sweatman, W. L. y Punnett, A. J. (2024). Significant Shifts in Latitudinal Optima of North American Birds.

- Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(15), e2307525121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2307525121>
- Meave del Castillo, M. E. y Zamudio-Reséndiz, M. E. (2018). Florecimientos de microalgas planctónicas de 2000 al 2015 en la Bahía de Acapulco, Guerrero, México. *Acta Botánica Mexicana*, 125. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1316>
- Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Sáenz-Romero, C., Hernández-Díaz, J. C., López-Sánchez, C. A., Vargas-Hernández, J. J., Prieto-Ruíz, J. Á. y Wehenkel, C. (2022). Assisted Migration and the Rare Endemic Plant Species: The Case of Two Endangered Mexican Spruces. *PeerJ*, 10, e13812. <https://doi.org/10.7717/peerj.13812>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., Leduc, S. y Patrizio, P. (2018). Identifying Effects of Land Use Cover Changes and Climate Change on Terrestrial Ecosystems and Carbon Stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, 53, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Galicia, L. y Kraxner, F. (2019). Identifying Hotspots of Land Use Cover Change Under Socioeconomic and Climate Change Scenarios in Mexico. *Ambio*, 48(4), 336-349. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1085-0>
- Mendoza-Ponce, A. y Galicia, L. (2010). Aboveground and Belowground Biomass and Carbon Pools in Highland Temperate Forest Landscape in Central Mexico. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83(5), 497-506. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq032>
- Meynecke, J.-O., de Bie, J., Barraqueta, J.-L. M., Seyboth, E., Dey, S. P., Lee, S. B., Samanta, S., Vichi, M., Findlay, K., Roychoudhury, A. y Mackey, B. (2021). The Role of Environmental Drivers in Humpback Whale Distribution, Movement and Behavior: A Review. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.720774>
- Micheli, F., Saenz-Arroyo, A., Greenley, A., Vazquez, L., Espinoza Montes, J. A., Rossetto, M. y De Leo, G. A. (2012). Evidence That Marine Reserves

- Enhance Resilience to Climatic Impacts. *PLOS ONE*, 7(7), e40832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040832>
- Mittermeier, R. A., Turner, W. R., Larsen, F. W., Brooks, T. M. y Gascon, C. (2011). Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. En F. E. Zachos y J. C. Habel (eds.). *Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas* (pp. 3-22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5_1
- Montalvo, V. H., Sáenz-Bolaños, C., Cruz, J. C. y Carrillo, J., E. (2019). Amenazas y efectos potenciales del cambio climático en poblaciones silvestres de venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*): Revisión de su estado de conocimiento. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 113-124. <https://doi.org/10.15359/rca.53-1.6>
- Morrone, J. J., Escalante, T. y Rodríguez-Tapia, G. (2017). Mexican Biogeographic Provinces: Map and Shapefiles. *Zootaxa*, 4277(2). <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4277.2.8>
- Murguía-Romero, M., Ortiz, E., Serrano-Estrada, B. y Villaseñor, J. L. (2023). The Kew's "World Checklist of Vascular Plants" and its relevance to the knowledge of the flora of Mexico. *Botanical Sciences*, 101(2), 632-653. <https://doi.org/10.17129/botsci.3223>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B. y Kent, J. (2000). Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nicotra, A. B., Beever, E. A., Robertson, A. L., Hofmann, G. E. y O'Leary, J. (2015). Assessing the Components of Adaptive Capacity to Improve Conservation and Management Efforts Under Global Change. *Conservation Biology*, 29(5), 1268-1278. <https://doi.org/10.1111/cobi.12522>
- Odling-Smee, F. J., Laland, K. N. y Feldman, M. W. (1996). Niche Construction. *The American Naturalist*, 147(4), 641-648. <https://doi.org/10.1086/285870>
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E. M., Butchart, S. H. M., Kovacs, K. M., Scheffers, B. R., Hole, D. G., Martin, T. G., Akçakaya, H. R., Corlett, R. T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J. A., Hoffmann, A. A., Midgley, G. F.,

- Pearce-Kelly, P., Pearson, R. G., Williams, S. E. ... y Rondinini, C. (2015). Assessing Species Vulnerability to Climate Change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215-224. <https://doi.org/10.1038/nclimate2448>
- Parmesan, C. (2007). Influences of Species, Latitudes and Methodologies on Estimates of Phenological Response to Global Warming. *Global Change Biology*, 13(9), 1860-1872. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x>
- Parmesan, C. y Yohe, G. (2003). A Globally Coherent Fingerprint of Climate Change Impacts Across Natural Systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Peterson, A. T., Navarro-Sigüenza, A. G. y Martínez-Meyer, E. (2016). Digital Accessible Knowledge and Well-Inventoried Sites for Birds in Mexico: Baseline Sites for Measuring Faunistic Change. *PeerJ*, 4, e2362. <https://doi.org/10.7717/peerj.2362>
- Peterson, A. T., Navarro-Sigüenza, A. G., Martínez-Meyer, E., Cuervo-Robayo, A. P., Berlanga, H. y Soberón, J. (2015). Twentieth Century Turnover of Mexican Endemic Avifaunas: Landscape Change Versus Climate Drivers. *Science Advances*, 1(4), e1400071. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400071>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araújo, M. B. (2011). *Ecological Niches and Geographic Distributions* (MPB-49). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400840670>
- Pongsiri, M. J., Roman, J., Ezenwa, V. O., Goldberg, T. L., Koren, H. S., Newbold, S. C., Ostfeld, R. S., Pattanayak, S. K. y Salkeld, D. J. (2009). Biodiversity Loss Affects Global Disease Ecology. *BioScience*, 59(11), 945-954. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.6>
- Pörtner, H.-O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W. L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., ... y Ngo, H. (2021). *Scientific Outcome of the IPBES-IPCC co-Sponsored Workshop on Biodiversity and Climate Change*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5101125>

- Prieto-Torres, D. A., Núñez Rosas, L. E., Remolina Figueroa, D. y Arizmendi, M. del C. (2021). Most Mexican Hummingbirds Lose Under Climate and Land-Use Change: Long-Term Conservation Implications. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(4), 487-499. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.07.001>
- Ramírez-Bautista, A., Thorne, J. H., Schwartz, M. W. y Williams, J. N. (2020). Trait-Based Climate Vulnerability of Native Rodents in Southwestern Mexico. *Ecology and Evolution*, 10(12), 5864-5876. <https://doi.org/10.1002/ece3.6323>
- Ramírez-Fráncel, L. A., García-Herrera, L. V., Losada-Prado, S., Reinoso-Flórez, G., Sánchez-Hernández, A., Estrada-Villegas, S., Lim, B. K. y Guevara, G. (2022). Bats and their Vital Ecosystem Services: A Global Review. *Integrative Zoology*, 17(1), 2-23. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12552>
- Reyes-Bonilla, H. (2003). Coral reefs of the Pacific coast of México. En J. Cortés (ed.), *Latin American Coral Reefs* (pp. 331-349). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50015-1>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U. ... y Foley, J. A. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rodríguez-Buriticá, S., Winkler, D. E., Webb, R. H. y Venable, D. L. (2019). Local Temporal Trajectories Explain Population-Level Responses to Climate Change in Saguaro (*Carnegiea gigantea*). *Ecosphere*, 10(8), e02844. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2844>
- Romo-Vázquez, E., León-Paniagua, L. y Sánchez, O. (2005). A New Species of *Habromys* (Rodentia: Neotominae) from Mexico. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 118(3), 605-618. [https://doi.org/10.2988/0006-324X\(2005\)118\[605:ANSOHR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2988/0006-324X(2005)118[605:ANSOHR]2.0.CO;2)
- Rosado-Calderón, A. T., Tamayo-Chim, M., de la Barrera, E., Ramírez-Morillo, I. M., Andrade, J. L., Briones, O. y Reyes-García, C. (2020). High Resilience to Extreme Climatic Changes in the CAM Epiphyte *Tillandsia utriculata*

- L. (Bromeliaceae). *Physiologia Plantarum*, 168(3), 547-562. <https://doi.org/10.1111/ppl.12805>
- Rubenstein, M. A., Weiskopf, S. R., Bertrand, R., Carter, S. L., Comte, L., Eaton, M. J., Johnson, C. G., Lenoir, J., Lynch, A. J., Miller, B. W., Morelli, T. L., Rodriguez, M. A., Terando, A. y Thompson, L. M. (2023). Climate Change and the Global Redistribution of Biodiversity: Substantial Variation in Empirical Support for Expected Range Shifts. *Environmental Evidence*, 12(7). <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0>
- Rugh, D. J., Shelden, K. E. W. y Schulman-Janiger, A. (2001). Timing of the gray Whale Southbound Migration. *Journal of Cetacean Research and Management*, 3(1). <https://doi.org/10.47536/jcrm.v3i1.897>
- Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., Lindig-Cisneros, R., López-Upton, J., Trejo-Ramírez, O., Wehenkel, C., Cibrián-Tovar, D., Flores-López, C., Plascencia-González, A. y Vargas-Hernández, J. J. (2020). Recent Evidence of Mexican Temperate Forest Decline and the Need For *Ex situ* Conservation, Assisted Migration, and Translocation of Species Ensembles as Adaptive Management to Face Projected Climatic Change Impacts in a Megadiverse Country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843-854. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0329>
- Sage, R. F. (2020). Global Change Biology: A Primer. *Global Change Biology*, 26(1), 3-30. <https://doi.org/10.1111/gcb.14893>
- Sala, E., Mayorga, J., Bradley, D., Cabral, R. B., Atwood, T. B., Auber, A., Cheung, W., Costello, C., Ferretti, F., Friedlander, A. M., Gaines, S. D., Garilao, C., Goodell, W., Halpern, B. S., Hinson, A., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., Leprieur, F., McGowan, J. ... y Lubchenco, J. (2021). Protecting the Global Ocean for Biodiversity, Food and Climate. *Nature*, 592(7854), 397-402. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03371-z>
- Santini, N. S., Adame, M. F., Nolan, R. H., Miquelajauregui, Y., Piñero, D., Mastretta-Yanes, A., Cuervo-Robayo, Á. P. y Eamus, D. (2019). Storage of Organic Carbon in the Soils of Mexican Temperate Forests.

Forest Ecology and Management, 446, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>

- Santini, N. S., Villarruel-Arroyo, A., Adame, M. F., Lovelock, C. E., Nolan, R. H., Gálvez-Reyes, N., González, E. J., Olivares-Reséndiz, B., Mastretta-Yanes, A. y Piñero, D. (2020). Organic Carbon Stocks of Mexican Montane Habitats: Variation Among Vegetation Types and Land-Use. *Frontiers in Environmental Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.581476>
- Santos-Moreno, A., Aldape-López, C. T., Benítez-Díaz, C., Martínez-Coronel, M., Santos-Moreno, A., Aldape-López, C. T., Benítez-Díaz, C. y Martínez-Coronel, M. (2016). Ampliación del límite superior de distribución altitudinal de tres especies de mamíferos en Oaxaca, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 87(1), 267-269. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.09.017>
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., de la Maza, J., Pisanty, I., Urquiza-Haas, T., Ruiz González, S. y García, G. (2017). *Capital natural de México. Síntesis: Evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/14039.pdf>
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E. H., Rietkerk, M. y Sugihara, G. (2009). Early-Warning Signals for Critical Transitions. *Nature*, 461(7260), 53-59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C. L., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D. y Watson, J. E. M. (2016). The Broad Footprint of Climate Change from Genes to Biomes to People. *Science*, 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>

- Schloss, C. A., Núñez, T. A. y Lawler, J. J. (2012). Dispersal Will Limit Ability of Mammals to Track Climate Change in the Western Hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(22), 8606-8611. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116791109>
- Shugart, H. H. (1998). *Terrestrial Ecosystems in Changing Environments*. Cambridge University Press.
- Sinervo, B., Méndez-de-la-Cruz, F., Miles, D. B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., Lara-Reséndiz, R., Martínez-Méndez, N., Calderón-Espinosa, M. L., Meza-Lázaro, R. N., Gadsden, H., Avila, L. J., Morando, M., De la Riva, I. J., Sepulveda, P. V., Rocha, C. F. D., Ibargüengoytia, N., Puntriano, C. A., Massot, M., ... y Sites, J. W. (2010). Erosion of Lizard Diversity by Climate Change and Altered Thermal Niches. *Science*, 328(5980), 894-899. <https://doi.org/10.1126/science.1184695>
- Soares-Filho, B. S., Coutinho Cerqueira, G. y Lopes Pennachin, C. (2002). Dinamica—A Stochastic Cellular Automata Model Designed to Simulate the Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *Ecological Modelling*, 154(3), 217-235. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00059-5)
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian Niches and Geographic Distributions of Species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115-1123. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- Sullivan, B., Bowker, R., Malmos, K. y Gergus, E. (1996). Arizona Distribution of Three Sonoran Desert Anurans: *Bufo retiformis*, *Gastrophryne olivacea*, and *Pteronohyla fodiens*. *Great Basin Naturalist*, 56(1). <https://scholarsarchive.byu.edu/gbn/vol56/iss1/5>
- Tittensor, D. P., Mora, C., Jetz, W., Lotze, H. K., Ricard, D., Berghe, E. V. y Worm, B. (2010). Global Patterns and Predictors of Marine Biodiversity Across Taxa. *Nature*, 466(7310), 1098-1101. <https://doi.org/10.1038/nature09329>
- Tobón, W., Urquiza-Haas, T., Koleff, P., Schröter, M., Ortega-Álvarez, R., Campo, J., Lindig-Cisneros, R., Sarukhán, J. y Bonn, A. (2017). Restoration Planning

- to Guide Aichi Targets in a Megadiverse Country. *Conservation Biology*, 31(5), 1086-1097. <https://doi.org/10.1111/cobi.12918>
- Tomuolo, S. y Ward, D. (2018). Species Migrations and Range Shifts: A Synthesis of Causes and Consequences. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 33, 62-77. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2018.06.001>
- Trejo Vázquez, I. (1999). El clima de la selva baja caducifolia en México. *Investigaciones Geográficas*, 1(39). <https://doi.org/10.14350/rig.59082>
- Ureta, C., Ramírez-Barrón, M., Sánchez-García, E. A., Cuervo-Robayo, A. P., Munguía-Carrara, M., Mendoza-Ponce, A., Gay, C. y Sánchez-Cordero, V. (2022). Species, Taxonomic, and Functional Group Diversities of Terrestrial Mammals at Risk Under Climate Change and Land-Use/Cover Change Scenarios in Mexico. *Global Change Biology*, 28(23), 6992-7008. <https://doi.org/10.1111/gcb.16411>
- Valencia, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Botanical Sciences*, 75. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1692>
- van der Putten, W. H., Macel, M. y Visser, M. E. (2010). Predicting Species Distribution and Abundance Responses to Climate Change: Why it is Essential to Include Biotic Interactions Across Trophic Levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2025-2034. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0037>
- van Weelden, C., Towers, J. R. y Bosker, T. (2021). Impacts of Climate Change on Cetacean Distribution, Habitat and Migration. *Climate Change Ecology*, 1, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100009>
- Vargas-Castro, Kolb, M. y Cuervo-Robayo, A. P. (2022). *Base de datos bibliográfica de literatura científica sobre los efectos del cambio climático en la biodiversidad de México*. Conabio.
- Velo-Antón, G., Parra, J. L., Parra-Olea, G. y Zamudio, K. R. (2013). Tracking Climate Change in a Dispersal-Limited Species: Reduced Spatial and Genetic Connectivity in a Montane Salamander. *Molecular Ecology*, 22(12), 3261-3278. <https://doi.org/10.1111/mec.12310>

- Villaseñor, J. L. (2004). The Genera of Vascular Plants Flora of Mexico. *Botanical Sciences*, 75. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1694>
- Villers Ruiz, L., García del Valle, L. y López Blanco, J. (1998). Evaluación de los bosques templados en México: Una aplicación en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Investigaciones geográficas*, (36), 7-19.
- Whittaker, R. H., Levin, S. A. y Root, R. B. (1973). Niche, Habitat, and Ecotope. *The American Naturalist*, 107(955), 321-338. <https://www.jstor.org/stable/2459534>
- Williams, S. E., Shoo, L. P., Isaac, J. L., Hoffmann, A. A. y Langham, G. (2008). Towards an Integrated Framework for Assessing the Vulnerability of Species to Climate Change. *PLOS Biology*, 6(12), e325. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060325>
- World Database on Protected Areas (WDPA) (2024). *Protected Planet*. <https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa>
- Xu, X., Huang, A., Belle, E., De Frenne, P. y Jia, G. (2022). Protected Areas Provide Thermal Buffer Against Climate Change. *Science Advances*, 8(44), eabo0119. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo0119>
- Zylstra, E. R., Ries, L., Neupane, N., Saunders, S. P., Ramírez, M. I., Rendón-Salinas, E., Oberhauser, K. S., Farr, M. T. y Zipkin, E. F. (2021). Changes in Climate Drive Recent Monarch Butterfly Dynamics. *Nature Ecology and Evolution*, 5(10), 1441-1452. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01504-1>

Conclusiones generales

El cambio climático actual es diferente a los ocurridos a lo largo de la historia por dos razones principales: 1) es de origen antropogénico, y 2) el ritmo al que se está produciendo no tiene precedentes. Es decir, el cambio se está dando de manera extremadamente acelerada, lo cual tiene graves repercusiones en la seguridad alimentaria, la salud de la población y la conservación de la biodiversidad, tanto a nivel global como en México.

Los cambios en el clima del planeta se producen por alteraciones en el balance energético, es decir, por la cantidad del tipo de energía que entra y sale del planeta. La energía entrante proviene del Sol y está relacionada con la posición del planeta con respecto a él, por lo que puede experimentar ligeras variaciones. La energía saliente está relacionada con el albedo (la cantidad de energía que se refleja al espacio desde el planeta) y la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (la cantidad de energía que es retenida). En la actualidad, lo que el ser humano está modificando a través de la quema de combustible fósil, la deforestación y el aumento del ganado es la concentración de los gases con efecto invernadero en la atmósfera. Este aumento ha provocado un calentamiento global mucho más acelerado en comparación con los cambios climáticos que se han dado en tiempos geológicos.

A mediados del siglo IX, la comunidad científica empezó a reconocer que el planeta había experimentado varias eras glaciales, lo que llevó a cuestionar cómo se regulaba el clima del planeta. Desde entonces, se comprendió que el ser humano influía en el sistema climático, pero esta

idea fue difícil de aceptar, tanto dentro como fuera de la comunidad científica. No fue sino hasta finales del siglo xx cuando la evidencia científica se volvió sólida y contundente: el ser humano había modificado el sistema climático y continúa haciéndolo. Esta evidencia impulsó la creación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Desde entonces, los informes generados por este grupo de científicas y científicos han ilustrado al mundo sobre la situación climática y han servido como base científica para los tratados internacionales sobre el tema. A través de este panel también se han formalizado conceptos para el desarrollo de una ciencia del clima que va más allá de la física de la atmósfera.

El IPCC ha resumido en diferentes reportes la información generada por las y los científicos del clima, donde se destaca el aumento de la variabilidad climática debido al cambio climático que está teniendo y seguirá teniendo impactos en los sistemas de producción de alimentos, en la salud y en la biodiversidad a diferentes niveles. Mantener información actualizada sobre estos impactos nos permite identificar sistemas y grupos de personas con mayor riesgo. Sin embargo, en años recientes la ciencia del cambio climático ha comenzado a enfocarse en la adaptación y mitigación, buscando no sólo identificar a los grupos más vulnerables, sino también promover medidas y estrategias que faciliten la respuesta a estos riesgos y disminuyan los impactos.

En cuanto a la seguridad alimentaria, se sabe que los sistemas de producción se han visto afectados por el aumento de la variabilidad climática, especialmente por la sequía. La agricultura, que es el sistema de producción que más alimenta a la humanidad, tiene una relación directa con el clima. La sequía ha resultado ser un problema grave, y el aumento de la variabilidad climática genera incertidumbre entre los productores. Algunas medidas de adaptación comunes incluyen el uso de variedades resistentes a condiciones adversas y el cambio en las fechas de siembra. En el caso de la ganadería, se ha promovido la movilización del ganado a nuevas áreas y la selección de variedades con características

morfológicas que les permitan resistir mejor el calor (como el pelaje claro). En la pesca se ha intentado diversificar las especies capturadas y desplazarse a distintas localidades. Sin embargo, existe muy poca información sobre estos dos últimos sistemas de producción de alimento, especialmente en México. Es necesario articular esfuerzos a nivel nacional para identificar medidas y estrategias de adaptación y mitigación eficientes que puedan ser implementadas en campo. La información no está llegando a los productores y, cuando lo hace, a menudo carece del acompañamiento técnico necesario para su implementación exitosa. Como humanidad, estamos lejos de alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible de Hambre Cero para 2030, y si no se actúa en un contexto de cambio climático, nos alejaremos aún más. La seguridad alimentaria no es sólo cuestión de producir suficiente alimento, sino de garantizar que llegue a quienes lo necesitan. En México, la mayoría de los productores de alimentos son pequeños agricultores, cuyas necesidades son muy diferentes a las de los grandes productores. Su manera de lidiar con la variabilidad climática incluye a menudo estrategias milenarias. La comunidad científica y las personas tomadoras de decisiones deberían reconocer que, en ocasiones, mirar al pasado nos permite lidiar mejor con el futuro.

En cuanto a la salud, el cambio climático, la explotación de los sistemas naturales, la urbanización, la migración humana y la industrialización están causando una degradación ambiental sin precedentes. Como consecuencia, el mundo está experimentando un aumento en las enfermedades emergentes como resultado de estos cambios antropogénicos de la biosfera. Un claro ejemplo es el impacto social y económico de la pandemia de covid-19 en todo el mundo. En este sentido, es prioritario evaluar cómo el cambio climático, en combinación con otros factores de degradación ambiental, puede influir en los brotes epidémicos de enfermedades infecciosas. Una de las consecuencias importantes del cambio climático será la modificación de los patrones de transmisión de las enfermedades infecciosas. Es necesario comprender mejor las complejas relaciones

causales y emplear esta información para predecir repercusiones en la salud pública. Ante las grandes lagunas de información sobre cambio climático, México necesita impulsar agendas de investigación sobre los impactos potenciales en la salud pública.

En cuestión de biodiversidad, el uso conjunto de imágenes satelitales, los datos de colecciones científicas y la participación activa de la ciencia ciudadana se consideran fundamentales para comprender y abordar los desafíos del cambio climático en la biodiversidad. Estas metodologías permiten monitorear los cambios en la distribución de especies y los patrones de biodiversidad a diferentes escalas, desde lo global hasta lo local, proporcionando así información vital para orientar las decisiones de conservación. Es importante destacar que estas herramientas tienen el potencial de ser aplicadas en contextos donde aún no se han evaluado adecuadamente las respuestas de la biodiversidad al cambio climático. Al ampliar el uso de estas metodologías a áreas y grupos taxonómicos menos estudiados, se pueden anticipar los efectos del cambio climático en la biodiversidad.

Semblanzas

CAROLINA URETA

Bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde se graduó con mención honorífica y recibió la medalla Gabino Barreda. Realizó una maestría en Tecnología Ambiental en el Imperial College de Londres, fue becada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), y obtuvo doctorado en Ciencias Biológicas en el Instituto de Biología de la UNAM en 2014. Su tesis doctoral fue galardonada con el primer lugar en el concurso Tesis Puma en Desarrollo Sustentable 2015. Posteriormente, completó dos estancias posdoctorales en la UNAM, y fue becada por la DGPA. Desde hace seis años, es Investigadora por México Conahcyt en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (UNAM), como parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) nivel I. Ha publicado varios artículos en revistas indexadas y de divulgación científica. Además, ha dirigido tesis de licenciatura y maestría, y actualmente supervisa a un tesista de doctorado. Es tutora acreditada en los posgrados de Ciencias de la Tierra, Ciencias Biológicas y Ciencias de la Sostenibilidad, y ha impartido diversas clases a nivel licenciatura y posgrado. Actualmente, es titular del seminario “Ecología geográfica en un mundo cambiante” en la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra. También es parte del grupo coordinador del Laboratorio Nacional Conahcyt de la Biología del Cambio Climático. Su investigación se centra en el cambio climático, la biodiversidad y agrobiodiversidad.

CONSTANTINO GONZÁLEZ SALAZAR

Es investigador asociado “C” de tiempo completo en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Doctor en Ciencias por la misma universidad. Miembro del SNII nivel I. Sus investigaciones se enfocan en el impacto del cambio global en la salud humana, animal y ecosistémica desde la perspectiva de Una Salud. Ha contribuido al conocimiento de la ecología y epidemiología de enfermedades transmitidas por vectores, con publicaciones sobre enfermedades víricas transmitidas por mosquitos, enfermedades parasitarias como Chagas y Leishmaniasis, y enfermedades bacterianas como Lyme y Rickettsiosis. En su trabajo, ha evaluado la contribución de factores ambientales, biológicos y sociodemográficos en la presencia de los agentes causales de dichas enfermedades. Ha desarrollado el proyecto “Atlas de enfermedades infecciosas en México”, que tiene como objetivo generar el primer repositorio geográfico y temporal de los agentes causales (patógenos, vectores, hospederos) de enfermedades infecciosas en el país.

ÁNGELA PATRICIA CUERVO ROBAYO

Bióloga con amplia experiencia académica y profesional en conservación de la biodiversidad y cambio climático. Obtuvo su licenciatura en Biología en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Bogotá, Colombia. Posteriormente, realizó una maestría en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma de Baja California y un doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales en la Universidad Autónoma del Estado de México. Por más de siete años fue parte de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, donde contribuyó significativamente en la investigación sobre conservación de la biodiversidad y cambio climático. Durante los dos primeros años, realizó un posdoctorado, y luego se dedicó a la investigación aplicada en estas áreas críticas. También ha trabajado como consultora en temas ambientales para el Programa de las Naciones Unidas. Actualmente, es

profesora en la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM, e investigadora posdoctoral en el Instituto de Biología por la misma casa de estudios. Forma parte del SNI nivel I y es editora de las revistas *Biodiversity Informatics* y *Perspectives in Ecology and Conservation*. Además, es fundadora del Laboratorio Nacional Conahcyt sobre Biología del Cambio Climático. A lo largo de su carrera, ha generado información clave para la toma de decisiones y la definición de prioridades de conservación para la biodiversidad y la restauración de especies y ecosistemas.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Laboratorio Nacional Conahcyt de la Biología del Cambio Climático por impulsar la investigación en dicha área. También queremos agradecer a Mónica Toledo García por el apoyo brindado en la recopilación de la información, a Marco Guarneros y a todo el equipo de edición de Conahcyt.

Índice de figuras, ilustraciones y tablas

FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 1. Determinantes sociales de la salud	124
Figura 2. Mapa de la distribución actual de casos de peste bubónica	130
Figura 3. Ilustración de la epidemia de viruela en la población azteca en el siglo XVI (Tenochtitlan, 1520)	132
Figura 4. Curva epidémica con un escenario sin intervención y otro con intervención, mostrando cómo se modifica el comportamiento de una epidemia	145
Figura 5. Canal endémico para los casos de dengue de 2010 a 2019	146
Figura 6. Distribución de localidades geográficas de casos de dengue en México	147
Figura 7. Tendencia en eventos en salud por zoonosis (gráfica superior). Eventos en salud derivados de diferentes factores sociales y ambientales (gráfica inferior)	150
Figura 8. Ejemplo de dos ciclos de transmisión de un agente infeccioso	156
Figura 9. Esquema de los efectos del cambio climático sobre patógenos, vectores y hospederos, así como las posibles respuestas en la incidencia de enfermedades	157

CAPÍTULO 4

Figura 10. Los 17 países megadiversos	194
Figura 11. Regiones biogeográficas de México y rangos de humedad	195
Figura 12. Distribución de las ecorregiones terrestres de México	196
Figura 13. Distribución de las ecorregiones marinas dentro de la zona económica exclusiva de México	200
Figura 14. Los cinco países megadiversos	204
Figura 15. Comparación de vistas idénticas de la sierra Negra de Puebla entre 1984 (arriba) y 2018 (abajo)	217
Figura 16. Cambio en el uso de la tierra bajo escenarios de cambio socioeconómico y de cambio climático en México	227
Figura 17. Resultados de un modelo de distribución potencial bajo escenarios climáticos al 2030 y 2050	228

ILUSTRACIONES

CAPÍTULO 1

Ilustración 1. Balance energético del planeta	13
Ilustración 2. El aumento de la temperatura trajo consigo agua y vida	14
Ilustración 3. Eras geológicas	15
Ilustración 4. La topografía como evidencia de que hubo hielo	21
Ilustración 5. Monitoreo del dióxido de carbono	27
Ilustración 6. Componentes del sistema climático	37
Ilustración 7. Aumento de temperatura simulado por tres diferentes escenarios (SSP)	47
Ilustración 8. Disciplinas que participan en el estudio del cambio climático	49

CAPÍTULO 2

Ilustración 9. Factores que influyen en la seguridad alimentaria	77
Ilustración 10. Los servicios ecosistémicos son fundamentales para la seguridad alimentaria	82
Ilustración 11. Hongos comestibles silvestres que son un subsidio proteico de la naturaleza	83

CAPÍTULO 4

Ilustración 12. La biodiversidad	209
----------------------------------	-----

TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1. Combinaciones plausibles de los escenarios SSP y RCP	46
---	----

CAPÍTULO 3

Tabla 2. Ejemplos de curvas epidémicas que muestran diferentes comportamientos en la velocidad de transmisión y duración de una enfermedad	144
Tabla 3. Determinantes de la salud que pueden contribuir a la emergencia y reemergencia de enfermedades transmisibles	148
Tabla 4. Ejemplo de enfermedades transmitidas por vectores presentes en México	153
Tabla 5. Ejemplos de factores climáticos que influyen en la transmisión y distribución de enfermedades transmitidas por vectores	160

CAPÍTULO 4

Tabla 6. Especies de hongos, plantas y animales en México y el mundo	203
Tabla 7. Porcentaje de pérdida y deterioro de los ecosistemas terrestres de México	206
Tabla 8. Calendario migratorio de las ballenas grises durante su migración hacia el sur	224

Índice general

Introducción	7
1. Historia, antecedentes y conceptos	11
Los cambios climáticos a lo largo de la historia del planeta	11
La historia de la ciencia del cambio climático	20
Los conceptos de la ciencia del cambio climático antropogénico	29
Los escenarios de cambio climático	32
La ciencia del cambio climático en México	47
Referencias	62
2. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático	
en la seguridad alimentaria de México	73
Producir suficiente no es suficiente para acabar con el hambre	73
La seguridad alimentaria en México	78
No es sólo cuestión de producir, sino también de conservar	80
Impactos del cambio climático sobre sistemas de producción: la agricultura	83
Impactos del cambio climático sobre sistemas de producción: ganadería	87
Impactos del cambio climático sobre sistemas de producción: la pesca	90
El clima está cambiando. ¿Qué hacemos para no poner en mayor riesgo la seguridad alimentaria?	94
Estudios de caso sobre la adaptación al cambio climático en sistemas de producción de alimento en México	100

Conclusiones	104
Referencias	106
3. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático en la salud pública en México	121
La salud humana	121
Clima y salud	125
Cambio climático y enfermedades infecciosas	127
Nuevos enfoques en estudios de enfermedades transmisibles	172
Conclusiones	174
Referencias	176
4. Impactos, adaptación y mitigación del cambio climático en la biodiversidad de México	193
La biodiversidad de México	193
Las ecorregiones terrestres y marinas de México	195
La biodiversidad de México en cifras	202
Amenazas a la biodiversidad	205
Respuesta de las especies al cambio climático	210
Adaptación de la biodiversidad al cambio climático	230
El papel de la biodiversidad en la mitigación	236
Conclusiones	237
Referencias	238
Conclusiones generales	259
Semblanzas	263
Agradecimientos	267
Índice de figuras, ilustraciones y tablas	269

Se terminó de editar en diciembre de 2024
La edición estuvo al cuidado de la Dirección de Difusión Científica
del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.
Para su formación se utilizaron las familias
tipográficas GMX y Montserrat.

A diferencia de antiguos cambios climáticos experimentados en nuestro planeta, actualmente enfrentamos uno ocasionado por nuestra propia actividad humana y que repercute directamente en tres ejes fundamentales para el bienestar humano: la seguridad alimentaria, la salud y la conservación de la biodiversidad. Este libro constituye un estado del arte estructurado en cuatro capítulos que dan cuenta de explicaciones históricas, exposiciones teóricas y conceptuales, análisis de casos y prospectivas respecto del devenir planetario y de México en materia de cambio climático antropogénico.



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

