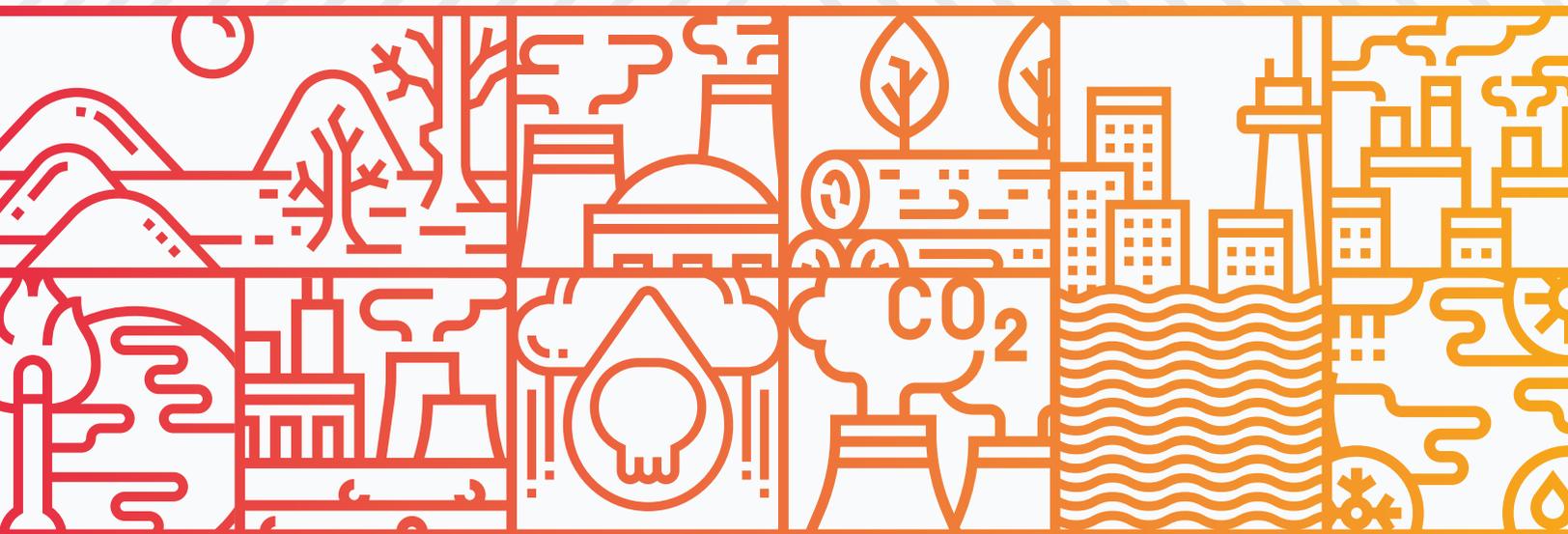




ESTADO Y PERSPECTIVAS

DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: UN PUNTO DE PARTIDA



PINCC
Programa de Investigación
en Cambio Climático



INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA
ATMÓSFERA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

ESTADO Y PERSPECTIVAS

DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: UN PUNTO DE PARTIDA





© Francisco Estrada Porrúa, Jorge Zavala Hidalgo,
Amparo Martínez Arroyo, Graciela Raga, Carlos Gay García.

© William H. Lee Alardín por el prólogo

Estado y perspectivas del cambio climático en México: un punto de partida

Primera edición: 2023

D.R. © 2023

Programa de Investigación en Cambio Climático
Edificio de Programas Universitarios
Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria
C.P. 04510, Ciudad de México.
<https://www.pincc.unam.mx>

Octubre de 2023

ISBN: 978-607-30-8172-6

Hecho en México • *Made in Mexico*

Coordinación editorial: Rubén Darío Martínez Ramírez
Cuidado de la edición: Gerardo Mendiola Patiño
Diseño de interiores y portada: Álvaro Edel Reynoso Castañeda

Coordinadores y autores de este resumen

Francisco Estrada Porrúa, Jorge Zavala Hidalgo, Amparo Martínez Arroyo, Graciela Raga, Carlos Gay García.

Autores de reportes

Altamirano del Carmen, M.A., Aguirre-Liguori, J.A., Aguirre-Peña, A., Alvarez-Filip, L., Becker, I., Burquez-Montijo, A., Calderón Bustamante, O., Carrasco González, F., Correa-Metrio, A., Castelán Hernández, C.I., Dominguez, O., Elizarrarás Rios, L.G., Escobedo-Galván, A.H., Estrada, F., Fernández-Eguiarte, A., Fernández-Castel, K.P.J., García García, M.A., García Peña, G., Garrido-Garduño, T., Gómez-Ramos, O., Gómez-Ruiz, P.A., González-Salazar, C., Gress Carrasco, F., Hurtado-Díaz, M., Islas Samperio, J.M., Jaramillo, V.J., Jiménez-García, D., Lara-Resendiz, R., López-Espinoza, E.D., Luna-Aranguré, C., Martínez Arroyo, M.A., Martínez-Meyer, E., Mazari Hiriart, M., Mendoza-González, G., Mendoza-Ponce, A., Mínero Cruz, V.O., Murguía-Flores, F., Murray Tortarolo, G.N., Nava-Bolaños, A., Ochoa-Ochoa, L., Ortiz Haro, G.A., Osorio-Tai, M.E., Perea, K., Prieto-Torres, D., Raga, G., Ramírez-Barahona, S., Rangel-Moreno, K., Riojas-Rodríguez, H., Sáenz-Romero, C., Salazar Frausto, J.L., Saldaña Rangel, I.E., Stephens, C.R., Torres, V., Vargas, R., Velasco, J.A., Zarza Alvarado, M.A., Zarza Villanueva, H., Zavala Hidalgo, J.

Instituciones y dependencias participantes

Biodiversity Institute, University of Kansas; Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara; División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM; Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora; Departamento de Ecología Tropical, Universidad Autónoma de Yucatán; Dirección General de Repositorios Universitarios, UNAM; Ecology and Evolutionary Biology, University of California; Facultad de Ciencias, UNAM; Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM; Facultad de Ingeniería, UNAM; Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM; Facultad de Medicina, UNAM; Instituto de Biología, UNAM; Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM; Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM; Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM; Instituto de Ecología, UNAM; Instituto de Energías Renovables, UNAM; Instituto de Geofísica, UNAM; Instituto de Geología, UNAM; Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad de Michoacán; Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM; Instituto Nacional de Salud Pública; Laboratorio de Biología Acuática, Universidad de Michoacán; Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM; Servicio Mareográfico Nacional, UNAM; Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán; Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

Prólogo	9
Introducción	11
Antecedentes	13
Cambio climático en México: observaciones y proyecciones	15
Cambios observados en el clima	15
Evolución de los eventos extremos durante el periodo observado.	18
Nivel medio del mar en las costas mexicanas	22
Proyecciones climáticas para el siglo XXI	23
Impactos en sistemas humanos y naturales de México: diagnóstico y proyecciones	31
Agricultura	31
Biodiversidad	36
Recursos hídricos.	40
Salud humana	45
Impactos socioeconómicos.	52
Emissiones y políticas de mitigación en México	59
Inventario de emisiones	59
Política nacional de cambio climático en materia de mitigación y adaptación	64
Herramientas y recursos digitales	67
AIRCC-Clim V2: Generador de escenarios regionales probabilísticos de cambio climático	67
AIRCCA: Modelo para la estimación de impactos en rendimientos de cultivos agrícolas por el cambio climático	67
AIRCC-BioDiv: Modelo para la estimación de impactos en la riqueza de especies	68
DataPINCC: Portal de datos y recursos para la investigación en cambio climático	69
Epi-SPECIES Plataforma Universitaria de Eco-epidemiología Espacial	69
UNIATMOS: Atlas y repositorio de escenarios de cambio climático regionalizados CORDEX, AR6, IPCC para México, Centroamérica, Cuba, Jamaica y sur de Estados Unidos de América	70
Referencias	71

Prólogo

El cambio global tiene diversas manifestaciones hoy, tanto en el clima como en la contaminación, la pérdida de biodiversidad, la transición energética y la sustentabilidad alimentaria, por nombrar las más apremiantes. Es indispensable contar con información certera y un análisis riguroso de la misma para estar en condiciones de proponer políticas públicas viables en su implementación.

A través de esta obra, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), refrenda su compromiso con la educación, la generación y la divulgación de conocimiento científico para la atención de los problemas globales y nacionales más apremiantes de nuestros tiempos. En un momento en el que la crisis ambiental en todas sus formas se intensifica y sus efectos se hacen cada vez más evidentes, esta obra marca el inicio de una serie de evaluaciones periódicas sobre el estado y perspectivas del cambio climático en nuestro país. Con un enfoque integral y multidisciplinario, producto de una estrecha colaboración de dependencias e instituciones académicas, buscamos ofrecer a la sociedad y tomadores de decisiones, la mejor información y herramientas actualmente disponibles para abordar este desafío.

El *Estado y Perspectivas del Cambio Climático en México: un Punto de Partida*, cuenta con las contribuciones de 58 investigadores y expertos provenientes de 18 dependencias de la UNAM, 10 universidades y centros de investigación de México y del extranjero. Este esfuerzo, coordinado por el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), da cuenta de que el cambio climático, intrincado y diverso en sus manifestaciones, presenta retos significativos para la sociedad y para el medio ambiente en México. En particular, aborda las implicaciones actuales y futuras del fenómeno sobre aspectos centrales para el desarrollo del país, tales como la agricultura, la biodiversidad, el agua, la salud, la energía y la economía. Los análisis presentados subrayan la urgente necesidad de construir estrategias y políticas encaminadas a la adaptación, mitigación y transformación de nuestras realidades climáticas y sociales. Alcanzar estos objetivos necesariamente pasa por valorar y apoyar sin reserva el desarrollo del conocimiento científico y humanístico, la educación y la cultura.

Confiamos que este documento inicial sirva para concitar una amplia participación de la comunidad científica y de expertos del país para promover un proceso continuo y sostenido de investigación, análisis y divulgación del cambio climático en México. La UNAM está comprometida a mantener este esfuerzo en el largo plazo, promoviendo la formación y consolidación de personas, proyectos y grupos de investigación en el tema y contribuyendo así a que tengamos una sociedad más informada y activa en las decisiones que nos competen y nos afectan de manera colectiva para el bien común.

Dr. William H. Lee Alardín
Coordinador de la Investigación Científica
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

El cambio climático es un problema que emerge por la interacción entre sistemas complejos, humanos y naturales, teniendo múltiples causas, efectos y retroalimentaciones. Se caracteriza por su escala global, por comprometer el bienestar de generaciones presentes y futuras, por la presencia de incertidumbre profunda en algunos de sus procesos, en la evaluación de sus riesgos y en las acciones para enfrentarlo, así como acerca de la posibilidad de ocurrencia de catástrofes climáticas globales. Es, además, un fenómeno multidimensional que abarca aspectos científicos, tecnológicos, socioeconómicos, políticos, éticos y culturales, y es un problema dinámico y no lineal que evoluciona constantemente. Estas características hacen indispensable la generación continua de conocimiento sobre sus causas y consecuencias, así como el acceso de la sociedad, gobierno y otros tomadores de decisiones, a información actualizada y basada en la mejor ciencia disponible.

El cambio climático plantea retos enormes para nuestro país y también posibles oportunidades. Para enfrentarlos se requiere propiciar, de manera creciente, la investigación de largo aliento sobre sus distintos aspectos, con enfoques integrales y multi/transdisciplinarios. La adaptación y reducción de riesgos requieren de conocimiento e información oportuna y sólida sobre las causas y consecuencias del fenómeno, así como de los sistemas que las generan y las experimentan, su exposición, vulnerabilidad y capacidades para transformarse y adaptarse.

Durante las últimas tres décadas, los estudios realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y otras instituciones muestran que México es particularmente vulnerable a los impactos de este fenómeno. Bajo un escenario de altas emisiones de gases de efecto invernadero, se esperan importantes efectos negativos en la producción agrícola, salud humana, biodiversidad, ciudades, energía, así como aumentos considerables en la frecuencia y magnitud de eventos extremos y los daños asociados. Por ejemplo, se estima que las pérdidas económicas acumuladas durante este siglo serían equivalentes a perder hoy varias veces el producto interno bruto nacional actual. Más aún, estos impactos tendrán efectos duraderos y diferenciados entre los diversos sectores sociales y regiones del país, aumentando la desigualdad y dificultando la consecución de metas de reducción de pobreza y desarrollo sostenible.

A pesar de esto, se han dado esfuerzos limitados para resumir y comunicar el estado del cambio climático y sus efectos en el país, así como para proveer una perspectiva general de las posibles evoluciones del sistema clima y de su influencia en los sistemas naturales y humanos durante este siglo. Entre los esfuerzos más destacados se encuentran las seis *Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, presentadas entre 1997 y 2018, y tres Informes bianuales de Actualización, coordinadas primero por el Instituto Nacional de Ecología (INE) constituido en 1992, y después por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), establecido en 2012. Por parte del sector académico, en 2015 se elaboró el *Reporte Mexicano de Cambio Climático*, publicado por el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM. Si bien las estructuras y objetivos de los documentos mencionados son distintos, ambos constituyen,

en principio, las fuentes de información de referencia para la toma de decisiones relativas al cambio climático y para la sociedad en general.

Con el fin de generar información actualizada y oportuna sobre el cambio climático en México, la UNAM, a través del PINCC y del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), ha decidido asumir la tarea de realizar evaluaciones periódicas sobre el estado y perspectivas del cambio climático en México. La presente publicación marca el inicio de la elaboración de dichos reportes periódicos de evaluación, así como de otros reportes temáticos especiales sobre temas emergentes, de importancia coyuntural, en los que se requiera mayor profundidad, o una frecuencia de actualización mayor. Esta publicación no representa un reporte de evaluación completo, sino un recuento breve de algunos de los aspectos más relevantes que se recopilaron en este resumen para tomadores de decisiones. Así, este documento no pretende ser exhaustivo, sino un punto de referencia que sea capaz de proveer al lector una vista rápida de algunos aspectos del cambio climático observado y proyectado en el territorio nacional, así como de algunas de sus consecuencias y posibles acciones para enfrentarlo.

También ofrece, en varios temas, una evaluación de los huecos de investigación y un asomo de la agenda de investigación. Este trabajo involucró nueve grupos temáticos, 58 investigadores y expertos de 18 dependencias de la UNAM y de otras 10 universidades y centros de investigación del país. Durante el periodo de creación del presente documento, comenzaron los trabajos sobre distintos temas que permitirán en un futuro cercano presentar un informe de evaluación más completo y con una mayor participación de la comunidad académica nacional dedicada al estudio de este importante tema. Consideramos de extrema importancia el papel de la UNAM y de otras instituciones académicas nacionales en la generación, difusión y divulgación del conocimiento científico sobre el cambio climático para contribuir a una toma de decisiones basada en el mejor conocimiento disponible y al desarrollo de una sociedad informada y participativa. Alcanzar este propósito requiere un esfuerzo de largo plazo que ayude a consolidar grupos multidisciplinarios y multiinstitución sobre diversos aspectos del cambio climático, que no estén sujetos a los vaivenes de voluntades políticas, y que cuente con un financiamiento suficiente para su operación y continuidad. Un esfuerzo coordinado por la UNAM, que cuente con amplia participación de la academia nacional, tendrá la capacidad de convocar apoyos nacionales e internacionales que hicieran estas condiciones posibles.

Antecedentes

Las Comunicaciones Nacionales de México, coordinadas por el gobierno federal, han tenido una periodicidad de elaboración irregular, entre tres y siete años. Estos esfuerzos no han logrado mantener una continuidad temática, ni conjuntar los apoyos para mantener grupos de trabajo especializados que estimulen avances en la investigación sobre temas de relevancia nacional. Además, la última Comunicación Nacional se publicó en 2018, y oficialmente no hay fecha para la siguiente actualización. En este contexto, resaltamos también que ya han pasado más de siete años desde que el PINCC de la UNAM publicó el *Reporte Mexicano de Cambio Climático*. Esta publicación representó el primer esfuerzo desde la academia para presentar una evaluación nacional general sobre el cambio climático enfocada en, y hecha desde, el país. Dicho documento presentó por primera vez un diagnóstico del conocimiento sobre el clima de México y sus cambios observados, logró reunir los trabajos realizados sobre efectos e impactos de este fenómeno, así como los estudios disponibles acerca de adaptación, además de analizar las contribuciones del país a las emisiones globales de gases de efecto invernadero y las propuestas para mitigarlos. Dicho Reporte fue pionero al reunir en tres volúmenes las bases científicas del cambio climático (Vol.I), el impacto, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático (Vol.II), y las emisiones de gases de efecto invernadero y los esfuerzos de mitigación de esas emisiones (Vol.III). En la elaboración del reporte participaron 240 académicos.

En el Sexto Ciclo de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que inició en 2016, se han publicado tres reportes especiales y el Sexto Reporte de Evaluación (AR6, por sus siglas en inglés). Entre otros resultados, estos reportes han señalado de forma inequívoca el rol de las actividades humanas en el calentamiento global, así como de los impactos asociados que ya han sido observados y para los que se proyectan aumentos considerables en las próximas décadas. En ellos se hace patente que regiones en latitudes bajas, con menor grado de desarrollo socioeconómico y con mayores desigualdades sociales, son y serán más afectadas por el cambio climático considerablemente. Si bien los reportes del IPCC tienen una participación de expertos nacionales y constituyen una importantísima fuente de información tanto para tomadores de decisión, la academia y la sociedad en general, no están elaborados para atender necesidades de información a nivel nacional o subnacional, ni para presentar el conocimiento sobre cambio climático con el detalle que se necesita. La información generada localmente por los países no siempre se refleja adecuadamente en los reportes internacionales. Sin embargo, los esfuerzos nacionales y subnacionales de generación de conocimiento son clave para entender mejor este fenómeno, sus implicaciones, retos y oportunidades, y son decisivos para la formulación de políticas públicas en la materia.

Es en este contexto que el PINCC y el ICAYCC de la UNAM coordinaron la elaboración del presente documento sobre el estado y perspectivas del cambio climático en México. Para ello se convocó a académicos en diversas entidades y programas de la UNAM y de otras universidades e instituciones de México y el extranjero. Con esta publicación se marca el inicio de evaluaciones periódicas, tanto

en forma de reportes de evaluación generales como de reportes específicos. En este documento inicial se presenta una evaluación de los efectos del cambio climático en el clima regional, eventos extremos y océanos adyacentes, haciendo énfasis en sus impactos en la agricultura, la biodiversidad, el agua, la salud, la energía y la economía.

Este documento resume algunos de los estudios realizados a la fecha e incorpora investigación nueva en casos en los que resultaba posible atender algunos huecos de información fundamentales. Los estudios están agrupados en cuatro temas: aspectos de cambio y variabilidad climáticos; impactos en los diferentes sistemas naturales y humanos; emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y finalmente estrategias para su mitigación. Este documento es un resumen ejecutivo que se sustenta en los resultados de reportes en extenso que pueden acceder a ellos por medio de los enlaces correspondientes en cada sección. Todos estos documentos deben considerarse como trabajos en progreso que culminarán en un reporte de evaluación nacional que se publicará a finales del 2024 o inicios de 2025 y que contará con amplia participación de académicos y expertos nacionales.

Esta publicación incluye por primera vez una selección de recursos digitales y software especializado de libre acceso, creado por el PINCC en colaboración con el ICAYCC, así como acceso al portal de datos DataPINCC, que permite la visualización, consulta y procesamiento de bases de datos georeferenciadas, relacionadas con el cambio climático. El uso de estos recursos y sus posibles aplicaciones se darán a conocer a través de webinaros para que los usuarios puedan aprovecharlos al máximo.

Dr. Francisco Estrada Porrúa
Coordinador
Programa de Investigación en Cambio Climático

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Director
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Dra. Amparo Martínez Arroyo
Jefa del Departamento de Ciencias Ambientales
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Dra. Graciela Binimelis de Raga
Investigadora
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Dr. Carlos Gay García
Jefe del Departamento de Ciencias Atmosféricas
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Cambio climático en México: observaciones y proyecciones

Cambios observados en el clima

El clima es un sistema complejo que está determinado tanto por la variabilidad natural interna del sistema, que puede ser de muy corto plazo hasta de cientos de años, como por forzantes externos, tanto naturales como antropogénicos, y sus interacciones. En el análisis del cambio climático el interés se centra en identificar, caracterizar y entender los cambios de largo plazo en medidas tanto de tendencia central como de variabilidad de distintas variables climáticas. En esta sección se muestran algunos de los principales cambios en el clima de México, mostrando que este ya es considerablemente diferente al clima registrado a principios del siglo XX. Para información más detallada y extensa, consulte los reportes citados al final de este capítulo.

Temperatura

La temperatura media del aire en México ha aumentado alrededor de 1.69 °C (1.59 °C-1.81 °C) con respecto a inicios del siglo XX.

Tomando como referencia el periodo 1900-1930, el incremento en la temperatura media del aire en México en 2022 se encuentra en el rango de 1.59 °C a 1.81 °C, dependiendo de la base de datos utilizada (HadCRUT5, GISSTEMP, NOAAGlobalTemp_v5). La incertidumbre en la magnitud de este incremento se debe, en gran medida, a los métodos de recuperación, control de calidad y procesamiento de datos que cada institución generadora realiza (véase **Figura 1a**).

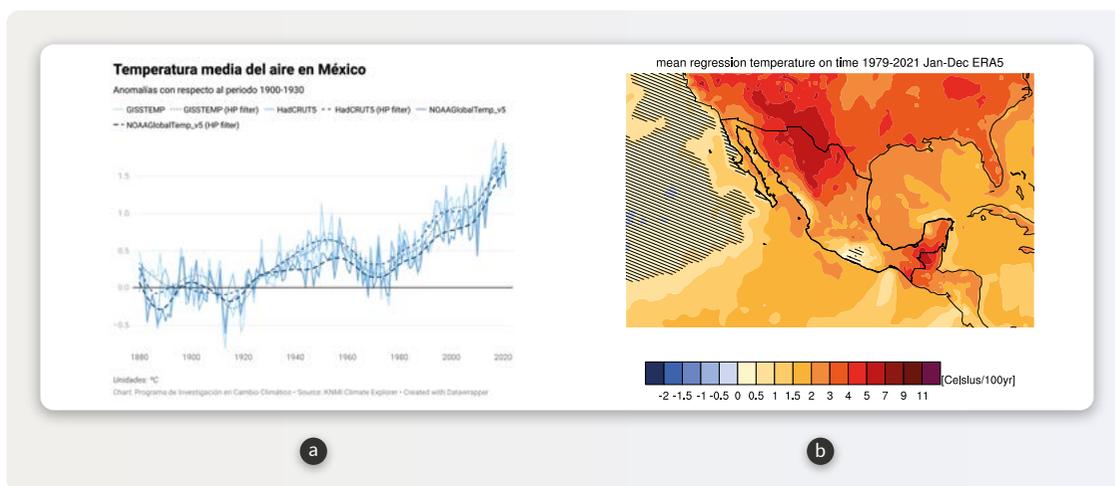
El incremento y la tasa de aumento en la temperatura del aire anual promedio en México son mayores que el promedio global.

Mientras que el aumento en la temperatura media del aire en México desde inicios del siglo XX fue de 1.69 °C (1.59 °C-1.81 °C), el incremento en la temperatura promedio global fue de 1.23 °C, durante el mismo periodo de tiempo. La tasa de aumento en la temperatura promedio anual en México es considerablemente mayor que la tasa del promedio global. La temperatura global ha aumentado a una tasa de 1.90 °C (1.78 °C-1.97 °C) por siglo, mientras que, en México, la tasa de aumento es de 2.88 °C (2.77 °C-3.03 °C) por siglo. Se espera que, durante las próximas décadas, el calentamiento continúe siendo más rápido en México en comparación con el promedio global.

El calentamiento observado en México es debido al incremento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicos producidos desde la revolución industrial.

La forma general de la tendencia mostrada por la temperatura media del aire en México está determinada por el forzamiento antropogénico de los GEI mientras que otros forzantes y procesos de variabilidad natural la han modulado. Sin el efecto de enfriamiento de otros forzantes, el aumento en la temperatura del aire promedio anual en México hubiera sido cerca de un 70% mayor al registrado. La contribución del forzamiento solar al calentamiento observado representa alrededor del 6% del producido por los GEI antropogénicos¹.

Figura 1. Series de tiempo y tendencias espaciales de la temperatura media del aire en México.



El panel a) muestra la evolución temporal del cambio en la temperatura media anual (°C) para México durante el periodo 1880-2021, con respecto al periodo 1900-1930. El panel b) muestra las tendencias (°C por siglo) de la temperatura media anual para México estimadas para el periodo 1979-2021.

Fuente: Estrada, F., et al. 2023

El aumento en la temperatura promedio anual es espacialmente heterogéneo, con mayores incrementos en el norte y sureste del país.

Las tasas de calentamiento muestran diferencias importantes tanto en los patrones espaciales como en la magnitud de los cambios. En general, durante el periodo 1975-2021, el país mostró tasas de calentamiento de 2 °C a 4 °C por siglo en gran parte de su territorio. Las distintas bases de datos coinciden en que las tasas de calentamiento observadas han sido mayores en el norte del país (HadCRUT5, GISTEMP, CRUTS4.05). De acuerdo con los datos de análisis ERAS como se muestra en la **Figura 1b**, durante el periodo 1979-2021, la tasa de calentamiento por siglo en la parte norte del país alcanza valores superiores a los 6 °C y cercanos a los 5 °C en la región sureste.

El incremento en la temperatura no es homogéneo a lo largo del año, siendo mayor en otoño y primavera y menor en invierno y verano.

La Primavera (Mar-Abr-May), y el Otoño (Sep-Oct-Nov), son las estaciones con mayores aumentos en la temperatura media del aire: 1.77 °C (1.61 °C-2.03 °C) y 1.77 °C (1.66 °C-1.85 °C), respectivamente, con respecto al periodo 1900-1930. El invierno (Dic-Ene-Feb), es la estación con menor incremento en la temperatura media con 1.51 °C (1.37 °C-1.77 °C), mientras que el aumento en verano (Jun-Jul-Ago) ha sido de 1.53 °C (1.51 °C-1.56 °C).

Precipitación

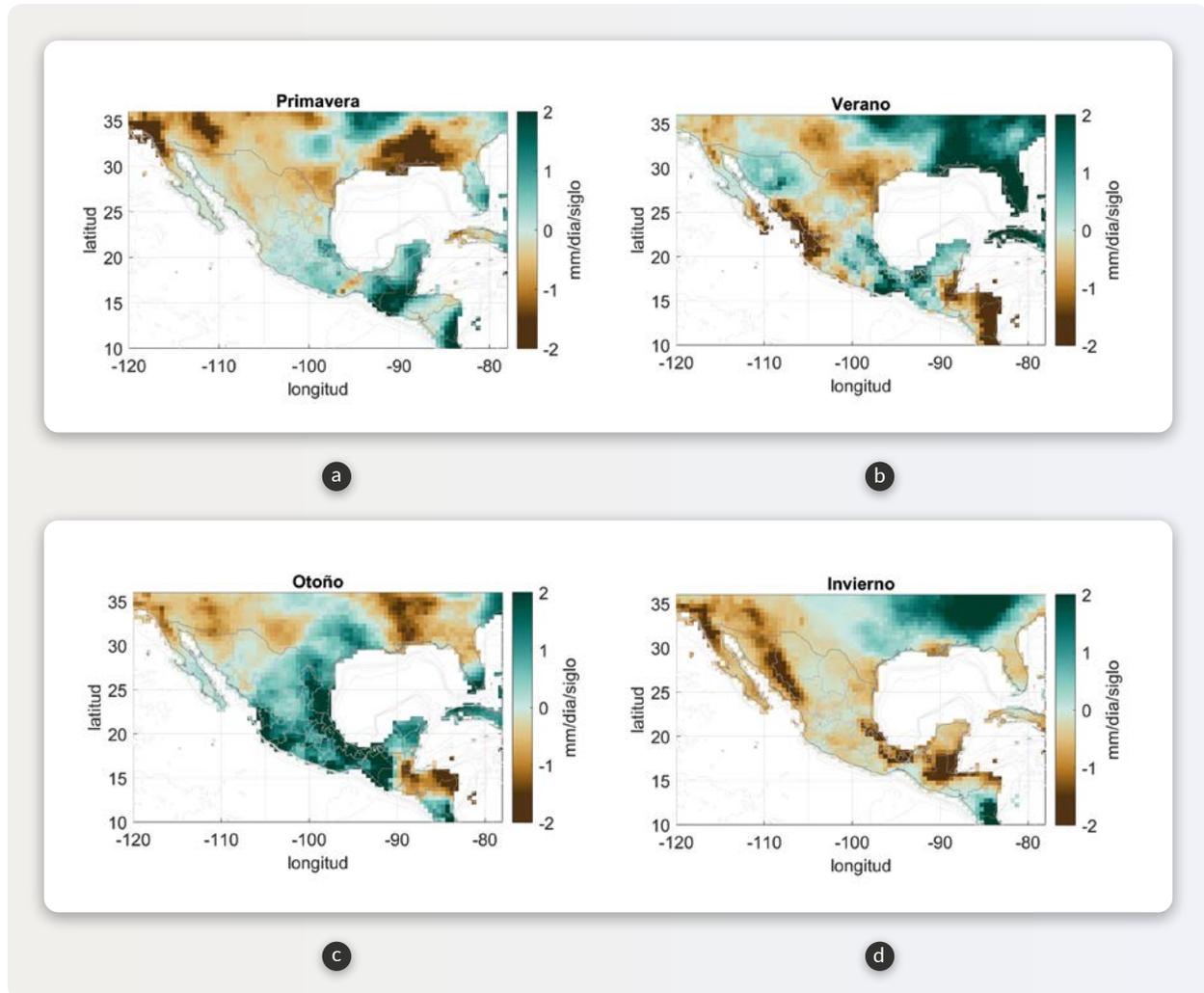
El promedio de la precipitación anual en México ha aumentado a una tasa de 3.1 (2.4-3.8) mm/mes por siglo desde inicios del siglo XX. El cambio climático ha modificado la distribución de la precipitación entre las estaciones del año, con incrementos significativos en verano y otoño.

Las bases de datos analizadas (GPCC, CRUTS 4.05) coinciden en que la precipitación presenta una tendencia positiva constante durante el periodo 1901-2021. Sin embargo, existe incertidumbre importante respecto a la magnitud de la tendencia: 2.4 mm/mes por siglo (GPCC) versus 3.8 mm/mes por siglo (CRUTS 4.05). Tanto en verano como en otoño se han registrado tendencias positivas significativas para ambas bases de datos, pero las magnitudes de cambio varían de manera importante entre ellas. La precipitación en otoño y verano ha aumentado a tasas de 6.5 y 5.1 mm/mes por siglo, respectivamente, usando la base GPCC. En contraste, usando la base CRUTS 4.05, las tasas de aumento correspondientes son de 7.7 mm/mes por siglo en otoño y 8.8 mm/mes por siglo en verano.

El cambio en la precipitación es altamente heterogéneo en el espacio. A grandes rasgos, la precipitación ha disminuido en regiones del norte del país y ha aumentado en el centro y sur. Los cambios estacionales en la precipitación también son heterogéneos.

Durante el periodo 1975-2021, la precipitación anual muestra tendencias negativas en regiones del noroeste de -0.2 hasta -1 mm/día por siglo, e incrementos de entre 0.5 y 2 mm/día por siglo en la mayor parte del centro y sur del país. En invierno se observan tendencias negativas en la precipitación en todo el país, siendo más marcadas en las regiones noroeste y sureste del país, alcanzando valores de hasta -2 mm/día por siglo. Durante la primavera se presenta un patrón de reducción en el noroeste e incremento en la mayor parte del centro y sur del país, con magnitudes similares a las de la precipitación anual. Las tendencias en verano muestran reducciones importantes en la parte norte y centro del país, alcanzando entre -0.5 a -2 mm/día por siglo, con decrementos máximos sobre Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Tamaulipas y Nuevo León. Por el contrario, en el sureste y partes del centro del país se observan incrementos entre 0.5 y más de 2 mm/día por siglo, con los incrementos máximos sobre Oaxaca y Chiapas. Con la excepción del noroeste, las tendencias son positivas para casi todo el país durante el otoño (entre 0.5 y 2 mm/día por siglo), alcanzando máximos superiores a los 2 mm/día por siglo en Tabasco, Veracruz, Chiapas y Jalisco, como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2. Tendencias de la precipitación en México por estación del año durante 1975-2021.



Los paneles a), b), c) y d) muestran las tendencias en la precipitación para primavera, verano, otoño e invierno, respectivamente. Las unidades son mm/día por siglo.

Fuente: Estrada, F., et al, 2023

Evolución de los eventos extremos durante el periodo observado

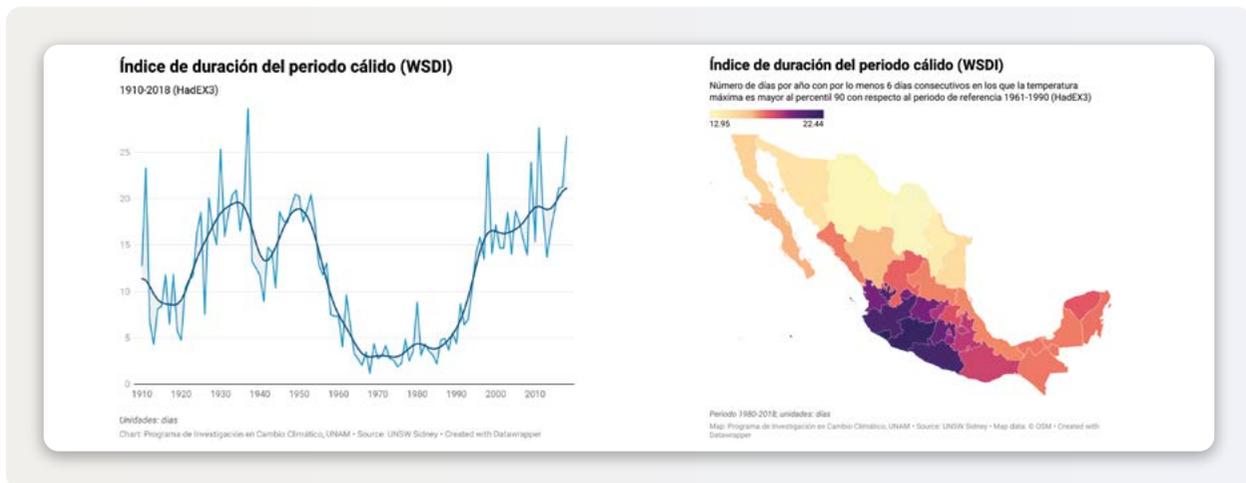
Durante el periodo 1975-2021 observado, los eventos extremos tanto de temperatura como de precipitación en México han aumentado, incluyendo periodos secos más largos y eventos extremos de precipitación de mayor magnitud. Los eventos extremos de temperatura han aumentado de manera generalizada en todo el país, aunque en varios de estos índices se percibe la influencia de oscilaciones de baja frecuencia que distorsionan las tendencias subyacentes. En esta sección, se presenta un breve resumen de los extremos estudiados, y se invita al lector a consultar información más extensa en los reportes citados al final de este capítulo.

Eventos extremos de temperatura

En el periodo que va de 1990-2020, la duración del periodo cálido ha aumentado, alcanzando los niveles más altos en el registro ocurridos entre 1930 y 1960.

Los estados con mayores duraciones del periodo cálido¹ están en el centro y occidente del país (Colima, Michoacán, Guerrero y Jalisco) con alrededor de 22 días al año, mientras que las duraciones más cortas se presentan en el norte con entre 12 y 15 días por año. Las tendencias observadas durante el periodo 1980-2018 indican incrementos cercanos a 10 días adicionales por década para la región centro-occidental, mientras que el norte del país presentó incrementos cercanos a cinco días adicionales por década. En el resto del país los incrementos son cercanos a los 7-8 días adicionales por década. El incremento en la duración del periodo cálido registrado desde mediados de la década de 1980 se da después de una etapa de casi treinta años (1960-1990), con las duraciones más cortas registradas para esta variable en México, como se observa en la **Figura 3**.

Figura 3. Evolución del índice de duración del periodo cálido (WSDI) durante el periodo observado.



El panel izquierdo muestra la evolución temporal de WSDI promedio para México. El panel derecho muestra las tendencias WSDI (1980-2018).

Fuente: Estrada, F., et al 2023.

El porcentaje de días con temperaturas máximas superiores al percentil 90 (TX90p), en relación con el periodo de referencia (1961-1990), se ha casi duplicado desde 1970.

El porcentaje de días con temperaturas máximas superiores al percentil 90 observado durante el periodo de referencia (1961-1990), ha aumentado considerablemente desde inicios de la década

¹ Este índice se define como el número de días anuales con al menos 6 días consecutivos con temperaturas máximas que exceden su percentil 90.

de 1980. Durante esa década el promedio de días con temperaturas superiores al percentil 90 en México era cercano a 9%, y durante los últimos años este valor casi se ha duplicado (17%). Incrementos superiores al 4% por década se observan en Michoacán y Jalisco, de 3 a 4% en la región centro y noroeste del país y de entre 2 a 3% en el noreste.

El porcentaje de días en los que la temperatura mínima supera el percentil 90 (TN90p) del periodo de referencia (1961-1990) ha aumentado desde mediados de la década de 1970 y se ha acelerado a partir de la década de 2010.

En los últimos años, el TN90p ha alcanzado su máximo histórico, llegando a cerca de 20% de los días con temperaturas mínimas superando este umbral. Las tendencias en esta variable indican que el porcentaje de días que supera el percentil 90 del periodo de referencia, ha aumentado más rápidamente en los estados que ya tienen los mayores porcentajes de días con temperaturas superiores a dicho umbral. Para la península de Yucatán y el sureste del país se registran tendencias de aumento cercanas al 3% por década, mientras que en la región centro este valor es de 2.5% por década. En resumen, la combinación de cambios en extremos de temperatura implica una mayor frecuencia de días con temperaturas máximas extremas y también temperaturas mínimas más elevadas, afectando las condiciones de confort, salud y productividad laboral, especialmente en estados del Pacífico.

Eventos extremos de precipitación y sequía

La distribución temporal de la lluvia se ha vuelto más extrema, con periodos más largos de sequía y con eventos de precipitación cada vez más extremos.

Desde principios de la década de los 2000, el número de días consecutivos secos² ha aumentado, de un promedio cercano a 70 días por año a cerca de 80. Las tendencias observadas en esta variable son mucho mayores en el noroeste, con aumentos de seis y hasta ocho días adicionales por década en Baja California, Sonora, Sinaloa y Chihuahua.

Los días muy lluviosos³ pasaron de representar alrededor de un 21% a cerca de un 26% en los últimos años, un aumento de casi 25%. Durante el periodo 1980-2018, las regiones afectadas por ciclones tropicales y del monzón de Norteamérica fueron en las que los eventos extremos contribuyeron en mayor proporción a la precipitación anual (24-26%). En el resto del país, la contribución de eventos extremos de lluvia es cercana al 23%. Durante este periodo, la contribución de días muy lluviosos a la precipitación anual aumentó en gran parte del país, con incrementos de hasta 2-4% por década.

² Este índice contabiliza el número de días consecutivos con precipitaciones inferiores a 1 mm.

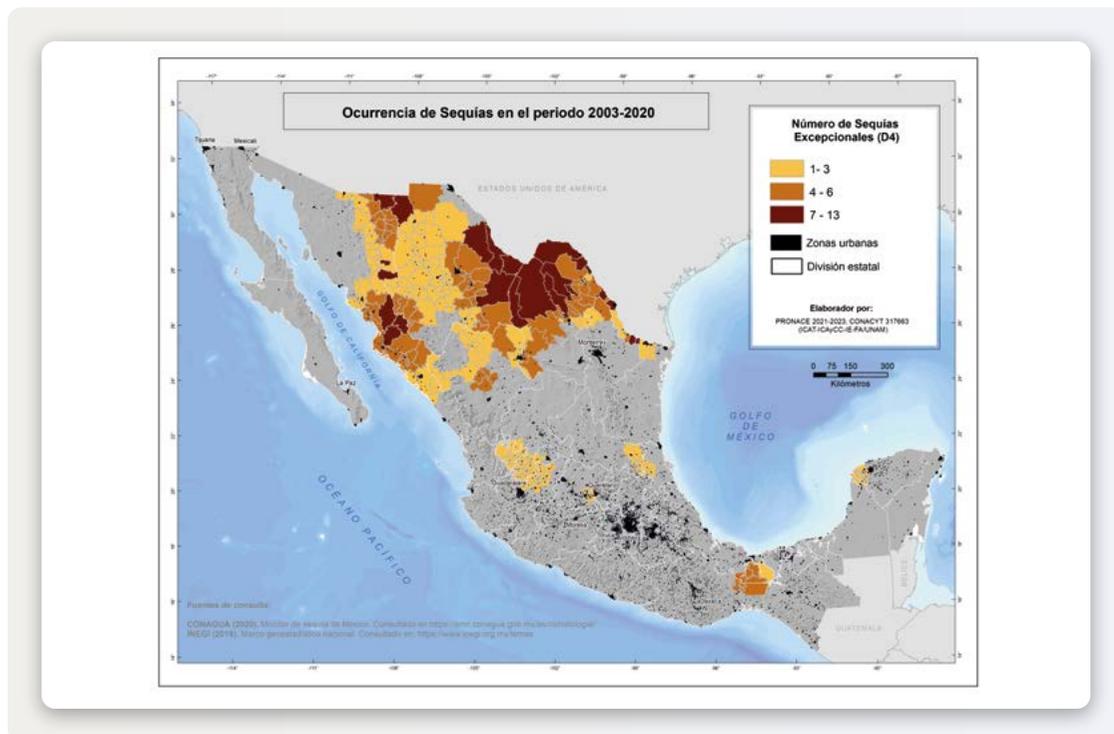
³ Días muy lluviosos se definen como aquellos con precipitación que supera el percentil 95 de los días con lluvia calculado para el periodo de referencia (1961-1990).

El caso de los días extremadamente lluviosos⁴ muestra cambios aún mayores en proporción, pasando de contribuir en un 6% a un 9% a la precipitación total durante el periodo 1980-2018, un aumento de 50%. Los estados con mayores tendencias de aumento en estos eventos son Baja California Sur (3.34%), Yucatán (1.59%) y Colima (1.54%).

Los eventos de sequía observada se han vuelto más frecuentes y severos.

Durante las dos últimas décadas, de acuerdo con el Monitor de Sequía en México del Servicio Meteorológico Nacional, la región norte-centro del país ha experimentado sequías excepcionales (D4) con una alta frecuencia, como se muestra en la **Figura 4**. Las sequías excepcionales están caracterizadas por pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, con probable situación de emergencia debido a la ausencia de agua.

Figura 4. Ocurrencia de Sequías Excepcionales en el periodo 2003-2020



Fuente: Ortiz Haro, G.A., et al 2023; CONAGUA (2020). Monitor de sequía de México. Consultado en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatología/>

INEGI (2019). Marco geostadístico nacional. Consultado en: <https://inegi.org.mx/temas>

⁴ Días extremadamente lluviosos se definen como aquellos con precipitación que supera el percentil 99 de los días con lluvia calculado para el periodo de referencia (1961-1990).

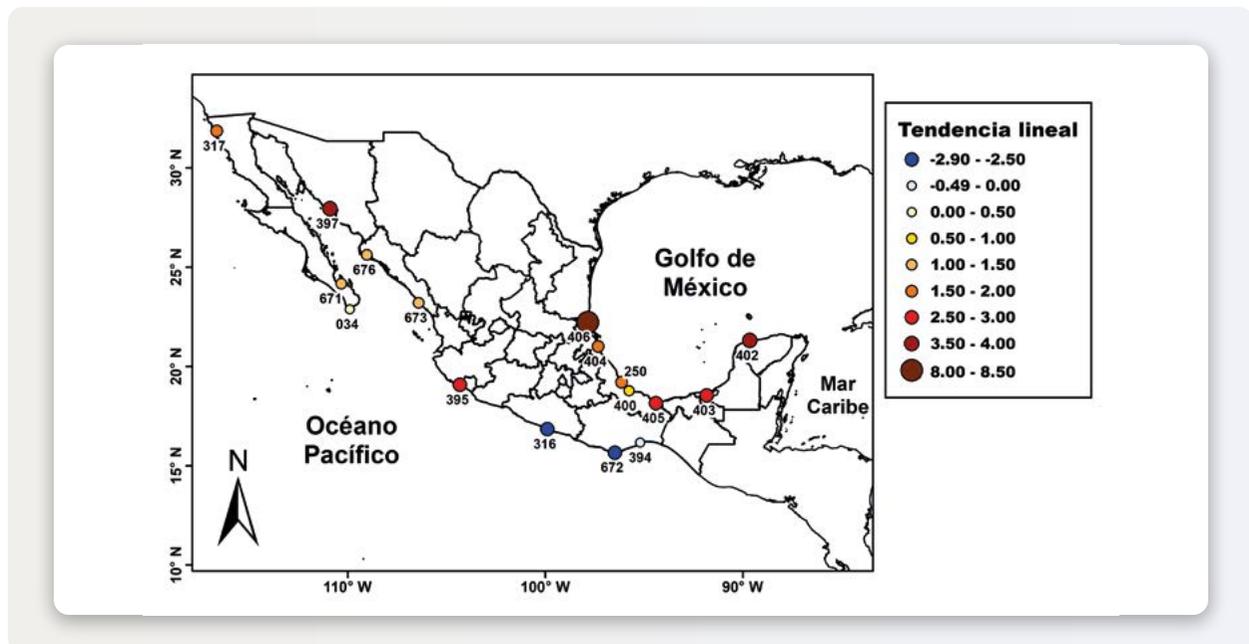
Nivel medio del mar en las costas mexicanas

El nivel medio del mar varía marcadamente a lo largo del año y entre regiones del país. El valor máximo promedio del nivel del mar para las costas del Pacífico Mexicano ocurre principalmente en septiembre, mientras que para los del Golfo de México ocurre en octubre, con amplitud promedio en el ciclo anual de 0.23 m y 0.26 m, respectivamente. La ocurrencia del valor mínimo para el Pacífico Mexicano se da entre febrero y abril, mientras que para el Golfo de México ocurre en los meses de enero, marzo, mayo o julio.

Desde la segunda mitad del siglo XX se tiene registro de aumentos diferenciados en el nivel medio del mar en el Golfo de México y en el Pacífico Mexicano.

La tasa promedio de incremento es mayor en el Golfo de México (2.4 mm año^{-1}) que en el Pacífico Mexicano (1.1 mm año^{-1}). La tendencia observada en el Golfo de México es considerablemente mayor a la reportada a nivel global (1.8 mm año^{-1}) durante un periodo similar (Golfo de México: 1946 a 2006, estimación global: 1946 a 2002). Algunas regiones en el sur del Pacífico Mexicano, particularmente en las costas de Oaxaca y Guerrero, experimentaron decrementos en el nivel medio del mar con una tasa promedio de 1.5 y 2.8 mm año^{-1} , respectivamente, como se muestra en la **Figura 5**. Esto puede deberse a los movimientos verticales de la corteza terrestre, que ocurren localmente, por sismos, sismos lentos y/o subsidencia.

Figura 5. Representación espacial de la tendencia a largo plazo del nivel del mar en 17 sitios costeros de México.



Fuente: López-Espinoza E.D., et al 2023 y Servicio Mareográfico Nacional, UNAM.

Las tendencias en el aumento del nivel del mar a nivel local son espacialmente heterogéneas y algunos de los mayores cambios se encuentran en regiones con alto grado de marginación.

La mayor tasa de aumento del nivel medio del mar se observa al sur y noroeste del Golfo de México. Además, cuatro de los siete sitios analizados presentan una mayor tasa de aumento que la reportada a escala global (Coatzacoalcos, Ver. con 2.8 [1.7 a 3.9] mm año⁻¹, Cd. Del Carmen, Camp. con 3.0 [1.6 a 4.4] mm año⁻¹, Progreso, Yuc. con 3.7 [2.4 a 5.0] mm año⁻¹ y Cd. Madero, Tamps. con 8.3 [2.4 a 14.2] mm año⁻¹). Particularmente, la tasa de aumento observada en el sur del Golfo de México se presenta sobre sitios que se encuentran en ciudades con un índice de marginación alto. Por su parte, en el Pacífico Mexicano las mayores tasas de aumento en el nivel del mar se observan en la parte central y en el Golfo de California, teniendo máximos en Manzanillo, Col. y Guaymas, Son. con 2.8 [0.6 a 5] mm año⁻¹ y con 3.7 [1.8 a 5.6] mm año⁻¹, respectivamente.

Proyecciones climáticas para el siglo XXI

En esta sección se presentan algunos escenarios de cambio climático para el país y por estado que provienen del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) en sus fases 5 y 6, así como en el modelo CLIMRISK y el emulador AIRCC-Clim del Programa de Investigación en Cambio Climático, el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM y la Universidad Libre de Ámsterdam^{2,3}. Los resultados presentados aquí se basan en promedios de ensambles de realizaciones, lo cual es conveniente para ilustrar los posibles cambios, pero no representan la incertidumbre en modelación, ni debe interpretarse como un pronóstico. Se invita al lector a consultar el portal de datos DataPINCC (<https://datapincc.unam.mx/datapincc/>) para acceder a una amplia colección de escenarios de cambio climático.

Hasta antes de la segunda mitad de este siglo, los cambios en el clima del país (y el mundo) están determinados casi en su totalidad por las emisiones y decisiones de política tomadas en décadas anteriores y por la larga memoria del sistema climático.

Los cambios previstos hasta 2030-2040 en su mayoría no son evitables por medio de políticas de mitigación convencionales y sugieren fuertemente la necesidad de ampliar y reforzar las estrategias de adaptación, con el involucramiento y trabajo conjunto entre gobierno, sociedad y academia para el co-diseño de las mismas.

Los cambios en el clima de México que se presenten durante la segunda parte de este siglo, y en horizontes más lejanos, dependen de la trayectoria socioeconómica que la sociedad global en conjunto decida.

Bajo una trayectoria de muy altas emisiones de GEI (SSP585), la temperatura del aire anual promedio en México podría incrementarse a finales de este siglo en cerca de 6 °C (con respecto al periodo 1986-

2005). Bajo un escenario de emisiones de GEI similar a las tendencias actuales sin esfuerzos de mitigación internacional considerables (SSP370), dicho aumento podría rebasar los 5 °C en el 2100. Por el contrario, en un escenario consistente con que se cumplieran estrictamente los compromisos expresados por los países participantes en las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN; similar al SSP245), la temperatura anual promedio en México podría limitarse a 3 °C con respecto al periodo 1986-2005. Finalmente, si los objetivos expresados en el Acuerdo de París se lograran (SSP126), la temperatura media en México podría estabilizarse en alrededor de 2 °C para finales de este siglo.

A pesar de la gran incertidumbre en las proyecciones de precipitación, los escenarios con emisiones altas de GEI sugieren importantes reducciones en la precipitación anual promedio para el país. Por el contrario, escenarios de emisiones intermedias y bajas sugieren cambios en el nivel de la precipitación promedio del país similares a las observadas en el periodo de referencia.

De acuerdo con el promedio del ensamble de todas las realizaciones incluidas en el Proyecto de Intercomparación del CMIP6, los escenarios de altas emisiones de GEI (SSP585 y SSP370) implicarían una reducción de alrededor de un 15% (8%) para finales (mediados) del siglo. Escenarios de emisiones intermedias como el SSP245 proyectan cambios mucho menores en la precipitación anual promedio para el país (5% o menos) durante este siglo y un escenario consistente con el Acuerdo de París (SSP126) podría implicar un ligero aumento.

Simulaciones de modelos climáticos de última generación sugieren que el país podría enfrentar condiciones más secas y mucho más cálidas durante este siglo. Los cambios proyectados son muy heterogéneos en el espacio y entre las estaciones del año. Estas diferencias tienden a acentuarse en escenarios de altas emisiones de GEI y para horizontes de tiempo largos.

Bajo un escenario de emisiones de GEI muy alto (SSP585), en el 2050 el incremento en la temperatura media anual a nivel estatal podría ser entre 1.8 °C y 2.5 °C y de entre 3.8 °C a 5.4 °C a finales del siglo. Los mayores incrementos se presentarían en el norte del país, con estados como Coahuila, Chihuahua, Sonora, con aumentos de hasta 2.5 °C (2050) y 5.4 °C (2090), mientras que Yucatán y Quintana Roo tendrían los menores incrementos (cerca de 1.80 °C en 2050 y de 3.9 °C en 2090). Para finales del siglo, en el escenario SSP585, el incremento en la temperatura anual en 27 estados podría rebasar los 4.5 °C y, en el caso de siete estados del norte, el aumento podría ser superior a las 5 °C. Todos los incrementos mencionados son calculados con respecto al promedio de temperatura de cada estado en el periodo de referencia 1986-2005.

Con la excepción del escenario SSP126, para todos los demás escenarios que implican mayores emisiones de GEI (SSP245, SSP370, SSP585), se prevé una disminución generalizada de la precipitación, especialmente en la segunda parte de este siglo. Las mayores disminuciones en la precipitación se esperan en la península de Yucatán, con valores que pueden superar -20% en el periodo 2081-2100. En general, para todos los estados se proyectan disminuciones en todas las estaciones del año,

con la excepción de otoño. Bajo el SSP585 y en el horizonte 2050, los mayores incrementos (>10%) se dan en la región centro del país. Dichos aumentos varían de forma importante para los estados bajo los distintos escenarios de emisiones de GEI; las respuestas a distintos niveles de forzamiento son no lineales y varían en signo y magnitud entre los diferentes SSP, particularmente en el horizonte corto. En primavera, las mayores reducciones en precipitación (>30% en el horizonte 2090) se presentan en las zonas centro y norte de las costas del Pacífico (Colima, Jalisco, Nayarit, Sonora y Michoacán) y las menores reducciones se presentan en la península de Yucatán y el sureste del país. En contraste, las mayores reducciones en la precipitación de verano se presentan en la península de Yucatán y gran parte del sureste de México y las menores reducciones se encuentran en el norte del país. En casos como Yucatán, Campeche y Quintana Roo, las reducciones en precipitación serían cercanas al 50% bajo el escenario SSP585. Las reducciones en la precipitación de invierno serían mayores en la zona centro de las costas del Pacífico (Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit) con magnitudes de al menos 20% en el corto plazo y 40% en el largo plazo.

Cabe recordar que estos resultados son indicativos únicamente, ya que existen importantes diferencias entre las proyecciones de distintos modelos climáticos, en particular en cuanto a la precipitación y en escalas espaciales reducidas (véase **Figuras 6 y 7**).

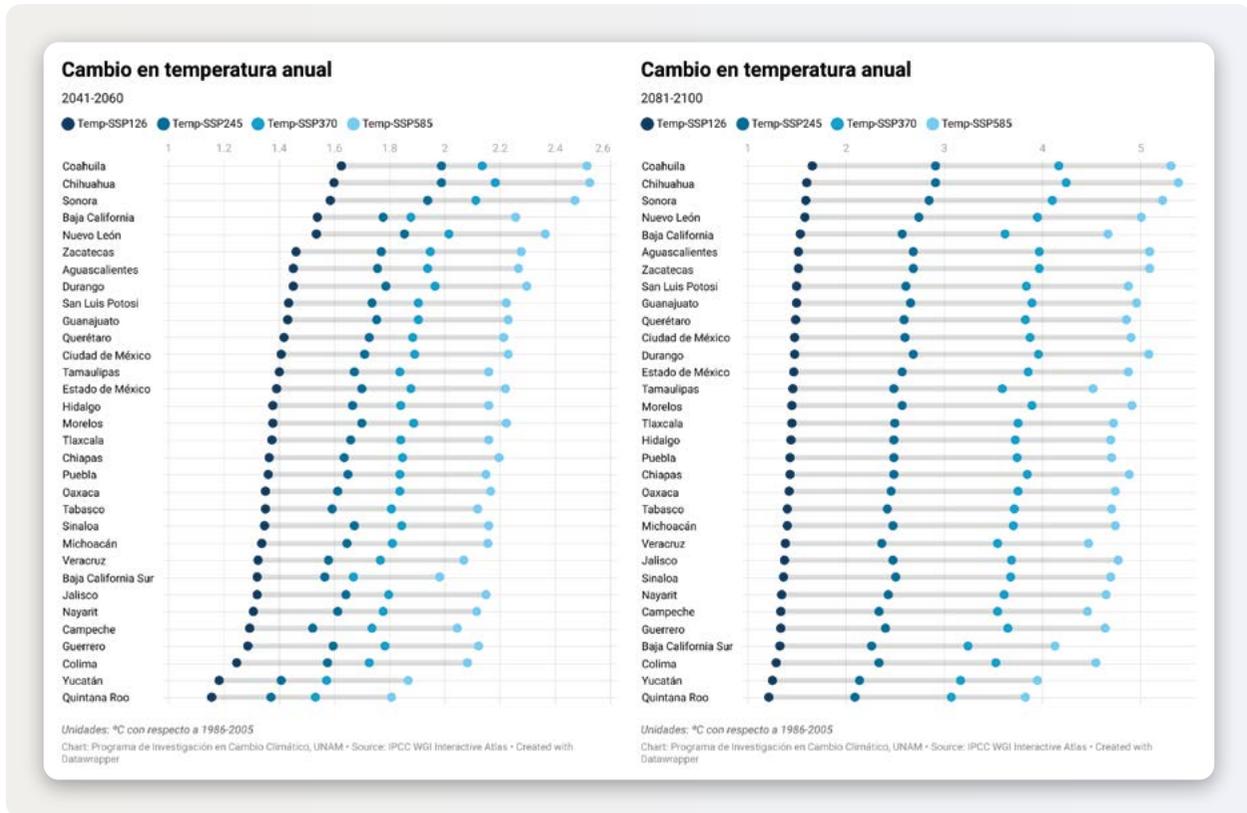
En contraste, bajo un escenario de emisiones de GEI consistente con el Acuerdo de París (SSP126), el aumento en la temperatura podría limitarse por debajo de 2 °C durante todo el siglo y para todos los estados del país. Este escenario también limitaría los cambios en precipitación anual.

Inclusive escenarios de GEI que representan esfuerzos intermedios de mitigación internacional, tal como el cumplimiento estricto de las CDN actuales (similar al SSP245), podrían restringir los aumentos en la temperatura media anual estatal a menos de 3 °C en este siglo.

En el horizonte corto, los aumentos en las temperaturas de otoño e invierno son ligeramente menores que aquellas de invierno y primavera. Los aumentos menores en la temperatura se presentan en el periodo de invierno en el que las proyecciones no superan los 5 °C (1.6 °C) bajo el escenario SSP858 (SSP126). El patrón general de calentamiento a nivel estatal es muy similar para todas las estaciones y los escenarios de emisiones. En general, son los estados del norte del país los que muestran los mayores niveles de aumento en las temperaturas (Coahuila, Chihuahua, Sonora, Durango), aunque en verano Chiapas y Tabasco se encuentran entre los primeros 5 estados con mayor calentamiento. Los estados que muestran el menor calentamiento en todas las estaciones del año son típicamente aquellos pertenecientes a la península de Yucatán y a la península de Baja California (excepto en invierno).

La mediana del ensamble de simulaciones del CMIP6 sugiere que, para escenarios de emisiones bajos, la precipitación podría aumentar para la mayor parte de los estados del país, al menos hasta mediados del siglo. En particular, bajo el escenario SSP126, 23 de los 32 estados tendrían ligeros aumentos en la precipitación hasta el 2050.

Figura 6. Cambios en temperatura promedio anual para los horizontes 2050 y 2090.



Las gráficas muestran la mediana del ensamble de simulaciones del CMIP6 para los estados de México y cuatro escenarios de emisiones SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585. Los paneles muestran los cambios en la temperatura media del aire (°C) para los horizontes 2041-2060 (izquierda) y 2081-2100 (derecha). Todos los cambios se muestran con respecto al periodo de referencia 1986-2005.

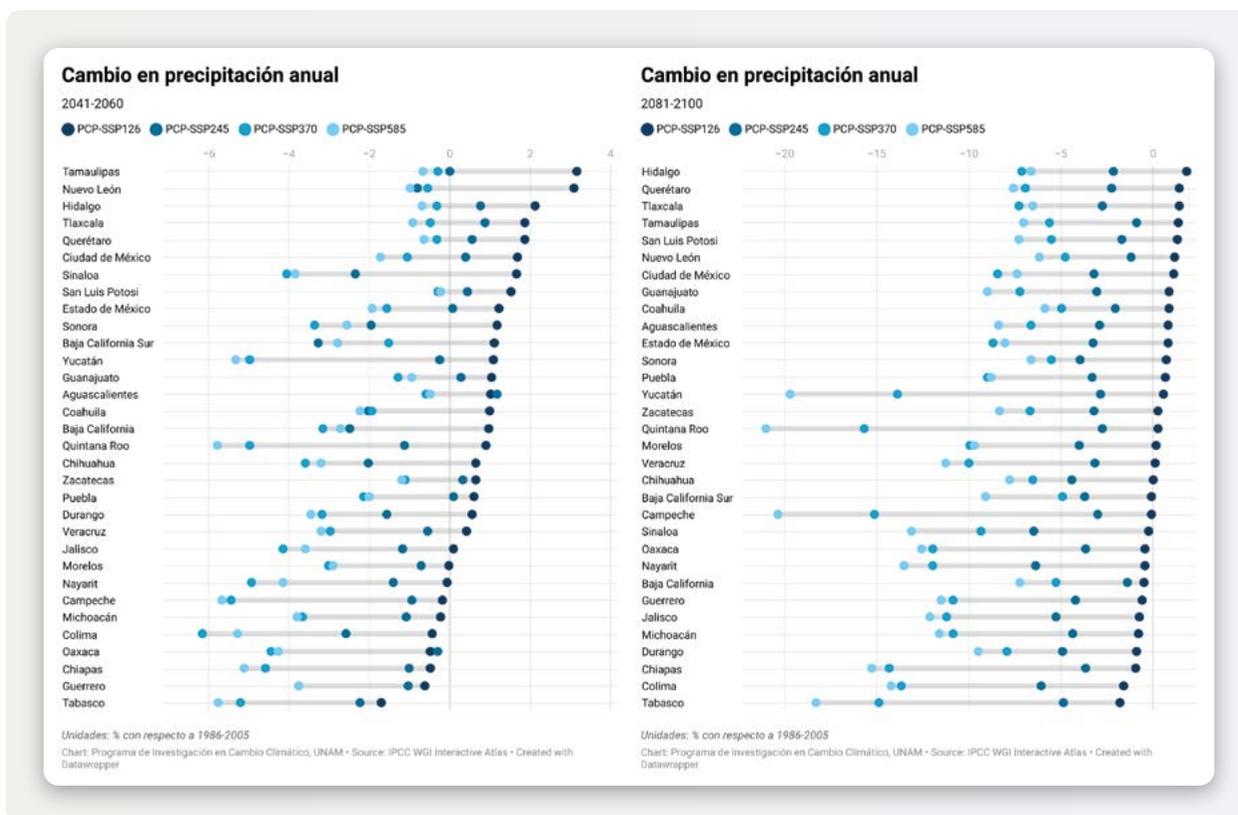
Fuente: Estrada, F., et al 2023.

Se proyecta que durante el presente siglo los patrones de precipitación se vuelvan más extremos, particularmente bajo los escenarios de mayores emisiones de GEI.

La mayoría de los estados experimentarían un clima con importantes modificaciones en los patrones de precipitación, con periodos secos más largos y aumentos en la precipitación del día más lluvioso del año. El promedio del ensamble de los modelos físicos del clima incluidos en el CMIP5 indica que, para cualquiera de los escenarios de emisiones de GEI analizados, casi todos los estados del país tendrían un mayor número de días consecutivos secos (CDD), con respecto al periodo 1970-2000. En particular, bajo el escenario de GEI RCP8.5, estados como Baja California Sur y Colima, los días consecutivos secos podrían aumentar más de 10 y 21 días al año para el 2050 y 2090, respectivamente. Estados como Durango, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Sinaloa y Sonora, po-

drían experimentar más de 7 días consecutivos secos adicionales al año para el 2050 y más de dos semanas adicionales para finales del siglo. Para la mayoría de los estados y escenarios de emisiones de GEI, se proyecta una disminución en el número de días con precipitación extrema (R10mm) y un aumento en la precipitación del día más lluvioso del año (Rx1day), lo cual sugiere un número menor de eventos extremos de precipitación al año, pero de mayor intensidad. En general, las simulaciones apuntan a que México enfrentará un clima más caluroso, seco y con una mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos de temperatura y mayor intensidad en eventos extremos de precipitación.

Figura 7. Cambios en la precipitación promedio anual para los horizontes 2050 y 2090.



Los paneles muestran los cambios en la precipitación anual (%) para los horizontes 2041-2060 (izquierda) y 2081-2100 (derecha). Todos los cambios se muestran con respecto al periodo de referencia 1986-2005.

Fuente: Estrada, F., et al, 2023.

Se proyecta que los eventos extremos en temperatura aumenten en intensidad durante este siglo, incluso bajo los escenarios de mitigación internacional de GEI más ambiciosos, y particularmente para los escenarios con altas emisiones.

Durante este siglo y para todos los escenarios de emisiones de GEI, se espera que el valor de la temperatura máxima del día más caliente del año (TXx) aumente para todo el país con respecto al periodo de referencia 1970-2000. Bajo el escenario de emisiones RCP2.6, el aumento promedio en TXx para los estados sería de 1.8 °C, y una quinta parte de los estados tendrían aumentos mayores a 2.0 °C (por ejemplo, Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí). Para finales de siglo, el aumento promedio estatal se mantendría en cerca de 1.7 °C. En contraste, para el 2050 los estados experimentarían incrementos en TXx de al menos 2.0 °C, con 7 estados superando los 3 °C. Para el 2100, el aumento promedio para los estados en TXx es de 5.3 °C, con 7 estados teniendo incrementos cercanos o superiores a 6 °C.

Los escenarios de mitigación internacional más optimistas de los GEI, en los que se cumplen las metas del Acuerdo de París, proveen una primera aproximación de los requerimientos de adaptación mínimos en tiempo y espacio, necesarios para diversos sistemas humanos y naturales.

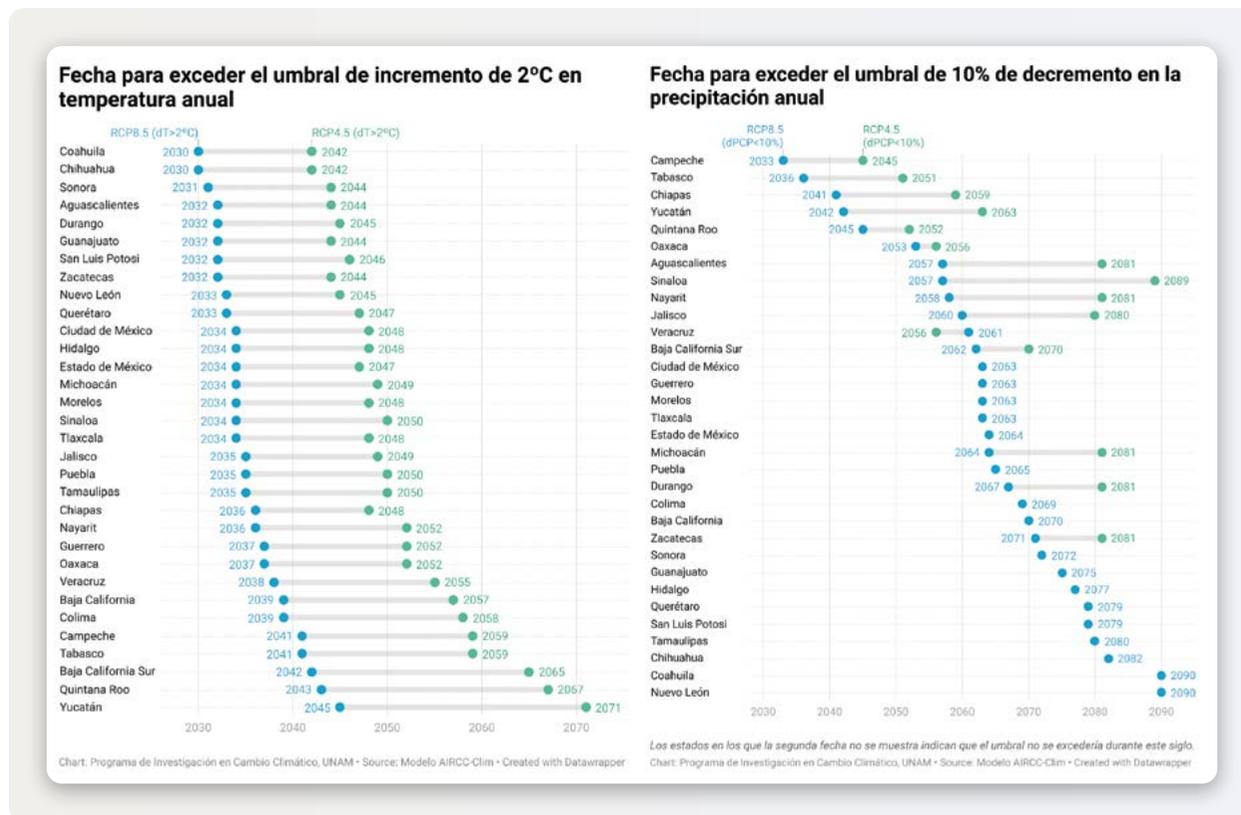
Los riesgos e impactos residuales son aquellos que un determinado esfuerzo de mitigación no puede evitar y para los cuales se requerirían estrategias de adaptación y reducción de riesgos. Las proyecciones de cambio climático basadas en esfuerzos de mitigación progresivamente ambiciosos pueden ayudar a formular requerimientos mínimos de adaptación y reducción de riesgo para distintos horizontes de tiempo, ubicaciones geográficas y para distintos sistemas humanos y naturales.

Incluso esfuerzos de mitigación internacionales poco ambiciosos pueden reducir algunos de los riesgos que el cambio climático implica para el país y proporcionar tiempo para la adaptación.

Las fechas esperadas para rebasar los umbrales de riesgo pueden retrasarse, dando mayor tiempo para la implementación de medidas de adaptación. Este es el caso de las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN) actualmente acordadas por la mayor parte de países del mundo. Si bien las CDN actuales son insuficientes para limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 °C para finales del siglo, sí permitirían reducir/retrasar la excedencia de umbrales de riesgo.

Por ejemplo, pasar de un escenario de inacción y muy altas emisiones de GEI (RCP8.5) a uno similar a lo que se lograría con la CDN actual (RCP4.5) resultaría en retrasar 15 (12 a 26) años en promedio la fecha en que los estados del país rebasarían aumentos superiores a 2 °C con respecto al periodo de referencia 1986-2005. De la misma forma, este esfuerzo de mitigación internacional lograría retrasar la excedencia del umbral de reducción de al menos 10% por cerca de 15-20 años en muchos estados, y en algunos de ellos se evitaría que dicho umbral se rebasara durante este siglo (véase **Figura 8**).

Figura 8. Fechas de excedencia de umbrales de riesgo para dos escenarios de emisiones.



El panel izquierdo muestra las fechas estimadas de excedencia de 2 °C en la temperatura del aire anual promedio para un escenario de muy altas emisiones (RCP585) y uno similar al cumplimiento estricto de las CDN actuales (RCP245). El panel derecho muestra las fechas estimadas de excedencia de disminuciones mayores al 10% en la precipitación anual para un escenario de muy altas emisiones (RCP585) y uno similar al cumplimiento estricto de las CDN actuales (RCP245).

Fuente: Estrada, F., et al 2023.

La información presentada en esta sección proviene de los siguientes reportes:

Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Raga G., Altamirano del Carmen, M.A., Torres, V., Zavala-Hidalgo, J., 2023. Análisis del cambio climático observado y proyectado para México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-analisis-observado-y-proyectado.pdf>

López-Espinoza E.D., Gómez-Ramos O., Zarza Alvarado M.A., Zavala-Hidalgo J., Osorio-Tai M.E., 2023. El cambio en el nivel medio del mar en las costas mexicanas. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-nivel-medio-del-mar-en-las-costas-mexicanas.pdf>

Ortiz Haro, G.A., Gress Carrasco, F., Mazari Hiriart, M., 2023. Recursos hídricos y cambio climático: una visión desde México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-impactos-recursos-hidricos.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Impactos en sistemas humanos y naturales de México: diagnóstico y proyecciones

Las consecuencias del cambio climático para nuestro país son profundas y multidimensionales, muy heterogéneas tanto en espacio como al interior y entre grupos sociales, sectores y sistemas naturales.

Los impactos del cambio climático se caracterizan por ser inciertos, por amplificar y retroalimentar diversos problemas socioambientales concurrentes e inequidades, por ser persistentes e incluso irreversibles, así como por la existencia de puntos críticos que pueden modificar de forma dramática el comportamiento del mismo sistema climático o de sistemas influenciados por él. En esta sección se hace un resumen sobre el estado de la investigación en distintos sectores y los principales efectos asociados al cambio climático que ya han sido observados, así como aquellos que se proyectan para el resto del siglo.

Agricultura

Se provee aquí un panorama sobre la investigación de la agricultura y el cambio climático en México, resaltando las principales líneas y resultados existentes en el tema. Se identifican los principales retos, oportunidades y faltantes de información, con el objetivo de encausar esfuerzos futuros en términos de investigación científica y de difusión de resultados para la toma de decisiones. Actualmente, ya se observan y se proyectan impactos importantes y diversos del cambio climático sobre el sector agrícola mexicano. Sin embargo, hay poca diversidad de los cultivos analizados, así como un sesgo geográfico concentrado únicamente en ciertas zonas del país.

La investigación de la agricultura y el cambio climático en México refleja poca diversidad de los cultivos analizados, así como un sesgo geográfico concentrado únicamente en ciertas zonas del país.

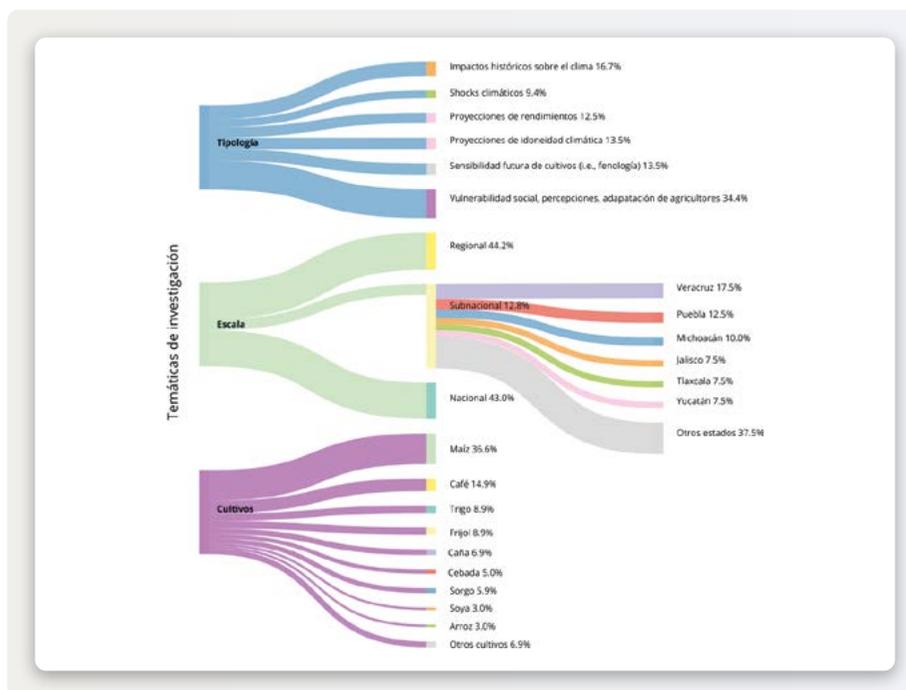
A través de una búsqueda sistemática de literatura científica se encontraron 96 artículos relacionados con el tema de agricultura y cambio climático en México, los cuales fueron publicados entre 1990 y 2022. La mayoría de los estudios incluyen al maíz, seguido del café, frijol y trigo, y a escalas regional y nacional. A nivel subnacional, los estados más analizados son Veracruz, Puebla, Jalisco y Tlaxcala (véase **Figura 9**). El 16.7% de las publicaciones se enfocan en el análisis de la relación entre variables climáticas, como la duración de las temporadas de secas o de lluvias, las temperaturas máximas, mínimas, la evapotranspiración, la aridez o los días de crecimiento y floración. Los cultivos más representados en este tipo de análisis fueron el maíz y el café con 36.7% cada uno, seguidos del centeno y la manzana con 12.5%. Este tipo de estudios se realiza primordialmente a nivel subnacional; los estados más representados fueron Sonora, Veracruz, Sinaloa, Jalisco y Chihuahua. Los principales resultados muestran cómo la variabilidad climática afecta negativamente a los

cultivos y sugieren la necesidad de modificar los tiempos de siembras por los cambios en el comienzo y la duración de las temporadas de lluvias⁴⁻⁶.

Un alto porcentaje de los estudios del cambio climático y la agricultura en México se enfocan en la estimación de los impactos futuros sobre los cultivos de importancia nacional. Existe un número mucho menor de estudios sobre impactos históricos y sobre impactos climáticos.

La mayoría de la literatura relacionada con la agricultura y el cambio climático en México se enfoca en estimar impactos futuros (39.8%). En contraste, el 16.7% de las publicaciones se enfocan en el análisis de la relación entre aspectos fenológicos de los cultivos y variables climáticas, como la duración de las temporadas de secas o de lluvias, las temperaturas máximas, mínimas o la evapotranspiración. Los cultivos más representados en este tipo de análisis fueron el maíz y el café con 36.7% cada uno, seguidos del centeno y la manzana con 12.5%. Una proporción aún menor de la literatura se dedica a aspectos como sequías, inundaciones, heladas o eventos extremos que se han registrado en el pasado. Entre ellos se encuentran estudios que analizan la influencia del fenómeno del *El Niño/Oscilación del Sur* sobre maíz y frijol⁷, así como de los efectos de la sequía en la producción de caña de azúcar⁸.

Figura 9. Tipología de la revisión de literatura, nivel geográfico de estudio y cultivos más populares en los estudios del cambio climático y sus impactos en la agricultura en el país.



Los números muestran porcentajes de los trabajos dedicados a cada tema.

Fuente: Mendoza-Ponce A., 2023

Actualmente ya se observan impactos importantes y diversos del cambio climático sobre el sector agrícola mexicano y se proyecta que los mismos serán más pronunciados a lo largo del siglo.

Los estudios disponibles muestran en general una reducción en la producción agrícola hacia finales de siglo por cambios tanto en valores medios de variables climáticas como en sus extremos. Se espera por el cambio climático una posible expansión o intensificación agrícola con efectos negativos en los ecosistemas y recursos hídricos y edáficos, y también un aumento en la dependencia agroalimentaria y mayor exposición a cambios en precios internacionales.

Bajo un escenario de muy altas emisiones, el cambio climático puede reducir severamente los rendimientos agrícolas del país, particularmente aquellos de producción de temporal.

Existen pocos estudios que analicen los impactos del cambio climático sobre varios cultivos y manejos en el país. Un estudio reciente muestra que el maíz, trigo, sorgo, arroz y soya reducirán marcadamente sus rendimientos⁹. Para finales del siglo, a nivel nacional las reducciones en rendimientos de soya y arroz podrían llegar a ser mayores al 50%, mientras que para maíz y sorgo podrían rebasar 40%, y 20% para trigo. En el caso de caña de azúcar, existe gran incertidumbre en las proyecciones entre modelos biofísicos y dependiendo de los supuestos que se realicen sobre la fertilización por CO₂. Sin embargo, uno de los modelos biofísicos más utilizados sugiere reducciones de hasta 11% en este cultivo para finales del siglo. Estos seis cultivos representan el 65% del área cultivada en México y son los que tienen el mayor consumo aparente en México. Para estos cultivos, este escenario implica reducciones en rendimientos entre 5% y 20% en las próximas dos décadas y de hasta 80% a finales del siglo para algunos cultivos y estados.

Los impactos observados y potenciales del cambio climático sobre el maíz son negativos. Se proyecta una reducción de los rendimientos de hasta 80% en zonas del país y una disminución entre 3.0% y 18.0% de su idoneidad climática.

Los primeros estudios reportados del maíz y el cambio climático en México sugirieron que con un incremento de 2.0 °C y una reducción en la precipitación del 20%, el área idónea para el maíz se reduciría en un 18.0%¹⁰. Sin embargo, esfuerzos posteriores¹¹ que utilizaron proyecciones de modelos físicos del clima, sugirieron reducciones de únicamente entre 3.0% a 4.3%. Estudios más recientes, utilizando el escenario de cambio climático RCP8.5 proyectaron reducciones del rendimiento del maíz de temporal del 10% a nivel nacional¹² con disminuciones regionales de hasta 80%, 81.6%, 84%, y estatales de hasta 80%^{9,13-15}. Los estados con mayor aptitud para producción de maíz de temporal actualmente (Jalisco, México, Nayarit, Morelos, Michoacán, Guerrero y Colima) podrían perder entre un 30% y 40% de sus rendimientos para finales del siglo. Actualmente, 23 estados tienen rendimientos en producción de maíz de temporal por arriba de una tonelada por hectárea; para finales de siglo, únicamente 11 de ellos continuarán produciendo al menos una tonelada por hectárea. Otras estimaciones basadas en rendimientos absolutos sugieren decrementos entre 0.25 a 0.5 t/

ha¹⁶. La disponibilidad de agua y la duración de la temporada de secas son factores de importancia, sobre todo para el maíz de temporal, principalmente en el noreste y sur del país^{13,15}. Estas zonas son también reportadas con las mayores reducciones (hasta el 5.5%) en la idoneidad climática para este cultivo¹⁷.

Los impactos observados y potenciales del cambio climático sobre el café son negativos. Hay registros actuales que muestran reducciones en rendimientos en el periodo de 2010 al 2020 de 42.5% y 23.4% para el café de riego y de temporal, respectivamente.

Los estudios sobre la producción de café y el cambio climático en México se remontan al 2006¹⁸. En ese estudio se proyectaba una reducción al 2020 del 34% en la producción de Veracruz, debido al cambio climático. Este decremento ha sido mayor, incluso en el periodo 2010 a 2020, en donde se muestra una disminución del 36.7% en ese estado¹⁹. Esta reducción se debe a varios factores, primero a la reducción en superficie cosechada en ambos manejos; por ejemplo, el decremento de 48.6% en el área de riego. Sin embargo, también ha habido una reducción en los rendimientos de 42.5% y 23.4% para riego y temporal, entre 2010 y 2020, respectivamente¹⁹. Es necesario analizar los determinantes climáticos y socioambientales de estos cambios.

Para la mitad del siglo podrían reducirse los rendimientos del trigo hasta en 23.3% para trigo de temporal y 20.0% para trigo de riego. Estos impactos podrían mitigarse a través del cultivo de nuevas variedades más resistentes a condiciones climáticas extremas.

Los análisis acerca del trigo en México son relevantes porque si bien el país importa gran cantidad de este cultivo (~65%), los cultivos de trigo en el país se han caracterizado por nuevas variedades y tecnologías desarrolladas por el Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y el Trigo²⁰ (CIMMYT). Estos desarrollos hacen que México tenga rendimientos mayores a la media internacional²¹. Hay estudios que sugieren que bajo un escenario de cambio climático RCP8.5 los rendimientos para el 2050 caerían en ~15% para trigo de temporal y ~7.5% para trigo de riego^{15,22}. Otras proyecciones sugieren que, para fin de siglo, los decrementos podrían ser de 23.3% y 20.0% para temporal y riego, respectivamente⁹.

Los cambios en la temperatura y la precipitación impactan negativamente la producción del frijol en México; sin embargo, hay variedades que han mostrado mejor adaptación a climas secos y cálidos.

El frijol podría tener decrementos de 10% a 40% debido a mayores temperaturas y reducciones en precipitación¹⁵. Sin embargo, especies del género *Phaseolus* como *P. filiformis*, *P. purpusii*, y *P. maculatus* han mostrado estar más adaptadas a climas más secos²³.

La información presentada en esta sección proviene del siguiente reporte:

Mendoza-Ponce A., Ortiz Haro G.A., Murray-Tortarolo G.N., Salazar Frausto, J.L., 2023. Agricultura y cambio climático en México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-impactos-agricultura.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Biodiversidad

Existe amplia evidencia sobre los impactos del cambio climático contemporáneo en la biodiversidad a escala global²⁴⁻²⁷. De igual forma, existe evidencia de disturbios en procesos biológicos y ecológicos en diferentes escalas de organización, desde el nivel genético hasta el nivel de ecosistemas²⁵. El cambio climático exacerbará el efecto de otros factores antrópicos que ya están amenazando a las especies y ecosistemas, como son la pérdida de hábitat, especies invasoras, contaminación, brotes de patógenos, entre otras^{28,29}. Sin embargo, la mayor parte de la evidencia de los impactos se concentra en especies y ecosistemas de regiones templadas de países del norte global^{24,25,30,31}, existiendo muy poca información acerca de los impactos para especies y ecosistemas tropicales y subtropicales. México es reconocido por su alta diversidad de especies y endemismos, al ubicarse en una zona de transición biogeográfica entre la región Neártica y la Neotropical. Esta heterogeneidad lo hace particularmente vulnerable al cambio climático y resulta prioritario entender cómo el cambio climático, afecta y podría afectar a la biodiversidad y cómo la combinación de rasgos ecológicos e historia evolutiva podría ayudar a entender la forma en que las especies responden a los cambios en los regímenes climáticos. La información que se tiene hasta la fecha sobre los impactos del cambio climático contemporáneo en la biodiversidad es bastante pobre y dispersa³². En este apartado, se presentan algunos resultados principales sobre ecosistemas para los que existen estudios puntuales.

Impactos observados en ecosistemas mexicanos

Desde la década de 1970 se han registrado reducciones drásticas en el área de cobertura de corales duros en el Caribe mexicano, tanto por los efectos del cambio climático como por eventos de variabilidad natural del clima.

En los sistemas costeros y marinos del Caribe mexicano, desde la década de los 1970 la cantidad de corales duros ha disminuido drásticamente, de un 50% del suelo arrecifal cubierto por corales a un 10% en el presente. Durante *El Niño* de 1997-1998, se reportaron eventos de blanqueamiento de coral³³. Estos eventos resultaron en una pérdida superior al 90% de la superficie de coral para la costa de Oaxaca y Jalisco. Sin embargo, los arrecifes de coral de la costa del Pacífico mexicano se han recuperado de estos eventos de mortalidad, mostrando un alto grado de resiliencia y se consideran térmicamente estables³⁴. Se espera que esta capacidad de recuperación disminuya con olas de calor más frecuentes y periodos con ausencia de estrés térmico más cortos. Si bien para el Golfo de México y el Mar Caribe no se han identificado eventos de mortalidad masivos posteriores a un evento de blanqueamiento³⁵, y no se han identificado cambios en la cobertura coralina tan severos como en el Pacífico mexicano y otras regiones del planeta³⁶. Sin embargo, se espera que el Caribe Mexicano presente incrementos importantes en estrés térmico y olas de calor^{37,38}.

A pesar de su importancia para estrategias de adaptación basadas en ecosistemas y para mitigar impactos por eventos extremos, se conoce muy poco sobre los efectos del cambio climático contemporáneo en manglares, dunas y pastos marinos.

Estos ecosistemas son muy importantes para la regulación y protección frente a los impactos de eventos extremos como ciclones tropicales³⁹⁻⁴¹. La investigación sobre los efectos del cambio climático en ellos es prioritaria, así como emprender acciones de restauración y conservación enmarcadas dentro de las estrategias de Adaptación basada en Ecosistemas⁴².

Existe evidencia limitada sobre los impactos del cambio climático en especies terrestres. Sin embargo, se han documentado extinciones locales y diversos efectos negativos asociados con este fenómeno.

Existe evidencia de extinciones locales de al menos el 12% de las poblaciones de 48 especies de lagartijas del género *Sceloporus* por incrementos de temperaturas máximas y mínimas⁴³ como se muestra en la **Figura 10**, así como de declives en poblaciones de especies forestales como encinos y coníferas⁴⁴. En aves, hay evidencia de cambios en la composición de especies en algunas regiones del país a lo largo del siglo XX⁴⁵. En particular, en las zonas desérticas (e.g., Chihuahua, Sonora, norte de Baja California) y la cuenca del río Usumacinta se reportan como las áreas con mayores tasas de extinción local y recambio de especies⁴⁵.

Se han documentado migraciones altitudinales en distintos tipos de vegetación relacionadas con el cambio climático observado.

Recientemente, se han utilizado sensores remotos para evaluar si límites altitudinales de la línea de árboles en regiones montañosas de México han cambiado entre 1985 y 2018. Se documentaron migraciones altitudinales de al menos 500 m en bosques y pastizales en 15 volcanes del centro de México en un periodo de tres décadas⁴⁶.

Proyecciones de impactos futuros en biodiversidad

Diversos estudios basados en modelos correlativos y de nicho ecológico muestran reducciones potenciales en áreas de distribución de especies a lo largo del país.

Algunas regiones podrían ser más susceptibles para ganancias y pérdidas de áreas de distribución en especies endémicas. Se proyectan extinciones locales y reducciones de hasta el 50% del tamaño actual de las áreas de distribución en varios grupos taxonómicos, principalmente de vertebrados terrestres⁴⁷⁻⁵³.

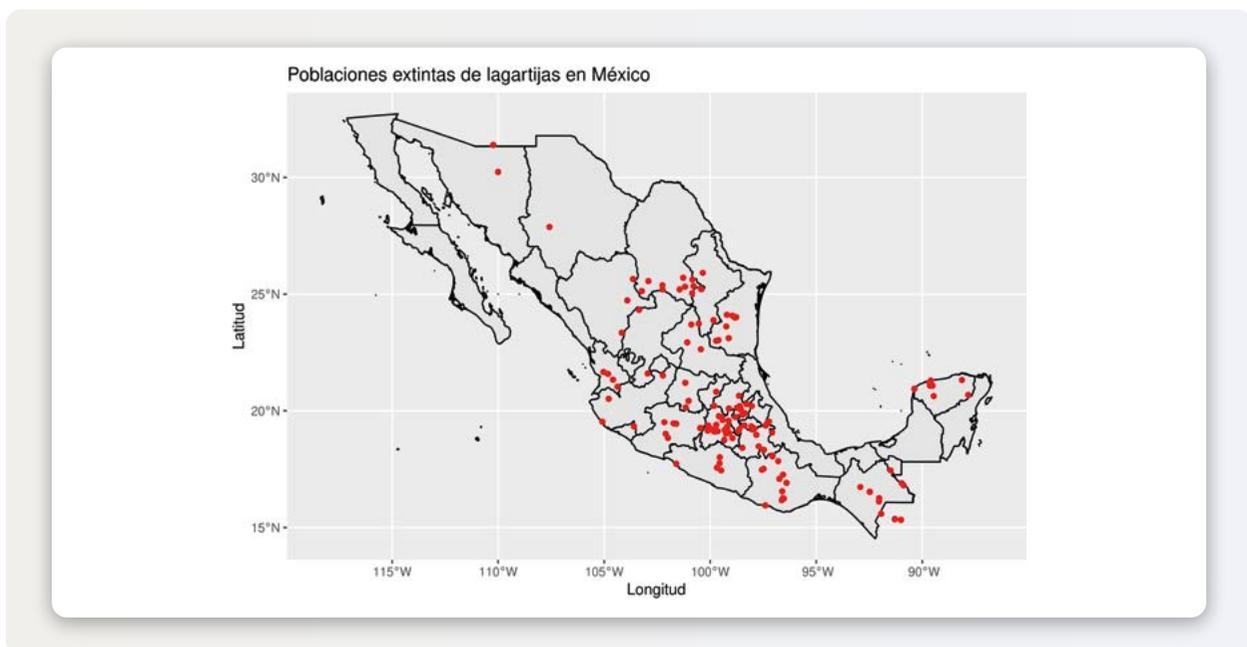
Los impactos del cambio climático varían entre grupos taxonómicos, son geográficamente heterogéneos y exacerbarán las presiones socioambientales existentes.

En casos como aves y anfibios, las especies amenazadas y ecológicamente restringidas sufrirán un impacto negativo más marcado bajo escenarios futuros del cambio climático^{50,54}. Las mayores pérdidas de especies para anfibios se proyectan para las regiones del sur del golfo de México y la península de Yucatán⁴⁸. De forma similar, algunos estudios proyectan reducciones drásticas de más del 60% del hábitat para especies de pinos en México⁵⁵.

Una limitación importante de los modelos de nicho ecológico y proyecciones futuras es que no han incorporado la incertidumbre asociada a los modelos de clima y escenarios de emisiones de GEI de forma apropiada.

Los estudios disponibles no han incorporado la incertidumbre asociada a los modelos de clima y escenarios de emisiones de forma apropiada, ni entre modelos ecológicos⁵⁶⁻⁶⁰. La mayoría de estos estudios solo han usado un conjunto pequeño de modelos de clima y de escenarios de emisiones. Se considera que esta limitación puede dificultar la incorporación de esta información en la toma de decisiones y en la generación de políticas públicas encaminadas a proteger la biodiversidad frente a los impactos del cambio climático.

Figura 10. Localidades donde se han reportado extinciones locales de poblaciones de especies de lagartijas del género *Sceloporus* y que son atribuibles a incrementos en temperatura en el último siglo.



Fuente: Grupo de Investigación e Incidencia en la Biología del Cambio Climático (InBioCC, 2023).

La información presentada en esta sección proviene del siguiente reporte:

Grupo de Investigación e Incidencia en la Biología del Cambio Climático (InBioCC): Aguirre-Liguori, Jonas A.; Álvarez-Filip, Lorenzo; Búrquez-Montijo, Alberto; Correa-Metrio, Alex; Domínguez, Omar; Escobedo-Galván, Armando H.; Garrido-Garduño, Tania; Gómez-Ruiz, Pilar Angélica; Jiménez-García, Daniel; Lara-Resendiz, Rafael; Luna-Aranguré, Carlos; Martínez-Meyer, Enrique; Mendoza-González, Gabriela; Nava-Bolaños, Angela; Ochoa-Ochoa, Leticia M.; Prieto-Torres, David A.; Ramírez-Barahona, Santiago; Sáenz-Romero, Cuauhtémoc; Velasco, Julián A. 2023. Estado del cambio climático en México: Biodiversidad. En: Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-impactos-biodiversidad.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Recursos hídricos

El cambio climático, sumado a la creciente demanda de recursos hídricos debido al aumento poblacional, la degradación ambiental y una demanda de recursos naturales sin precedentes, presenta grandes desafíos para el sector hídrico en México. La falta de suministro de agua suficiente y de calidad adecuada, así como la deficiente gestión de las aguas residuales, constituyen problemas socioambientales de gran relevancia actualmente y que se ven agravados por los cambios en el clima^{61,62}. Estos cambios están caracterizados por gran heterogeneidad espacial y temporal, y altos niveles de incertidumbre, lo que exacerba la complejidad en la planificación y gestión del agua. El Foro Económico Mundial (FEM) prevé que durante la próxima década las crisis hídricas, la propagación de enfermedades infecciosas, la incapacidad para adaptarse al cambio climático y la pérdida de biodiversidad serán los mayores impactos sociales, con efectos interconectados a largo plazo en todo el mundo⁶³.

La investigación en recursos hídricos y cambio climático en México se encuentra dispersa, concentrada en regiones específicas, con una alta proporción de literatura gris poco actualizada.

A través de una revisión sistemática de la literatura se recopilaron y analizaron 62 documentos publicados en el periodo 1980-2022. De estos, 79% son artículos científicos y el 21% corresponde a literatura gris. El mayor número de investigaciones se concentran en la región noroeste (23%) y en el centro del país, con más de la mitad de los estudios realizados en la escala de cuenca o región hidrológica. En general, estos trabajos se centran en grandes territorios agrícolas y urbanos, particularmente en los riesgos vinculados con cambios en la disponibilidad de agua en zonas urbanas y sobreexplotación de acuíferos por irrigación intensiva en zonas áridas. Cerca de una cuarta parte de los estudios son sobre proyecciones del cambio climático y sus efectos potenciales sobre la disponibilidad del agua, balance hídrico, escurrimiento, infiltración y recarga. Otra cuarta parte se concentra en la gestión integrada de cuencas, gestión de riesgos, así como perspectivas de evolución de los recursos hídricos en el contexto de cambio climático. Alrededor de un 11% de la literatura aborda la vulnerabilidad del recurso hídrico, riesgos hidrológicos, vulnerabilidad y seguridad hídrica y de las fuentes de abastecimiento.

La disponibilidad natural del agua ha disminuido por cambios en precipitación y sequías debidos al cambio climático. Se esperan impactos importantes sobre diversos componentes del ciclo hidrológico en el país.

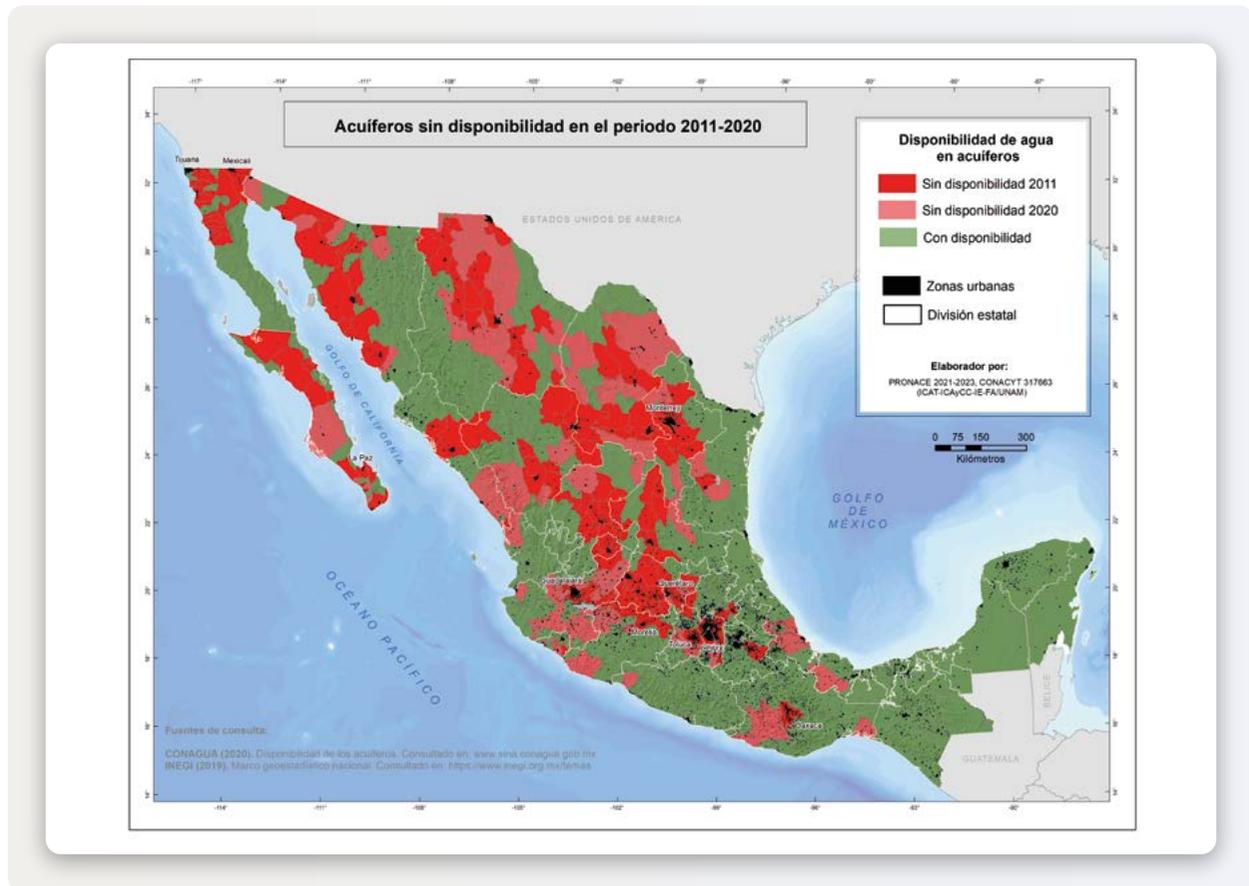
En México se explotan 451,585 millones de m³ de agua anuales, de los cuales 61% se obtiene de sistemas de agua superficial, y 39% de agua subterránea. La agricultura (59%), abastecimiento público (27.5%) y la industria autoabastecida (13.5%) representan los volúmenes concesionados dominantes^{64,65}. Se ha reportado un rápido incremento en el agotamiento y en la reducción de la disponibilidad de los sistemas de agua subterránea, pasando de 178 acuíferos sin disponibilidad en 2011 a 275 en 2020, con implicaciones en disponibilidad del agua en zonas urbanas como Monterrey,

Tijuana, Guadalajara y Ciudad de México, entre otras (véase **Figura 11**). Cerca del 42% de los acuíferos se reporta con disponibilidad comprometida y el 58% del agua subterránea es extraída de 101 acuíferos sobreexplotados^{66,67}. De acuerdo con las proyecciones de cambio climático (ver primera sección de este reporte), se espera que la escasez de agua afecte al norte y centro del país, mientras que el sur y sureste podrían verse perjudicados por su exceso. En las grandes zonas urbanas como la CDMX ya presentan una importante vulnerabilidad a la escasez, a inundaciones y a enfermedades transmitidas por el agua⁶⁸⁻⁷⁰.

La demanda de agua se ha incrementado en los últimos años, y se acrecentará bajo diferentes escenarios de cambio climático, cambio de uso de suelo y crecimiento poblacional.

La población de México se ha casi quintuplicado desde mediados del siglo XX, y se proyecta que para el año 2030 ascienda a 138 millones de personas. Actualmente, hay 35 ciudades del país que superan los 500,000 habitantes, con enormes presiones en la demanda de los servicios de suministro de agua. Esto plantea grandes retos en el contexto de cambio climático, ya que, a inicios de este siglo, más del 75% de la población urbana se ubicaba en zonas de baja disponibilidad y alto estrés hídrico⁷¹⁻⁷³.

Figura 11. Acuíferos sin disponibilidad en el periodo 2011-2020.



Fuente: Ortiz Haro, G.A., et al 2023; CONAGUA (2020). Disponibilidad de los acuíferos en <https://sina.conoagua.gob.mx>; INEGI (2019). Marco geoestadístico nacional en <https://ingi.org.mx/temas>

Se esperan impactos importantes del cambio climático sobre diversos componentes del ciclo hidrológico en diversas regiones del país.

Los eventos de sequía observada se han vuelto más frecuentes y severos, condición que se volverá más crítica como efecto del cambio climático, y tendrá impactos en diversos sectores de la sociedad. Bajo escenarios de emisiones de GEI medias y altas, se esperan impactos negativos en los sistemas hídricos del país. Se proyectan cambios en los patrones espaciales y temporales de la precipitación, con periodos de secas más largos y aumentos en contribuciones de eventos extremos a la precipitación anual^{69,72}. Algunas regiones (principalmente en el norte y centro) podrían experimentar disminuciones importantes en la precipitación total, disponibilidad de agua, volúmenes medios anuales de escurrimiento, e infiltración, y recarga de acuíferos⁷⁴. De acuerdo con las proyecciones, los impactos se vuelven más críticos debido a aumentos en la temperatura y en la evapotranspiración. La Zona Metropolitana de la CDMX podría verse afectada debido a que la precipitación anual en el

Sistema Cutzamala podría reducirse hasta un 5% para el 2050^{69,70}. En el norte del país se esperan impactos negativos en el caudal de los ríos, con reducción de su escorrentía de hasta el 60% en el largo plazo⁷⁴.

Se esperan importantes impactos negativos por el cambio climático sobre la disponibilidad de agua y, por lo tanto, en la producción agrícola, lo cual supone un alto riesgo para la seguridad alimentaria nacional.

La producción agrícola se conforma por el 25% bajo esquema de riego y 75% de temporal, siendo que la primera aporta el 40% del valor de la producción total nacional⁷⁵. A nivel país, la sequía ya ha provocado crisis relevantes en la producción de maíz y frijol, donde varios eventos de sequía entre 1940-1987 afectaron todo el territorio, siendo los estados del norte los más afectados⁷⁶.

La calidad del agua en la mayor parte de los ecosistemas acuáticos superficiales es mala, el incremento de temperaturas y la disminución de las precipitaciones incrementará esta problemática.

Actualmente, más del 90% de la población nacional habita en regiones hidrológicas con problemas de contaminación. La contaminación de cuerpos de agua por descargas de agua residual provoca una disminución en la disponibilidad de los sistemas. Existe muy poca investigación con respecto a los impactos del cambio climático sobre la calidad del agua. Sin embargo, la alteración de las fuentes de agua se podría ver acrecentada debido a las altas temperaturas y a su efecto sobre las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua^{73,77,78}.

Hay un aumento en la presencia de algas, sargazo y eutrofización de los cuerpos de agua y mares del país relacionadas con el aumento de temperatura.

La presencia de algas con potencial tóxico (i.e. cianobacterias) presente en los sistemas de agua dulce, así como un incremento de la eutrofización (enriquecimiento por nutrientes) darán como resultado una menor disponibilidad de las fuentes de abastecimiento de agua, así como la alteración de sistemas naturales y artificiales (i.e. presas). El incremento en temperatura y evapotranspiración, aunado a la disminución de lluvias, propicia la eutrofización, con efectos deletéreos para la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos. El florecimiento de la macroalga pelágica *Sargassum* spp. en zonas costeras afectan la costa norte del Caribe Mexicano desde 2011. Son eventos regionales y locales que responden a varios factores como enriquecimiento de nutrientes, incremento de la temperatura, cambios en los patrones climatológicos, además de causas aún desconocidas. El impacto de toneladas de sargazo tiene implicaciones en el funcionamiento ecosistémico y en la biodiversidad, así como impactos socioeconómicos en pesquerías, en actividades turísticas y con disrupción social a nivel local con efectos potenciales en la salud.

Problemas de infraestructura, mal manejo o ineficiente gestión del recurso, falta de infraestructura hacen más críticos los retos del cambio climático.

Gran parte de la infraestructura para la distribución del recurso hídrico se encuentra en mal estado, no existe modernización. Persisten deficiencias en la operación y mantenimiento de los sistemas de distribución de agua y en la infraestructura para el saneamiento. Se estima que no más de un 20% del agua residual entra en una planta de tratamiento, con efectos ambientales en la emisión de gases de efectos invernadero⁷⁹. La vulnerabilidad de la infraestructura es alta debido al mal estado, con una disminución en capacidad y exposición a daños por parte de terceros; esta vulnerabilidad en la infraestructura se verá acrecentada con el cambio climático. La disminución en las precipitaciones provocará una baja en la disponibilidad de agua de las fuentes superficiales, además de afectar la recarga de los acuíferos que alimentan a los sistemas de distribución. La alta impermeabilidad en las grandes urbes agrava los efectos hidrológicos, ya que hay una mayor escorrentía, seguida de una reducción de recarga de agua, y un incremento en la degradación de esta. Incrementos en temperaturas y en la frecuencia e intensidad de eventos de olas de calor aumentarán la demanda de agua, lo que podría propiciar conflictos sociales a nivel regional, nacional y transfronterizos⁸⁰.

La información presentada en esta sección proviene del siguiente reporte:

Ortiz Haro, G.A., Gress Carrasco, F., Mazari Hiriart, M., 2023. Recursos hídricos y cambio climático: una visión desde México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-impactos-recursos-hidricos.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Salud humana

El cambio climático de origen antropogénico es reconocido como una amenaza a la salud humana. Los impactos pueden ser de forma directa, relacionados principalmente con cambios en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos⁸¹ (ej. olas de calor, sequías) y de forma indirecta, mediados por el efecto en los sistemas naturales que pueden alterar la dinámica de ciclos de vida de algún patógeno particular⁸². En el segundo caso, tenemos las enfermedades de origen zoonótico, que de forma natural son transmisibles entre animales vertebrados/invertebrados y humanos. Estas enfermedades involucran una amplia gama de patógenos, incluidos virus, bacterias, hongos, protozoos y helmintos⁸³⁻⁸⁵. A nivel mundial, alrededor del 70% de enfermedades infecciosas que afectan a los humanos se originaron a partir de patógenos que circulan en animales silvestres o domésticos (patógenos zoonóticos)^{86,87}. El cambio climático puede modificar la dinámica de las enfermedades zoonóticas a través de varios mecanismos, modificando el ciclo de desarrollo del patógeno, cambios en la distribución, a nivel poblacional y fenológicos de los vectores y hospederos.

Pese a la relevancia del tema, los estudios sobre el cambio climático y salud en México son escasos, producidos por un número reducido de instituciones y existen grandes huecos de información.

Una revisión de la literatura sobre salud y cambio y variabilidad climáticos publicada en el periodo 2000-2022 produjo un total de 192 artículos de investigación. El Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional Politécnico (IPN) son responsables de más del 50% de dichos trabajos, mientras que la participación de otras instituciones académicas y de dependencias de salud federales y estatales es limitada. En cuanto a efectos directos del clima y condiciones meteorológicas, la literatura en México se ha enfocado en eventos respiratorios en vías inferiores, enfermedades cardiovasculares, enfermedad renal, suicidio, sistemas alimentarios, mortalidad por todas las causas y alacranismo. Mediante una búsqueda exhaustiva de literatura sobre nueve enfermedades víricas, parasitarias y bacterianas de importancia en el país relacionadas con el cambio climático, se identificaron grandes faltantes de información en el tema (véase **Figura 12**). La gran mayoría de la investigación en enfermedades zoonóticas y el cambio climático se ha realizado en torno a los impactos observados del dengue y su relación con temperatura y precipitación. Salvo para el caso del dengue y el fenómeno de *El Niño/Oscilación del Sur*, no existen estudios sobre los efectos de eventos extremos y variabilidad climática sobre estas enfermedades. La mayor parte de los estudios del cambio climático y enfermedades zoonóticas se han realizado a nivel estatal y, en gran medida, sobre el mosquito como vector del dengue. El desbalance en investigaciones sobre enfermedades genera vacíos de información sobre un gran número de temas que deben ser prioritarios para evaluaciones de riesgo de la emergencia y reemergencia de las diferentes zoonosis. En general, existen pocos estudios sobre los impactos futuros del cambio climático en el sector.

Cambios en la prevalencia de la infección pueden asociarse con cambios en temperatura y/o precipitación. La mayoría de esta evidencia en México se enfoca en las enfermedades zoonóticas transmitidas por vector (ETV).

En México se ha documentado que la variabilidad climática está estrechamente relacionada con la incidencia de dengue, principalmente con incrementos en temperatura y precipitación^{88,89}. Las mayores incidencias de casos de dengue se observan en temporada de lluvias (junio-octubre)^{89,90}. De forma similar, la enfermedad de Chagas tiene una estacionalidad definida con las mayores incidencias de casos en las estaciones de primavera y verano⁹¹. Para la leptospirosis (enfermedad bacteriana) se ha reportado una relación positiva entre las mayores incidencias y la temporada de mayor lluvia en Yucatán⁹². La estrecha relación entre las estaciones y la incidencia de casos clínicos son un indicativo del potencial de cambio temporal que se puede dar por las alteraciones en temperatura y precipitación ante el cambio climático.

Dengue. En México se ha documentado que la variabilidad climática está estrechamente relacionada con la incidencia de dengue, principalmente con incrementos en temperatura, humedad y precipitación^{88,89,93-99}. Las mayores incidencias de casos de dengue se observan en temporada de lluvias (junio-octubre)^{89,90} y se ha asociado con el fenómeno de *El Niño/Oscilación del Sur*^{88,89,100}. También se ha establecido una relación inversa con la altitud de la población¹⁰¹⁻¹⁰⁷. Modelos de nicho ecológico sugieren que las condiciones propicias para el desarrollo del vector están relacionadas con temperatura mínima del mes más frío, precipitación del mes más lluvioso y estacionalidad de la precipitación¹⁰⁶.

Paludismo. Se ha observado una asociación negativa entre la presencia de *Anopheles albimanus* que transmite el paludismo y la altitud¹⁰⁸. Además, en Oaxaca se ha asociado la intensidad de transmisión de malaria con áreas de clima tropical con lluvias en verano y evaporación baja¹⁰⁹.

Enfermedad de Chagas. El área de distribución de *Triatoma recurva*, un vector de la enfermedad de Chagas, está determinada por las condiciones de temperatura y precipitación durante el año, así como por factores geográficos como la altitud¹¹⁰⁻¹¹³. Sin embargo, varias especies de triatominos (vectores del patógeno de la enfermedad de Chagas) han comenzado a ser registradas en zonas templadas y a mayores altitudes, y se han registrado individuos positivos al patógeno (*Trypanosoma cruzi*). Esto se relaciona con la modificación del paisaje e incremento en la temperatura en la presencia de estas especies¹¹⁴. Esta enfermedad muestra mayor incidencia de casos en la primavera y el verano⁹¹. Se ha observado que los determinantes geo-climáticos influyen en su dispersión¹¹⁵⁻¹²⁰ y se ha establecido una asociación positiva entre la lluvia y la temperatura con la infestación del vector que transmite esta enfermedad¹²¹. Adicionalmente, se ha observado que los patrones espaciales y temporales de los triatominos y que la distribución de las diferentes especies está influenciada por el clima y tienen un patrón estacional¹¹⁶; incluso se ha observado que el incremento de la temperatura incide en la relación entre el vector y el virus¹²².

Zika. Estudios han observado que la temperatura del trimestre más cálido contribuye al riesgo de transmisión de Zika¹²³. No obstante, se ha reportado que el incremento de la temperatura disminuye la capacidad vectorial de los mosquitos¹²⁴.

Enfermedad de Lyme. Se ha observado que las regiones de gran altitud y baja temperatura tienen mayor potencial de transmisión de la enfermedad de Lyme¹²⁵. También, que las temperaturas máximas y la precipitación determinan en gran proporción la distribución de *Ixodes scapularis*, la garrapata que transmite la enfermedad¹²⁶.

Leishmaniasis. La leishmaniasis es una enfermedad que se ha relacionado con la temperatura y la precipitación¹²⁷, sugiriéndose que el nicho ecológico podría cambiar con el cambio climático¹²⁸. Adicionalmente, se ha observado que la estacionalidad de la temperatura y la precipitación representan predictores claves de la distribución de la leishmaniasis cutánea, mientras que para la leishmaniasis visceral estos son la estacionalidad de la temperatura y la temperatura media anual¹²⁹.

Leptospirosis. Es una enfermedad bacteriana que tiene una relación positiva entre mayor incidencia y la temporada de mayor lluvia en Yucatán⁹². La estrecha relación entre las estaciones y la incidencia de casos clínicos son un indicativo del potencial de cambio temporal que se puede dar por las alteraciones en temperatura y precipitación ante el cambio climático.

Figura 12. Frecuencia de los temas de investigación en la literatura revisada sobre clima, variables meteorológicas, eventos extremos, cambio climático y agentes causales de las enfermedades zoonóticas en México.

	Variables				Eventos extremos				Escala				Topico			Origen				
	Temperatura	Precipitación	Humedad	Niño/Niña	Eventos de calor	Eventos fríos	Sequías	Inundaciones	Huracanes	Incendios	Global	Nacional	Estatal	Municipal	Impactos observados	Impactos futuros	Mitigación	Adaptación	Investigación nacional	Investigación internacional
Enfermedades víricas	26	25	9	6	0	0	0	0	0	0	8	4	8	3	21	3	5	0	16	10
Dengue-patógeno	19	17	4	6	0	0	0	0	0	0	5	3	8	3	17	2	5	0	10	7
Zika-patógeno	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	2	1	1	0	0	3
Chikunguña-patógeno	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
Virus del Nilo-patógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mosquitos-vectores	10	10	4	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	3	4	2	2	0	8	2
Hantivirus-patógenos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roedores-vectores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enfermedades parasitarias	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	2	2	0	3	1
Chagas-patógeno	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
Leishmaniasis-patógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chagas-vectores	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	2	0
Leishmaniasis-vectores	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	2	0
Enfermedades bacterianas	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	1	1
Lyme-patógeno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lyme-vectores	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Leptospirosis	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Leptospirosis-vectores	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Los totales no son acumulativos ya que las categorías no son mutuamente excluyentes (es decir, un artículo podría incluir datos sobre más de un tema).

Fuente: González-Salazar, C., et al, 2023

Los agentes patógenos involucrados en las enfermedades infecciosas intestinales son virus, parásitos y bacterias, siendo los más conocidos la Salmonella, Shigella, Escherichia, Vibrio, Campylobacter y Yersinia, que se han asociado con altas temperaturas y precipitación extrema.

La prevalencia más alta de *Salmonella spp* se presenta en áreas con temperaturas entre los 35 °C y 37°C en el Noroeste de México, así como con precipitaciones superiores a los 1000 mm. Territorios clasificados como áridos y xéricos, con un periodo corto de humedad, limitan su prevalencia y distribución geográfica por presentar un bajo porcentaje de materia orgánica¹³⁰.

El cambio climático tiene el potencial de reducir o ampliar la distribución de vectores, hospederos y patógenos, transformando regiones que antes eran inhabitables en hábitats favorables.

Se ha documentado la presencia del principal mosquito transmisor del dengue (*Ae. Aegypti*) en altitudes mayores a sus límites originales (<1,200 msnm) en Xalapa, Veracruz¹³¹ y Ciudad de México¹³². Sin embargo, en estos estudios no se evalúa la presencia de algún patógeno, ni el posible rol del clima o cambios en el paisaje que hayan favorecido estos movimientos.

El cambio climático puede generar cambios en las poblaciones de vectores y hospederos, incrementando sus abundancias, favoreciendo ciclos de vida más cortos y/o cambios estacionales en su reproducción.

Se ha encontrado una relación positiva entre los patrones de abundancia de *Ae. aegypti* con mayores precipitaciones en Baja California Sur y Morelos^{101,133}. Para *Triatoma dimidiata*, vector de *T. cruzi*, el mayor número de casas infestadas por este vector se asocia positivamente con valores altos de temperatura y precipitación¹²¹.

El cambio climático favorece cambios en la carga de patógenos por cambios en las tasas de reproducción, replicación o desarrollo en los vectores.

Estudios de laboratorio han documentado que temperaturas altas aceleran el desarrollo de *Trypanosoma cruzi* en los vectores¹³⁴⁻¹³⁶. Sin embargo, este tipo de estudios se han realizado en Sudamérica y no hay observaciones en campo que evalúen este efecto y sus repercusiones en la prevalencia de los patógenos en las poblaciones de vectores o en la emergencia de casos clínicos.

Los estudios prospectivos sobre los cambios en la distribución de vectores sugieren un incremento en las zonas con condiciones climáticas favorables para su presencia, y consecuentemente, un mayor riesgo de contacto con nuevas poblaciones humanas.

Para México se han realizado proyecciones de la distribución de mosquitos (*Aedes*) vectores de los virus de dengue, Zika y chikunguña^{137,138}; de chinches (*Triatoma sp*) vectores de *T. cruzi*^{114,115}, de garrapatas (*Ixodes sp.*) vectores de *Borrelia sp.*¹²⁶ y para flebótomos (*Lutzomyias sp*) vectores de *Leishmania sp*^{127,128}.

Las enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores son una de las principales causas de muerte en México y se han asociado a los cambios en la temperatura como con la exposición a ozono (O₃), un Contaminante Climático de Vida Corta.

Diversos estudios muestran una fuerte asociación entre condiciones de temperatura y humedad con estas enfermedades respiratorias. Temperaturas superiores a 33.2 °C están correlacionadas con incrementos en las infecciones respiratorias agudas en menores de 5 años¹³⁹. Asimismo, un aumento de 1 °C en la temperatura reduce 13% la transmisión del COVID-19 y 7.5% su mortalidad, mientras un aumento de 1g/m³ en la humedad absoluta se asocia con una disminución de 11.41% en la mortalidad por este virus¹⁴⁰. En la Ciudad de México, el número de infecciones diarias confirmadas se relaciona con la temperatura y con el flujo de entrada de aire¹⁴¹. También se ha documentado una asociación positiva entre la exposición a O₃ con los casos de infecciones y muertes por COVID-19¹⁴². Un incremento en los niveles de O₃ está asociado con un aumento de 10% en síntomas respiratorios en niños asmáticos¹⁴³, y con la mortalidad respiratoria en niños de bajo nivel socioeconómico de la Ciudad de México¹⁴⁴.

Las enfermedades del corazón constituyen la principal causa de mortalidad a nivel nacional y se han asociado tanto con el decremento como el incremento en la temperatura.

El incremento en el riesgo de mortalidad por causas cardiovasculares en Zonas Metropolitanas de México es 7.1% para temperaturas frías [0.01, 14.7] y 7.1% para cálidas [0.6, 14.0], respectivamente¹⁴⁵. Adicionalmente, existe evidencia consistente de una asociación positiva entre la exposición a corto plazo de O₃ con un aumento en las visitas al servicio de urgencias por causas cardiovasculares¹⁴⁶.

Recientemente, el incremento de la temperatura ha sido considerado un factor de riesgo para enfermedad renal, debido a los periodos de deshidratación y el metabolismo de ciertas hormonas esenciales para el equilibrio hídrico.

Este padecimiento se ha asociado a episodios repetidos de exposición a temperaturas elevadas. Un estudio sobre enfermedad renal en Mesoamérica, sugiere un incremento de la carga de esta enfermedad con temperaturas máximas medias anuales superiores a 30 °C y en hombres dedicados al cultivo de caña de azúcar en las costas del Pacífico¹⁴⁷.

Se ha observado que el patrón de suicidios tiene fluctuaciones estacionales que podrían relacionarse con los cambios en las actividades sociales y la exposición a variables como temperatura y luz solar.

A pesar de que existe un vacío importante en la investigación sobre la salud mental y la exposición a cambio climático en México, se ha reportado una asociación entre la temperatura y los riesgos asociados a la salud mental, como son las tasas de suicidio¹⁴⁸. En México, la estacionalidad puede

incrementar el riesgo de suicidio¹⁴⁹ con un riesgo relativo de 1.24 [1.16, 1.32]. Adicionalmente, los días sin lluvia y temperaturas entre 30 °C y 40 °C se asocian con suicidio en hombres¹⁵⁰.

La incidencia de picaduras de alacrán muestra un fuerte patrón estacional que se correlaciona con variables climatológicas.

Se ha documentado¹⁵¹ un menor número de picaduras de alacrán con temperaturas por debajo de los 16 °C. Por cada 1 °C de aumento en la temperatura, los casos de picaduras de alacrán se incrementan un 9.8% en las regiones más cálidas del estado de Morelos¹⁵².

La exposición a temperaturas no óptimas se ha asociado con un incremento en la mortalidad por todas las causas, así como por causas específicas.

La temperatura mínima de mortalidad (TMM) se ha utilizado como indicador de temperaturas no óptimas. Un estudio multi-país que incluye a México, sugiere que el rango de la TMM varía entre 14.2 °C y 31.1 °C y proporciona evidencia sobre la adaptación a largo plazo al clima local¹⁴⁹. Análisis realizados para zonas metropolitanas de México han documentado una relación no lineal (U o J invertida) entre la exposición a corto plazo de la temperatura con la mortalidad, con un riesgo de mortalidad por todas las causas de 6.3% y 10.2% para temperaturas frías y cálidas, respectivamente¹⁴⁵. Son escasos los estudios que utilizan escenarios de cambio climático. Sin embargo, uno de ellos sugiere un incremento en la mortalidad relacionada con el calor entre 3.0% (-3.0 a 9.3) en América Central a 12.7% (-4.7 a 28.1) en el sureste de Asia bajo el escenario RCP8.5¹⁵³.

La precipitación y la temperatura se han asociado al consumo de alimentos procesados.

En México se ha reportado que la reducción anual de 0.5 mm en la precipitación y un incremento anual de 0.1 °C están asociadas con un menor consumo de alimentos no procesados y un mayor consumo de alimentos ultraprocesados, principalmente en las regiones tropicales¹⁵⁴.

La información presentada en esta sección proviene de los siguientes reportes:

Hurtado-Díaz, M., Rangel-Moreno, K., Riojas-Rodríguez, H., 2023. Estado del arte de la investigación en salud y cambio climático en México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-salud-humana.pdf>

González-Salazar, C., García Peña, G., Zarza Villanueva, H., Aguirre-Peña A., Fernández-Castel, K.P.J., Saldaña Rangel, I.E., Becker, I., Stephens, C.R., 2023. Salud: Enfermedades zoonóticas. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-salud-zoonosis.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Impactos socioeconómicos

El cambio climático se caracteriza por tener impactos persistentes e incluso irreversibles, por amplificar y retroalimentar diversos problemas socioambientales concurrentes e inequidades, así como por la existencia de puntos críticos que pueden modificar de forma dramática el comportamiento del mismo sistema climático o de sistemas influenciados por él. Las consecuencias del cambio climático para nuestro país son profundas y multidimensionales, muy heterogéneas tanto en espacio como al interior y entre grupos sociales, sectores y sistemas naturales^{18,53,155-157}. Más aún, existen sinergias e interacciones entre estos riesgos y otros problemas socioambientales existentes que pueden amplificar sus consecuencias y dificultar su manejo, así como limitar la adaptación. De esta forma, el fenómeno podría comprometer significativamente el desarrollo socioeconómico del país, así como la consecución de los objetivos del desarrollo sostenible^{3,158-162}.

En este texto se abordan los impactos físicos del fenómeno, haciendo énfasis en aquellos denominados como crónicos o graduales y no en aquellos agudos que son producto de, por ejemplo, extremos climáticos o hidrometeorológicos. No se abordan los riesgos de transición asociados con cambios en políticas energéticas o de regulación, ni los costos de inversión encaminados a alcanzar un mundo con menores emisiones de contaminantes climáticos.

Impactos económicos agregados del cambio climático en México bajo escenarios de inacción y de política

Bajo un escenario de inacción, los costos económicos del cambio climático para México serían enormes.

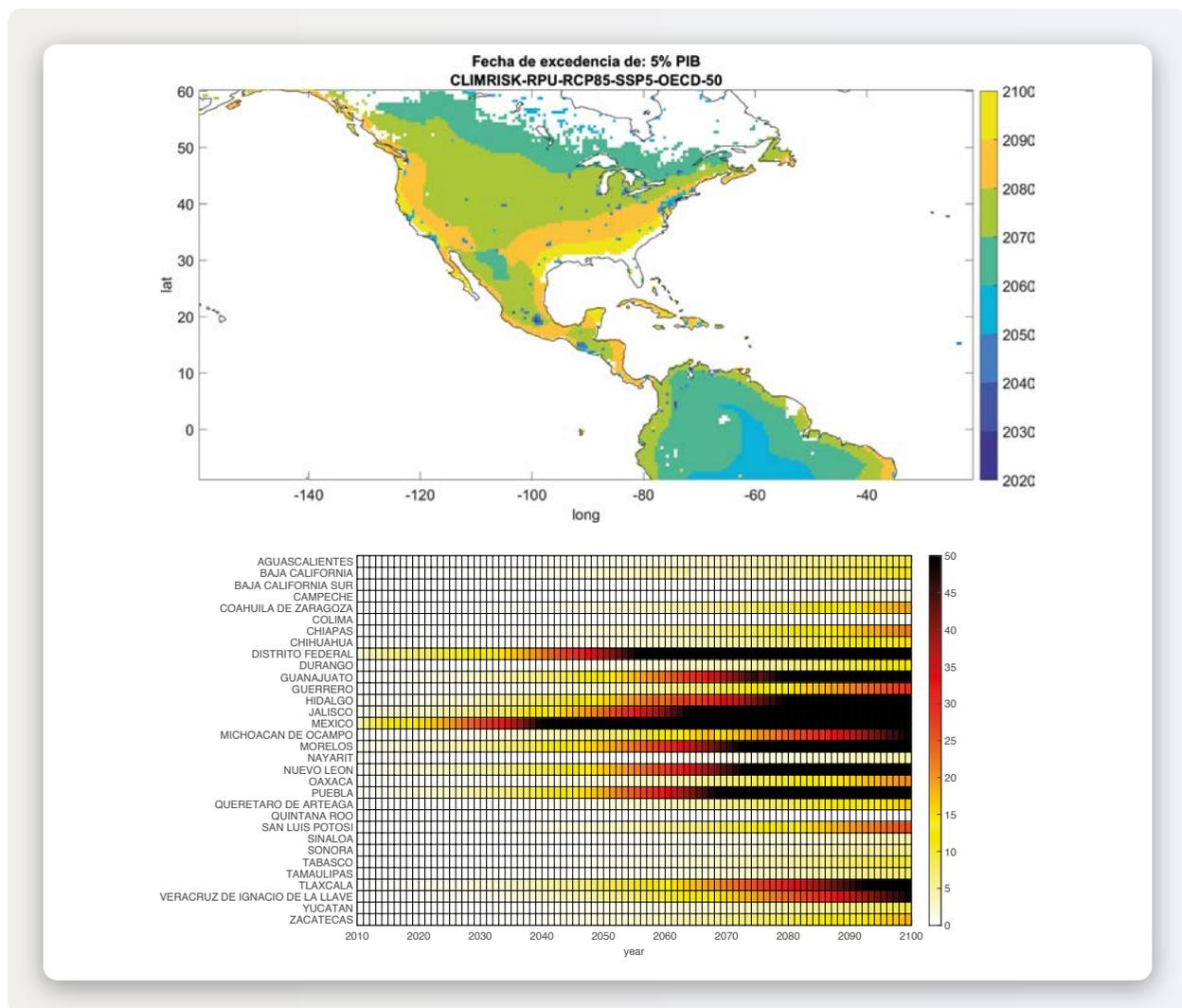
Bajo un escenario de muy altas emisiones de GEI (SSP585), los costos acumulados durante este siglo serían comparables a perder entre el 85% y hasta 5 veces el PIB actual de México³. Las estimaciones incluyen el calentamiento local en ciudades producido por la urbanización y la persistencia de los impactos del cambio climático. En este escenario de inacción, la mayor parte de México tendría pérdidas anuales iguales o mayores a 5% del PIB local durante este siglo como consecuencia del cambio climático. En los grandes centros urbanos, este umbral podría rebasarse en el periodo 2030-2040.

La distribución de los impactos económicos del cambio climático será cada vez más desigual entre y al interior de las distintas regiones y estados del país.

Los impactos del cambio son el resultado de la interacción de múltiples factores tales como exposición, amenaza y sensibilidad, teniendo cada uno de ellos distribuciones muy heterogéneas a través del espacio. De esta forma, los costos del cambio climático no se distribuyen de manera uniforme geográficamente, ni entre los distintos grupos sociales, sectores o actividades.

A nivel estatal, los cinco estados con mayores pérdidas económicas agregadas acumuladas durante el siglo son Estado de México, CDMX, Jalisco, Puebla y Morelos (véase **Figura 13**). Para el 2050, algunos de estos estados podrían representar pérdidas anuales superiores a \$20 mil millones de dólares (EdoMex, CDMX, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Morelos). Bajo un escenario de altas emisiones de GEI y crecimiento económico (SSP585), el valor presente promedio para los estados de los impactos del cambio climático durante este siglo sería cercano a tres veces su PIB actual, aunque algunos estados enfrentarían impactos considerablemente mayores.

Figura 13. Impactos económicos del cambio climático para México.



Panel superior: Fecha estimada en la que los impactos del cambio climático rebasarían el 5% del PIB en cada punto de malla. Panel inferior: Pérdidas económicas anuales por el cambio climático para los estados del país durante el periodo 2010-2100 (miles de millones de dólares).

Fuente: Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., 2023.

Las grandes ciudades podrían ser particularmente afectadas por el cambio climático, debido a la confluencia de problemas ambientales y alta exposición. Un escenario de inacción implica en el futuro cercano grandes pérdidas económicas y altos niveles de riesgo para grandes centros urbanos en el país.

A nivel global, las ciudades se caracterizan por una exposición desproporcionada (80% del PIB y más del 50% de la población mundiales) y por la confluencia de otros problemas socioambientales. Uno de los problemas socioambientales que más podría amplificar los efectos negativos del *cambio climático global* en las grandes urbes es el *cambio climático local* causado por el fenómeno de isla de calor¹⁶¹. En el caso de México, los costos por los efectos conjuntos del cambio climático global y local son cerca del doble de aquellos obtenidos al considerar únicamente los efectos del cambio climático global. Estas áreas experimentarían grandes pérdidas económicas en el futuro cercano o incluso en el presente. En las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, las pérdidas causadas por el cambio climático podrían rebasar los mil millones de dólares anuales en la década del 2020. Las áreas que rodean estos grandes centros urbanos podrían rebasar este umbral de pérdidas durante las décadas del 2030 y 2040. Este resultado subraya la necesidad de combinar estrategias de mitigación a nivel internacional con acciones de adaptación locales ¹⁶¹.

Muchos de los impactos que se proyectan para la próxima década no son evitables mediante esfuerzos de mitigación únicamente. Para estos impactos, la implementación de estrategias de adaptación y reducción de riesgo constituyen instrumentos de política efectivos.

La inercia de los sistemas climático, social y económico hacen que los cambios que se prevén en el clima en el futuro cercano sean, en gran medida, inevitables. Los esfuerzos de mitigación internacionales por sí solos no lograrán reducir algunos de los riesgos e impactos del cambio climático, independientemente de qué tan importantes sean dichos esfuerzos. Sin embargo, estos impactos se pueden reducir mediante la implementación de estrategias de adaptación y de reducción de riesgo.

Las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (CDN) son únicamente un primer paso para combatir el cambio climático. Sin embargo, su cumplimiento representaría una reducción de riesgo importante para México.

El cumplimiento de las CDN representaría una reducción de alrededor del 20% de las pérdidas económicas para México con respecto al escenario de inacción. Los beneficios del cumplimiento del escenario CDN se encontrarían entre 28% y 71% del PIB actual. Sin embargo, los costos residuales ascenderían entre 68% y cuatro veces el PIB actual. Para gran parte de México, este escenario lograría retrasar entre 2 y 3 décadas la fecha para rebasar umbrales de riesgo, tales como en pérdidas por el cambio climático superiores al 5% del PIB y en aumentos de al menos 4 °C en la temperatura anual.

El incumplimiento de actores clave en las CDN tendría costos significativos para el país y haría menos eficientes los esfuerzos internacionales de mitigación de los GEI.

La falta de cumplimiento de actores clave en los acuerdos internacionales de mitigación impondría costos para todos los países. Si Estados Unidos decidiera no participar en las CDN, esta decisión impondría un costo para México en el rango de 5% a 28% del PIB actual. El incumplimiento de China impondría costos para México en el rango de 4% a 36% del PIB actual.

Un escenario de mitigación profunda en la emisión de GEI que cumpliera con las metas del Acuerdo de París, representaría importantes beneficios para México en términos de pérdidas evitadas y reducción de riesgo.

Un escenario que limitara el aumento en la temperatura global por debajo de los 2 °C sobre su valor preindustrial, reduciría a la mitad los costos económicos del cambio climático para México y evitaría rebasar muchos de los umbrales climáticos críticos para el país. Sin embargo, aun bajo este escenario de mitigación profunda, los costos residuales son considerables (entre 45% y 241% del PIB nacional actual) y subrayan la necesidad de complementar las políticas de mitigación con estrategias de adaptación.

Estimaciones de los impactos y riesgos del cambio climático en sectores específicos.

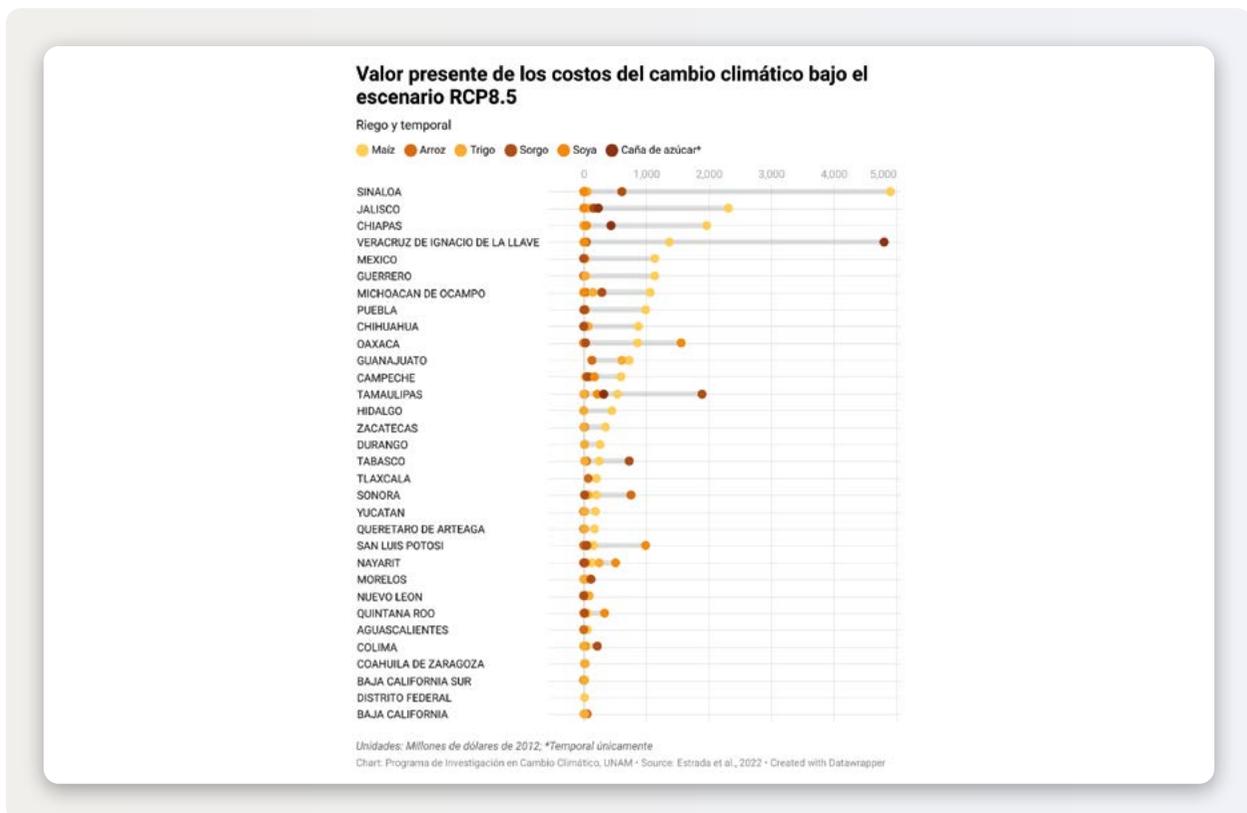
Los impactos del cambio climático son muy heterogéneos y pueden representar costos o beneficios al interior de un mismo sector, así como implicar incrementos o reducciones de riesgo. En general, para los sectores analizados, el cambio climático implica grandes costos económicos para la mayor parte de los estados. Aun bajo los escenarios de política más ambiciosos, los impactos residuales podrían ser muy altos.

Bajo un escenario de inacción, el cambio climático puede reducir drásticamente la capacidad de producción agrícola en México y con ello imponer costos socioeconómicos considerables a las generaciones presentes y futuras.

Para cultivos como maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo, arroz y soya, un escenario de inacción implica reducciones en rendimientos entre 5% y 20% en las próximas dos décadas y de hasta 80% a finales del siglo para algunos cultivos y estados. Los estados con mayor aptitud para producción de maíz de temporal actualmente podrían perder, a finales del siglo, entre un 30% y 40% sus rendimientos. A nivel nacional, el valor presente de los costos del cambio climático en este siglo en maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo, arroz y soya representan \$38 mil millones de dólares (véase **Figura 14**), cerca de dos veces el producto agrícola total nacional en 2012. El 69% de estas pérdidas provienen de cultivos de temporal, mientras que las reducciones en rendimientos de maíz representan el 70% de las pérdidas económicas totales. Veracruz, Sinaloa, Tamaulipas y Jalisco suman aproximadamente la mitad de dichas pérdidas. Un 16% de las pérdidas económicas totales ocurren en estados como

Chiapas, Oaxaca, y Guerrero, que están caracterizados por altos niveles de marginación, pobreza y agricultura de subsistencia. El cambio climático aumentará considerablemente los riesgos que los productores de subsistencia ya enfrentan en el presente.

Figura 14. Valor presente de los costos del cambio climático bajo el escenario RCP8.5



Valor presente de los costos del cambio climático en maíz, arroz, trigo, sorgo, soya y caña de azúcar. Incluye temporal y riego, con la excepción de caña de azúcar para la que se reporta riego únicamente. Cifras en millones de dólares.

Fuente: Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., 2023.

Bajo el cumplimiento del Acuerdo de París, se lograría evitar gran parte de las pérdidas en el sector. Sin embargo, los impactos residuales son considerables y es necesaria la implementación de estrategias de adaptación en el corto plazo.

Un escenario consistente con los objetivos del Acuerdo de París lograría limitar de manera significativa las pérdidas en la mayoría de los cultivos. En el caso de la producción de maíz (temporal y riego) se lograría disminuir las pérdidas económicas en un 57% a nivel nacional, mientras que para trigo y arroz las reducciones serían de 23% y 41%, respectivamente.

Los riesgos por inundaciones fluviales en México ya son actualmente elevados y se proyecta un importante incremento, debido al cambio climático y al aumento en exposición socioeconómica.

Actualmente, el costo total en México por inundaciones fluviales es de aproximadamente \$7 mil millones de dólares por año y el estado promedio tiene un daño anual esperado por inundaciones fluviales de \$200 millones de dólares. Tamaulipas, Veracruz y San Luis Potosí son los estados con mayores niveles de riesgo con daños anuales esperados entre \$400 y \$800 millones de dólares. A nivel nacional, para el 2080 y bajo el escenario RCP8.5, el daño anual esperado podría alcanzar los \$112 mil millones de dólares, tanto por cambios en las condiciones socioeconómicas como en el clima (véase **Figura 15**). En comparación con condiciones climáticas actuales, los estados con mayores cambios en riesgo por inundación fluvial, se encuentran en el centro del país.

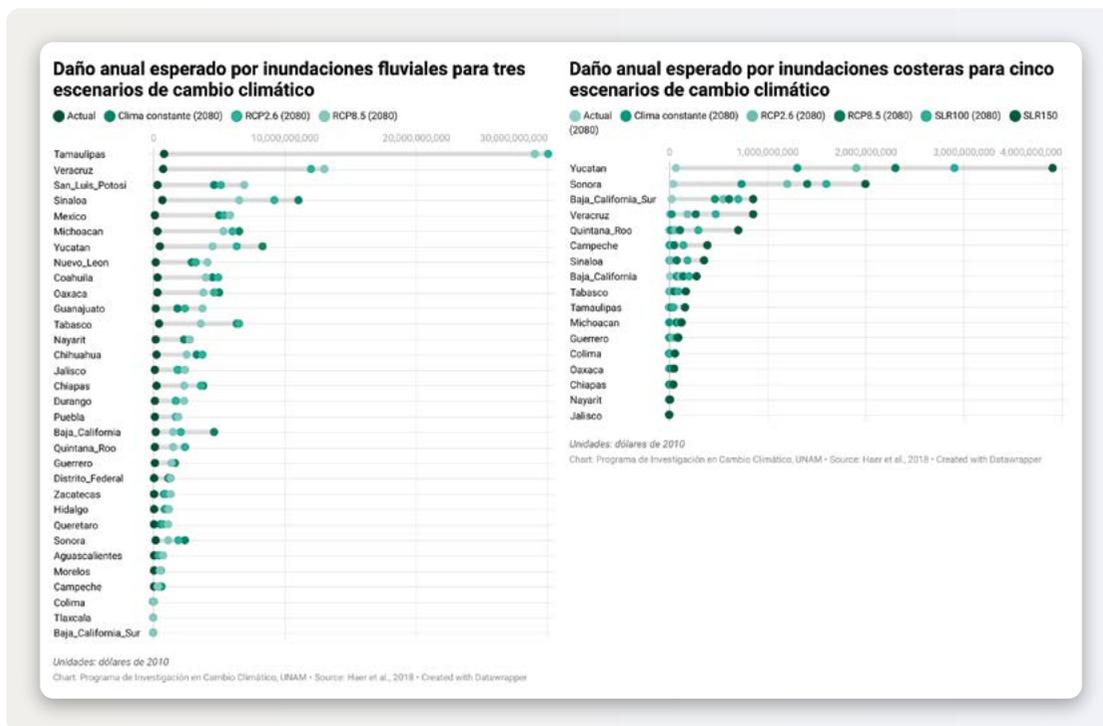
El riesgo por inundaciones costeras en México aumentará de forma considerable durante este siglo debido al incremento esperado en exposición y al aumento en el nivel del mar provocado por el cambio climático.

Actualmente, el daño anual esperado por inundaciones costeras es cercano a \$130 millones de dólares por año. Para el 2080 se proyecta que, debido a cambios en condiciones socioeconómicas únicamente, el daño anual esperado aumentaría a \$2 mil millones de dólares por año. El efecto combinado del desarrollo socioeconómico en regiones costeras y el incremento proyectado en el nivel del mar, llevaría a daños esperados de hasta \$10 mil millones de dólares anuales.

El aumento en el nivel del mar incrementará el riesgo por inundación en todos los estados costeros del país. Sin embargo, algunos estados experimentarán impactos mucho mayores.

Yucatán es el estado con mayor riesgo por inundación costera del país, con un daño anual esperado de \$67 millones, actualmente que bajo condiciones de cambio climático podría aumentar hasta 4 mil millones de dólares. Otros estados que enfrentarían importantes aumentos en el riesgo por inundaciones costeras son Campeche, Sonora y Baja California Sur como se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15. Daño anual esperado por inundaciones fluviales y costeras a nivel estatal y para distintos escenarios de cambio climático.



Daño anual esperado por inundaciones fluviales y costeras a nivel estatal y para distintos escenarios de cambio climático. Actual: condiciones climáticas en 2010; Clima constante: clima de 2010 con cambios socioeconómicos al año 2080; RCP2.6: escenario con cambios socioeconómicos y en el clima acordes con el escenario de emisiones RCP2.6 en el 2080; RCP8.5: escenario con cambios socioeconómicos y en el clima acordes con el escenario de emisiones RCP8.5 en el 2080; SLR100: escenario con cambios socioeconómicos y aumento en el nivel del mar de 1 metro; SLR150: escenario con cambios socioeconómicos y aumento en el nivel del mar de 1.5 metros. Cifras en doalres de 2010.

Fuente: Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., 2023.

La información presentada en esta sección proviene de los siguientes reportes:

Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., 2023. Impactos económicos del cambio climático en México. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-impactos-economicos.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Emisiones y políticas de mitigación en México

México contribuyó con el 1.10% de las emisiones globales de dióxido de carbono en 2021, tiene emisiones per cápita menores al promedio global y ha contribuido únicamente con el 1.19% de las emisiones acumuladas globales⁵. A pesar de esto, es un país de importancia en el contexto de las acciones de mitigación internacional, siendo el 13° mayor emisor de GEI. En esta sección se analizan inventarios de emisiones y sumideros de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GYCEI) de México, generados en diversos estudios y plataformas, comparándolos con los datos oficiales del Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Invernadero (INEGYCEI). Se muestra el desbalance en la literatura sobre los GYCEI, ya que la mayor parte de los artículos científicos se ha enfocado únicamente en emisiones de CO₂. También se analizan los principales avances y logros de la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) en materia de mitigación, realizados posterior a la comunicación nacional de México más reciente¹⁶³.

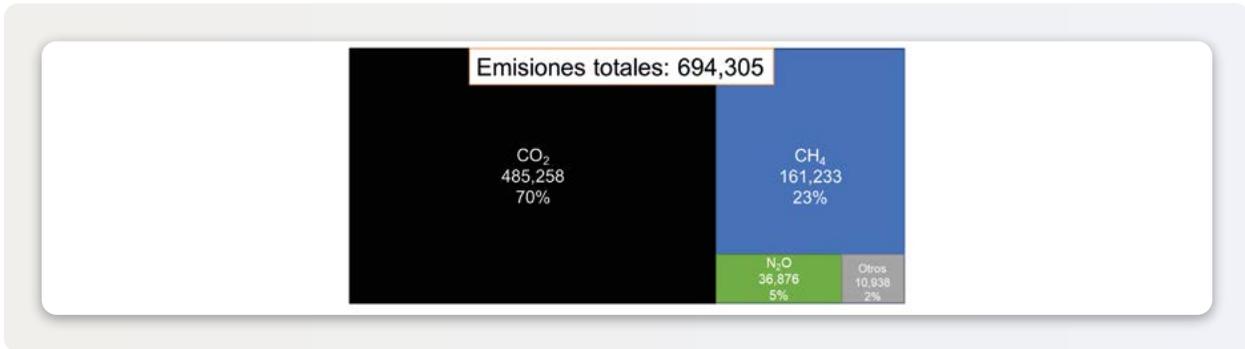
Inventario de emisiones

En las dos décadas (2000-2019) las emisiones totales de GYCEI ascendieron a 694,305.6 Gg CO₂e año⁻¹ en promedio, de acuerdo con los datos INEGYCEI.

Los ecosistemas terrestres reincorporaron 23% de estas emisiones. De las emisiones totales restantes, el 70% corresponde a CO₂, seguidas por CH₄, y en tercer lugar el N₂O (véase **Figura 16**). Existen discrepancias entre los valores reportados por el INEGYCEI, la literatura especializada y los derivados de productos de mediciones globales independientes, así como faltantes críticos de información. Discernir la naturaleza de las discrepancias y cubrir la falta de información son esenciales para la investigación científica futura y la toma de decisiones en torno a las políticas de mitigación de los GEI.

5 <https://ourworldindata.org/co2/country/mexico#what-are-the-country-s-annual-co2-emissions>

Figura 16: Balance anual promedio de emisiones de GYCEI en México de 2000-2019. Todas las unidades se encuentran presentadas en Gg CO₂e año⁻¹.

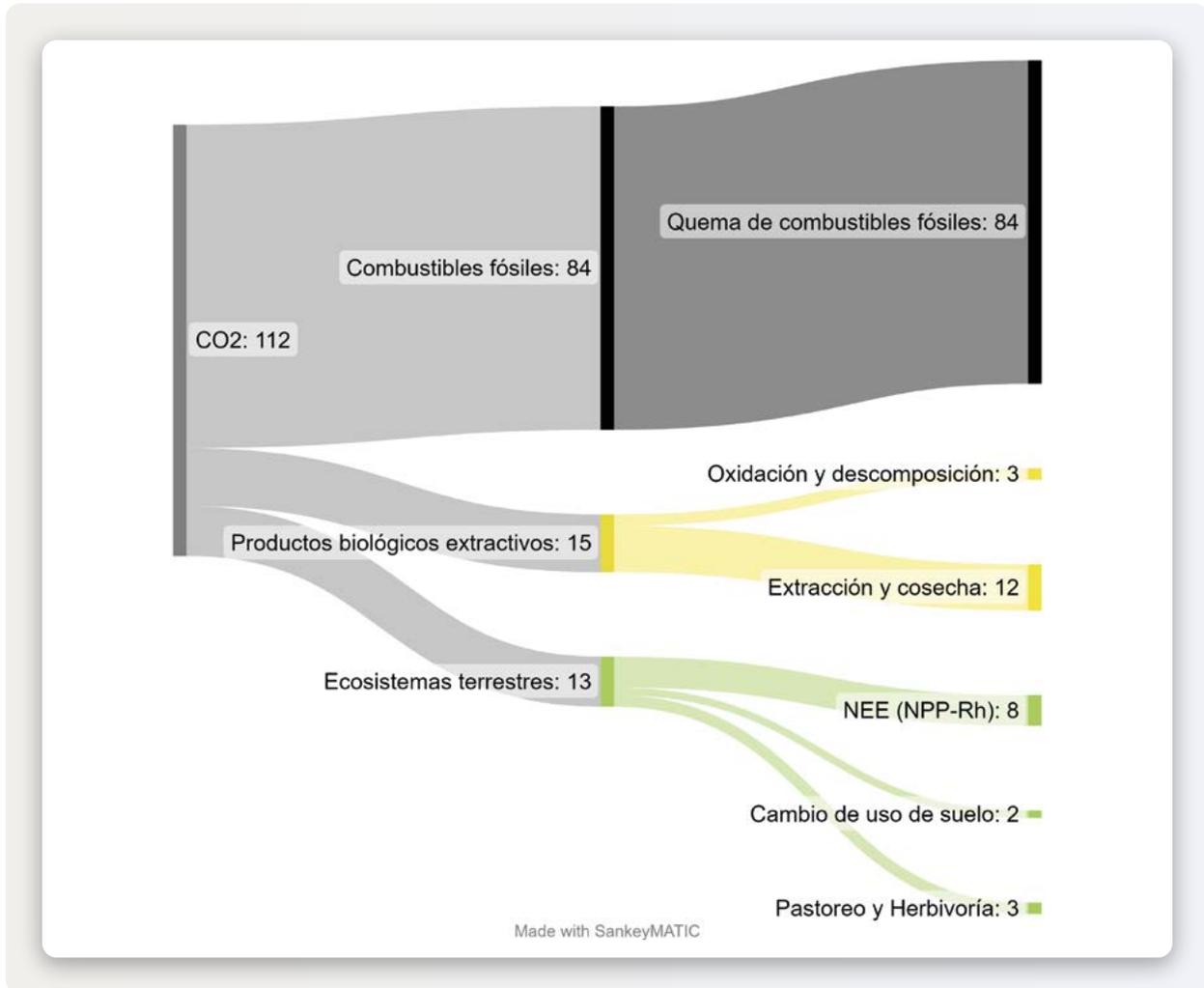


Fuente: Murray Tortarolo, G.N., et al 2023. Elaborado con información del INEGYCEI 1990-2019, SEMARNAT, INECC, 2022.

El flujo de emisiones de CO₂ más importante a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles.

La emisión de CO₂ por la quema de combustibles fósiles es el flujo más estudiado y reportado en la literatura y para el cual existe una amplia coincidencia entre las estimaciones provenientes de diferentes fuentes. Esto otorga mucha confiabilidad al valor anual promedio reportado de 460 Tg CO₂e año⁻¹ para las últimas dos décadas (véase **Figura 17**).

Figura 17: Artículos con datos reportados para flujos de CO₂ a nivel nacional o regional.



Los números representan el número de artículos que reportan cada flujo.

Fuente: Murray Tortarolo, G.N., et al 2023.

El segundo flujo de mayor importancia es el sumidero de CO₂ de los sectores Agricultura, Silvicultura y Otros Usos (AFOLU, por sus siglas en inglés). No obstante, las discrepancias entre las estimaciones de este flujo son de un orden de magnitud.

El INEGYCEI estima que los ecosistemas de México capturan un promedio de -165 Tg CO₂e año⁻¹ durante las últimas dos décadas (36% las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustibles fósiles). En contraste, los datos provenientes de productos globales estiman que México ha sido un sumidero pequeño de C en las últimas dos décadas, con un valor de solo -35 Tg CO₂e año⁻¹, y que en ciertos años se vuelve una fuente. Identificar el origen de estas discrepancias para

tener una estimación confiable es posiblemente la prioridad más importante de investigación entre los faltantes de información de GYCEI en México y de importancia crítica para la correcta dirección de la política pública nacional de mitigación de los GEI.

El flujo de CH₄ más importante a la atmósfera proviene del sector AFOLU, para el cual existe una alta coincidencia entre las distintas estimaciones, y es además el más estudiado. El segundo flujo es la quema de combustibles fósiles.

El 82% de las emisiones de CH₄ proviene del sector AFOLU (131-145 Tg CO₂e año⁻¹), particularmente de la ganadería (70 Tg de CO₂e año⁻¹), seguido por la descomposición de residuos (38-50 Tg CO₂e año⁻¹) y las emisiones agrícolas (incluyendo arrozales, extracción y manejo de estiércol; 17-21 Tg CO₂e año⁻¹). El flujo por quema de combustibles fósiles representa un 18% de la contribución a las emisiones totales (28 Tg CO₂e año⁻¹) promedio durante las últimas dos décadas. Un faltante crítico de información de CH₄ corresponde a las emisiones provenientes de los humedales, quema de biomasa en estufas y consumo del compuesto en el suelo.

El flujo de N₂O más importante proviene del sector AFOLU y las estimaciones de diferentes fuentes coinciden. No obstante, no existen trabajos reportados en la literatura científica.

La mayor parte de las emisiones de N₂O están concentradas en el sector AFOLU. La oxidación de fertilizantes inorgánicos y la emisión resultante de este gas representa casi la totalidad de las emisiones. Las estimaciones del inventario nacional en su último reporte y de los productos globales coinciden en magnitud (30 Tg CO₂e año⁻¹), aunque este flujo no ha sido reportado en la literatura científica.

Las emisiones de N₂O debidas a la quema de combustibles son un componente menor del flujo, pero las estimaciones discrepan.

Las mayores discrepancias en las estimaciones de los flujos de este compuesto se encuentran en las emisiones por combustibles fósiles: los productos globales estiman el doble de los valores del inventario.

Aunque los flujos de carbono negro (CN) son de menor magnitud que los demás GYCEI, su importancia destaca en las grandes ciudades por su impacto en la salud humana.

El promedio de emisiones de CN en México es de 76.88 Gg, con la quema de combustibles fósiles como flujo más importante (90%), seguido por el sector AFOLU (8%) y residuos (2%). La información sobre el CN proviene de estudios sobre la calidad del aire en zonas urbanas (50%), el uso de leña como energía (19%) y el transporte (13%). El 44% de las investigaciones corresponden a las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, mientras que el 19% reportan estimaciones a nivel país.

La información presentada en esta sección proviene del siguiente reporte:

Murray Tortarolo, G.N., Perea K., Mendoza, A., Jaramillo, V.J., Murguía-Flores, F., Martínez-Arroyo, M.A., García García, M.A., Vargas, R., 2023. Flujos de gases y compuestos de efecto invernadero en México en décadas recientes (2000-2019). En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-emisiones-flujos-gycei.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Política nacional de cambio climático en materia de mitigación y adaptación

Dada la naturaleza compleja y multidimensional del cambio climático, las estrategias para enfrentarlo requieren estar basadas en el conocimiento, establecer estructuras institucionales que propicien la transversalidad de las acciones, y contar con mecanismos dinámicos y flexibles de construcción, implementación y seguimiento de políticas públicas, acordes con un proceso cambiante. Las políticas gubernamentales sobre el cambio climático, no son solo instrumentos para la gestión, sino que requieren de un engranaje entre el conocimiento de los distintos aspectos del cambio climático, las acciones necesarias para enfrentarlo en los diversos sectores de la sociedad, la formulación de normativas que regulen su ejecución, un monitoreo que permita la evaluación de sus resultados y la aplicación de medidas correctivas o complementarias, cuando las condiciones del fenómeno hayan cambiado o se tenga un mejor conocimiento aplicable.

La construcción de políticas públicas basadas en el conocimiento requiere de metodologías construidas por trabajo multidisciplinario, e instituciones gubernamentales especializadas en el tema.

En México se cuenta con una *Ley General de Cambio Climático* (LGCC) que establece un arreglo institucional transversal para el tema, a nivel federal, y crea un *Sistema Nacional de Cambio Climático* con participación estatal, municipal y del Poder Legislativo a nivel nacional y subnacional. Este sistema incluye, de manera relevante, un organismo científico-técnico (el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC) que además de integrar, generar, y divulgar conocimientos sobre el cambio climático en México a nivel nacional e internacional, tiene una función específica de acompañamiento y evaluación técnica de las políticas públicas en cambio climático, a través de una *Coordinación de Evaluación* (CE) con participación de expertos del sector académico y social.

Desde 2018, se han realizado 2 modificaciones a la *Ley General de Cambio Climático* (LGCC) con implicaciones en materia de mitigación. Estas enmiendas formalizan los compromisos adquiridos como parte del Acuerdo de París (AP) y fortalecen el establecimiento de un *Sistema de Comercio de Emisiones de México* (SCE). Sin embargo, otras medidas jurídico-administrativas como la extinción del fideicomiso público destinado al *Fondo para el Cambio Climático* no permiten vislumbrar los instrumentos para captar y canalizar recursos financieros para apoyar acciones de mitigación y adaptación al cambio climático.

La evaluación de las políticas públicas en cambio climático refleja la dinámica entre el conocimiento científico y la administración pública.

La Coordinación de Evaluación del INECC, realizó dos evaluaciones estratégicas de la política nacional y una sobre las políticas subnacionales. La primera de ellas abordó el *Programa Especial de Cambio Climático* (PECC) 2014-2018¹⁶⁴ y la segunda, el *Anexo transversal del Presupuesto de Egresos de la Federación en materia de Cambio Climático* (AT-CC) 2013-2017¹⁶⁵. El PECC y el AT-CC son los

instrumentos más importantes de financiamiento federal a la política nacional de cambio climático. Sin embargo, la evaluación no fue sobre los recursos económicos, sino sobre los criterios técnicos para diseñarlos detectando importantes incongruencias entre los criterios de asignación de recursos para mitigación y adaptación, a través del AT-CC, y los objetivos y actividades planteados en la Política Nacional de Cambio Climático. Tampoco existía concordancia con el PECC. Asimismo, en materia de mitigación, la *Cordinación de Evaluación* llevó a cabo una evaluación a nivel subnacional, integrando atribuciones de los tres órdenes de gobierno en temas seleccionados (generación de energía eléctrica, transporte terrestre y gestión de residuos sólidos urbanos)¹⁶⁴. En estas evaluaciones se generó material base para proyectos de investigación que ayudarían a encontrar soluciones a algunos problemas técnicos, económicos y socioambientales, entre otros.

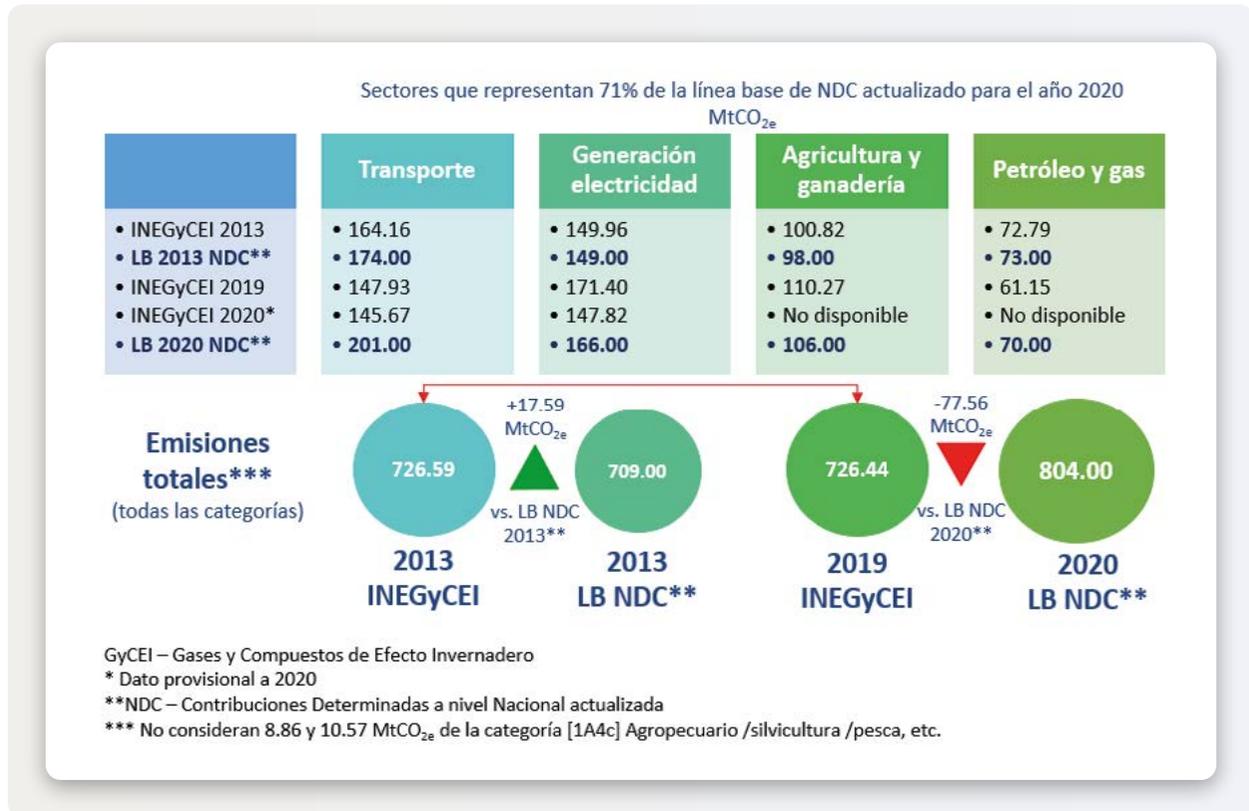
Identificar limitaciones, corregir y dar seguimiento a la implementación de las políticas, de manera sistemática, puede ser tan importante como la formulación científica de las propias medidas.

Esta coordinación también desarrolló los Indicadores para la Evaluación de la Política Nacional de Cambio Climático que caracterizan elementos relevantes para identificar el avance de la política en esta materia¹⁶⁶. Aquí cabe resaltar la participación de los consejeros sociales de la CE provenientes de la academia o del sector privado, junto con personal científico y técnico del sector gubernamental. Sin embargo, hace falta mayor transparencia y acceso a la información para estimular la participación de más científicos sociales en estas tareas.

La evaluación desde la academia del cumplimiento de México de su Contribución Determinada a nivel Nacional no está sistematizada y presenta discrepancias relacionadas con la transparencia en la información.

Mientras que la información oficial presenta datos que sugieren que México se encuentra en una ruta adecuada para el cumplimiento de su CDN, análisis más detallados por sector pueden señalar oportunidades de mayor ambición. En la **Figura 18** se puede observar, por ejemplo, que aun cuando en el año 2020 la generación de energía eléctrica presentó una disminución de alrededor de 2 MtCO₂e respecto al año 2013, este valor es superior a sus emisiones prospectivas en alrededor de 63 MtCO₂e y 47 MtCO₂e considerados por la SENER en su *Reporte Anual de Potencial de Mitigación de GEI en el Sector Eléctrico*¹⁶⁷ para los años 2020 y 2030, respectivamente.

Figura 18. Evolución de las emisiones de GYCEI 2013 – 2020 y línea base de CND actualizada en 2013 y 2020.



Fuente: Islas Samperio, J.M, Carrasco González, F., 2023.

Por otra parte, se identificó en por lo menos 10 estudios publicados entre los años 2008 y 2020, que bajo ciertas condiciones técnicas, económicas y financieras es posible duplicar el CDN no condicionado de México para alcanzar en el año 2030 una mitigación anual de entre 424 MtCO_{2e} y 490 MtCO_{2e}.

La información presentada en esta sección proviene del siguiente reporte:

Islas Samperio, J.M, Carrasco González, F., 2023. Estado del arte de la Política nacional de cambio climático en materia de mitigación. En: *Estado y perspectivas del cambio climático en México. Un punto de partida*. Reporte técnico, Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

<https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-mitigacion.pdf>

Para obtener información adicional sobre la base de datos, metodología y resultados adicionales utilizar el siguiente código QR:



Herramientas y recursos digitales

AIRCC-Clim V2: Generador de escenarios regionales probabilísticos de cambio climático

AIRCC-Clim es una herramienta para generar escenarios de cambio climático regional probabilísticos y medidas de riesgo². Las características más importantes de esta herramienta son:

- › **Modelo integrado:** AIRCC-Clim es un software independiente y fácil de usar diseñado para diversas aplicaciones, como evaluaciones de impacto, vulnerabilidad y adaptación, y modelado de evaluación integrada.
- › **Interfaz Gráfica:** Incluye una interfaz gráfica que permite evaluar rápidamente las consecuencias del clima global y regional en experimentos definidos por el usuario de políticas internacionales de mitigación.
- › **Generación de Escenarios:** La herramienta permite generar escenarios de cambio climático a nivel regional y probabilísticos, lo que facilita la comprensión de los posibles cambios en el clima en diferentes áreas geográficas.
- › **Medidas de Riesgo:** AIRCC-Clim también proporciona medidas de riesgo que ayudan a cuantificar y evaluar los retos asociados con los cambios climáticos proyectados.

El AIRCC-Clim es una herramienta versátil que permite a los usuarios explorar y comprender los efectos del cambio climático en diferentes regiones mediante la generación de escenarios probabilísticos y la evaluación de medidas de riesgo. Su interfaz gráfica y su capacidad para evaluar políticas de mitigación internacional lo convierten en una herramienta valiosa para estudios de impacto y planificación de adaptación.

AIRCCA: Modelo para la estimación de impactos en rendimientos de cultivos agrícolas por el cambio climático

El AIRCCA es un emulador de modelos biofísicos de cultivo diseñado para una evaluación rápida y global de riesgos en la producción agrícola a nivel espacialmente explícito¹⁶⁸. Sus principales características son:

- › **Herramienta para la evaluación de impactos y riesgos de cambio climático en agricultura:** Permite realizar una evaluación rápida y global de los efectos del cambio climático en los rendimientos de maíz, trigo y arroz.
- › **Generación de escenarios de impacto probabilísticos:** AIRCCA produce escenarios de impacto probabilísticos explícitamente espaciales y métricas de riesgo definidas por el usuario para cuatro escenarios de emisiones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

- › Resolución espacial y cultivos considerados: La herramienta genera escenarios de impacto y medidas de riesgo para tres cultivos globales principales (maíz de secano, trigo y arroz) a una resolución espacial de 0.5×0.5 grados.

AIRCCA ofrece una manera accesible y eficiente para realizar evaluaciones rápidas de los impactos y riesgos del cambio climático en la agricultura a nivel global y espacialmente explícito. La herramienta integra emuladores de cultivos, generación de escenarios climáticos probabilísticos y módulos de estimación de impacto y riesgo, permitiendo a los usuarios explorar diferentes métricas y comparar escenarios variados.

AIRCC-BioDiv: Modelo para la estimación de impactos en la riqueza de especies

El modelo AIRCC-BioDiv es una herramienta diseñada para explorar riesgos globales para la biodiversidad bajo escenarios futuros de cambio climático. Sus principales características son:

- › Proyecciones Futuras de Pérdida de Diversidad de Especies: AIRCC-BioDiv permite la generación de proyecciones futuras de pérdida de riqueza de especies para cuatro grupos de vertebrados terrestres (anfibios, reptiles, mamíferos y aves).
- › Variedad de modelos climáticos y escenarios de emisiones: El software permite utilizar una amplia gama de modelos climáticos disponibles en CMIP5 y tanto escenarios de emisiones utilizados por el IPCC, así como escenarios de emisiones ad hoc definidos por el usuario.
- › Métricas de riesgo probabilísticas: Los usuarios pueden utilizar diversas métricas de riesgo probabilísticas, incluyendo la estimación de probabilidades de exceder ciertos umbrales de pérdida de especies por celda; identificar fechas en las que se superan esos umbrales; y estimar puntos críticos de riesgo multivariados, es decir, sitios donde convergen pérdidas de biodiversidad para los cuatro grupos taxonómicos. Estas métricas se pueden calcular con una frecuencia anual o para horizontes temporales definidos por el usuario.
- › Visualización de riesgos climáticos significativos: La herramienta permite a los usuarios visualizar las regiones donde se proyectan los riesgos climáticos más significativos para la riqueza de vertebrados terrestres.

El modelo AIRCC-BioDiv proporciona una plataforma para explorar y evaluar los riesgos potenciales del cambio climático en la biodiversidad a nivel global. A través de la generación de proyecciones y el uso de diversas métricas de riesgo, los usuarios pueden identificar áreas y momentos críticos para la pérdida de especies en grupos taxonómicos específicos, produciendo información de interés para la toma de decisiones en la conservación y gestión de la biodiversidad.

DataPINCC: Portal de datos y recursos para la investigación en cambio climático

El DataPINCC es una plataforma integral que tiene como objetivo proporcionar acceso a bases de datos relevantes para la investigación del cambio climático, así como un sistema en línea para consultar, visualizar y analizar datos georreferenciados sobre escenarios climáticos y socioeconómicos. El portal busca concentrar y estandarizar bases de datos, fomentar la investigación del cambio climático, facilitar el acceso a información existente y estimular el intercambio de información entre diversas dependencias e instituciones nacionales e internacionales en el tema. Sus principales características son:

- › Acceso a bases de datos y herramientas de análisis: Proporciona acceso a bases de datos relevantes sobre cambio climático, lo que facilita la investigación multidisciplinaria. Además, ofrece un sistema en línea para consultar, visualizar y analizar datos georreferenciados, incluyendo escenarios climáticos, impactos, vulnerabilidad, adaptación, medidas de riesgo y otros aspectos de sistemas naturales y humanos.
- › Estandarización e Intercambio de Datos: Busca la estandarización de formatos de bases de datos y fomenta el intercambio de datos entre instituciones y dependencias nacionales e internacionales, promoviendo la colaboración intra e interinstitucional y el enfoque multidisciplinario.

El portal DataPINCC es una plataforma completa que busca facilitar la investigación del cambio climático al proporcionar acceso a datos y herramientas de utilidad para la comunidad científica y educativa interesada en entender y ahondar en el estudio sobre el cambio climático.

Epi-SPECIES Plataforma Universitaria de Eco-epidemiología Espacial

Epi-SPECIES es una herramienta interactiva para el análisis del nicho epidemiológico de enfermedades infecciosas y para la creación de modelos predictivos para analizar su dinámica espacio-temporal en México. La plataforma utiliza algoritmos Bayesianos para caracterizar el perfil bioclimático, ecológico y sociodemográfico de los vectores, hospederos o seres humanos que han sido positivos a un patógeno. De esta forma genera modelos ecológicos y geográficos para la presencia de las enfermedades infecciosas. Además, la plataforma permite generar modelos de presencia de enfermedades infecciosas en escenarios de cambios ambientales. El Atlas de Enfermedades Infecciosas es un sistema de consulta público, para visualizar la información espacio-temporal de las enfermedades infecciosas que existen en México y es una herramienta de eco-epidemiología espacial para uso de diferentes usuarios del ámbito académico y gubernamental.

UNIATMOS: Atlas y repositorio de escenarios de cambio climático regionalizados CORDEX, AR6, IPCC para México, Centroamérica, Cuba, Jamaica y sur de Estados Unidos de América

El Atlas pone a disposición de usuarios especializados e interesados en general visualizaciones y bases de datos mensuales interactivas en Internet de escenarios de cambio climático regionalizados sobre temperatura máxima, mínima y precipitación para México, los países centroamericanos, Cuba, Jamaica y sur de Estados Unidos de América que sirvan como insumo para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, con base en el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas.



Referencias

1. Estrada, F., Kim, D. & Perron, P. Anthropogenic influence in observed regional warming trends and the implied social time of emergence. *Commun. Earth Environ.* **2**, 31 (2021).
2. Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Botzen, W., Velasco, J. A. & Tol, R. S. J. AIRCC-Clim: A user-friendly tool for generating regional probabilistic climate change scenarios and risk measures. *Environ. Model. Softw.* **157**, 105528 (2022).
3. Estrada, F. & Botzen, W. J. W. Economic impacts and risks of climate change under failure and success of the Paris Agreement. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1504**, 95–115 (2021).
4. Ruiz-Corral, J. A., Ramírez-Díaz, J. L., Flores-Mendoza, F. J. & Sánchez-González, J. de J. Cambio Climático Y Su Impacto Sobre La Estación De Crecimiento De Maíz En Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* **23**, 169 (2022).
5. Cohen, I. S. *et al.* Forced migration, climate change, mitigation and adaptive policies in Mexico: Some functional relationships. *Int. Migr.* **51**, 53–72 (2013).
6. Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C. & Hernandez, J. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* **34**, 322–329 (2009).
7. López, M. T., Izaurrealde, C., Rosenberg, N. J., Báez González, A. D. & García, J. S. Modeling El Niño Southern oscillation climate impact on Mexican agriculture. *Geofis. Int.* **42**, 331–339 (2003).
8. Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortés, V. H., García-Chávez, L. R., Covarrubias-Gutiérrez, I. & Merino, A. Influence of drought and irrigation on sugarcane yields in different agroecoregions in Mexico. *Agric. Syst.* **143**, 126–135 (2016).
9. Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O. & Botzen, W. Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Reg. Environ. Chang.* **22**, 1–16 (2022).
10. Conde, C. *et al.* Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Clim. Res.* **9**, 17–23 (1997).
11. Monterroso Rivas, A. I., Conde Álvarez, C., Rosales Dorantes, G., Gómez Díaz, J. D. & Gay García, C. Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmosfera* (2011).
12. Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J. & Larsen, J. Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agric. For. Meteorol.* **253–254**, 124–131 (2018).
13. Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J. & Larsen, J. Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agric. For. Meteorol.* **253–254**, 124–131 (2018).
14. Gómez Díaz, J. D., Flores Velázquez, R. & Monterroso Riva, A. I. Aptitud actual bajo escenarios de cambio climático para tres cultivos en México. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas* **11**, 777–788 (2020).
15. Arce Romero, A. *et al.* Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmosfera* **33**, 215–231 (2020).
16. Ureta, C. *et al.* Maize yield in Mexico under climate change. *Agric. Syst.* **177**, 102697 (2020).

17. López-Blanco, J., Pérez-Damián, J. L., Conde-Álvarez, A. C., Gómez-Díaz, J. D. & Monterroso-Rivas, A. I. Land suitability levels for rainfed maize under current conditions and climate change projections in Mexico. *Outlook Agric.* (2018) doi:10.1177/0030727018794973.
18. Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H. & Villers, L. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Clim. Change* **79**, (2006).
19. SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.agricultura.gob.mx/datos-abiertos/siap> (2022).
20. Lobell, D. B. *et al.* Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *F. Crop. Res.* **94**, 250–256 (2005).
21. FAO. FAOSTAT Food and agriculture data. <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (2022).
22. Hernandez-Ochoa, I. M. *et al.* Climate change impact on Mexico wheat production. *Agric. For. Meteorol.* **263**, 373–387 (2018).
23. Cerda-Hurtado, I. M. *et al.* Climatic adaptation and ecological descriptors of wild beans from Mexico. *Ecol. Evol.* **8**, 6492–6504 (2018).
24. Pecl, G. T. *et al.* Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* vol. 355 (2017).
25. Scheffers, B. R. *et al.* The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* **354**, (2016).
26. Román-Palacios, C. & Wiens, J. J. Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **117**, 4211–4217 (2020).
27. Wiens, J. J. Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLoS Biol.* **14**, e2001104–e2001104 (2016).
28. Pacifici, M. *et al.* Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change* vol. 5 215–225 (2015).
29. Urban, M. C. Accelerating extinction risk from climate change. *Science* **348**, 571–573 (2015).
30. Antão, L. H. *et al.* Temperature-related biodiversity change across temperate marine and terrestrial systems. *Nature Ecology and Evolution* vol. 4 927–933 (2020).
31. Lenoir, J. *et al.* Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nat. Ecol. Evol.* **4**, 1044–1059 (2020).
32. Martínez-Meyer, E. & Velasco, J. A. Contemporary Climate Change Impacts on Mexican Fauna. *Mex. Fauna Anthr.* 437–463 (2023) doi:10.1007/978-3-031-17277-9_20/FIGURES/5.
33. Reyes-Bonilla, H., Carriquiry, J. D., Leyte-Morales, G. E. & Cupul-Magaña, A. L. Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the anti-El Niño event (1997-1999) on coral reefs of the western coast of México. *Coral Reefs* **21**, 368–372 (2002).
34. Romero-Torres, M. *et al.* Coral reef resilience to thermal stress in the Eastern Tropical Pacific. *Glob. Chang. Biol.* **26**, 3880–3890 (2020).
35. Eakin, C. M. *et al.* Caribbean corals in crisis: Record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLoS One* **5**, e13969–e13969 (2010).

36. Estrada-Saldívar, N., Quiroga-García, B. A., Pérez-Cervantes, E., Rivera-Garibay, O. O. & Alvarez-Filip, L. Effects of the Stony Coral Tissue Loss Disease Outbreak on Coral Communities and the Benthic Composition of Cozumel Reefs. *Front. Mar. Sci.* **8**, (2021).
37. Muñiz-Castillo, A. I. *et al.* Three decades of heat stress exposure in Caribbean coral reefs: a new regional delineation to enhance conservation. *Sci. Rep.* **9**, 11013 (2019).
38. Muñiz-castillo, A. I. & Mcfield, M. Additive influence of extreme events and local stressors on coral diversity in the Mesoamerican Reef during the last decade. 1-25 (2022) doi:10.21203/rs.3.rs-1689589/v1.
39. Mendoza-González, G., Martínez, M. L., Lithgow, D., Pérez-Maqueo, O. & Simonin, P. Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico. *Ecol. Econ.* **82**, 23-32 (2012).
40. Mendoza-González, G., Martínez, M. L., Rojas-Soto, O. R., Vázquez, G. & Gallego-Fernández, J. B. Ecological niche modeling of coastal dune plants and future potential distribution in response to climate change and sea level rise. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 2524-2535 (2013).
41. Mendoza-González, G. *et al.* Towards a sustainable sun, sea, and sand tourism: The value of ocean view and proximity to the coast. *Sustain.* **10**, 1012 (2018).
42. SCDB. *Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. CBD Technical Series* (2009).
43. Sinervo, B. *et al.* Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science* **328**, 894-899 (2010).
44. Sáenz-Romero, C. *et al.* 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. *Can. J. For. Res.* **50**, 843-854 (2020).
45. Townsend Peterson, A. *et al.* Twentieth century turnover of Mexican endemic avifaunas: Landscape change versus climate drivers. *Sci. Adv.* **1**, e1400071-e1400071 (2015).
46. Jiménez-García, D., Li, X., Lira-Noriega, A. & Peterson, A. T. Upward shifts in elevational limits of forest and grassland for Mexican volcanoes over three decades. *Biotropica* **53**, 798-807 (2021).
47. Feria Arroyo, T. P. *et al.* Estudio del cambio climático y su efecto en las aves en México: enfoques actuales y perspectivas futuras. *Huit. Rev. Mex. Ornitol.* **14**, 47-55 (2013).
48. Ochoa-Ochoa, L. M., Rodríguez, P., Mora, F., Flores-Villela, O. & Whittaker, R. J. Climate change and amphibian diversity patterns in Mexico. *Biol. Conserv.* **150**, 94-102 (2012).
49. Peterson, A. T. *et al.* Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* **416**, 626-629 (2002).
50. Prieto-Torres, D. A., Lira-Noriega, A. & Navarro-Sigüenza, A. G. Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests. *Perspect. Ecol. Conserv.* **18**, 19-30 (2020).

51. Prieto-Torres, D. A., Nori, J., Rojas-Soto, O. R. & Navarro-Sigüenza, A. G. Challenges and opportunities in planning for the conservation of Neotropical seasonally dry forests into the future. *Biol. Conserv.* **257**, 109083 (2021).
52. Prieto-Torres, D. A., Nuñez Rosas, L. E., Remolina Figueroa, D. & Arizmendi, M. del C. Most Mexican hummingbirds lose under climate and land-use change: Long-term conservation implications. *Perspect. Ecol. Conserv.* **19**, 487–499 (2021).
53. Trejo, I. *et al.* Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México. *Atmosfera* **24**, 1–14 (2011).
54. Ballesteros-Barrera, C. *et al.* The Potential Effect of Climate Change on the Distribution of Endemic Anurans from Mexico's Tropical Dry Forest. *Diversity* **14**, 650 (2022).
55. Gómez-Pineda, E. *et al.* Suitable climatic habitat changes for Mexican conifers along altitudinal gradients under climatic change scenarios. *Ecol. Appl.* **30**, (2020).
56. Gay, C. & Estrada, F. Objective probabilities about future climate are a matter of opinion. *Clim. Change* **99**, 27–46 (2010).
57. Knutti, R. & Sedláček, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat. Clim. Chang.* **3**, 369–373 (2013).
58. Cotto, O. *et al.* A dynamic eco-evolutionary model predicts slow response of alpine plants to climate warming. *Nat. Commun.* **8**, 15399 (2017).
59. Diniz-Filho, J. A. F. *et al.* A macroecological approach to evolutionary rescue and adaptation to climate change. *Ecography (Cop.)*. **42**, 1124–1141 (2019).
60. Lyons, M. P. & Kozak, K. H. Vanishing islands in the sky? A comparison of correlation- and mechanism-based forecasts of range dynamics for montane salamanders under climate change. *Ecography (Cop.)*. **43**, 481–493 (2020).
61. Cosgrove, W. J. & Loucks, D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resour. Res.* **51**, 4823–4839 (2015).
62. World Economic Forum. *Global Risk 2015*. (World Economic Forum, 2015).
63. World Economic Forum, Marsh McLennan & Zurich Insurance Group. *The Global Risks Report 2023*. (2023).
64. SEMARNAT-CONAGUA. *Estadísticas del Agua en México*. (2018).
65. SEMARNAT-CONAGUA. *Localizador de Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales*. (2020).
66. SEMARNAT-CONAGUA. *Disponibilidad de acuíferos*. (2020).
67. Arreguín-Cortés, F. I. & López-Pérez, M. Impacts of climate change on the hydrological cycle in Mexico. *Int. J. Water Resour. Dev.* **29**, 172–183 (2013).
68. Lankao, P. R. Water in Mexico city: What will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Environ. Urban.* **22**, 157–178 (2010).
69. Martínez, S., Kralisch, S., Escolero, O. & Perevochtchikova, M. Vulnerability of Mexico city's water supply sources in the context of climate change. *J. Water Clim. Chang.* **6**, 518–533 (2015).
70. Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E. & Perevochtchikova, M. Diagnosis and analysis of factors influencing the vulnerability of drinking water sources in Mexico City, Mexico. *Bol. la Soc. Geol. Mex.* **68**, 409–427 (2016).

71. Bravo-Cadena, J., Pavón, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G. & Razo-Zarate, R. Water availability–demand balance under climate change scenarios in an overpopulated region of Mexico. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **18**, 1–16 (2021).
72. Herrera-Pantoja, M. & Hiscock, K. M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. *Environ. Sci. Policy* **54**, 81–89 (2015).
73. González-Villarreal, F., Domínguez-Mares, M. & Arriaga-Medina, J. Sustainability of water resources in tropical regions in the face of climate change. in *Sustainability of Integrated Water Resources Management: Water Governance, Climate and Ecohydrology* 181–195 (Springer International Publishing, 2015). doi:10.1007/978-3-319-12194-9_11.
74. Molina-Navarro, E. *et al.* Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agric. Water Manag.* **175**, 29–42 (2016).
75. SEMARNAT-CONAGUA. Estadísticas agrícolas de los distritos de temporal tecnificado, año agrícola 2020-2021. 1–152 <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-temporal-tecnificado> (2021).
76. Magaña, V. O. & Conde, C. Climate and freshwater resources in northern Mexico: Sonora, a case study. *Environ. Monit. Assess.* **61**, 167–185 (2000).
77. Montes, R. T., Navarro, I., Domínguez, R. & Jiménez, B. Modificación de la capacidad de auto-depuración del Río Magdalena ante el cambio climático. *Tecnol. y Ciencias del Agua* **4**, 71–83 (2013).
78. García, A. J., Ramírez, N., Vazquez, C. & Leal, T. *Impacto del Cambio Climático en la Calidad del Agua en México. Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua* (2011).
79. Noyola, A., Morgan, J. & Guereca, L. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Instituto de Ingeniería de UNAM* <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales> (2013).
80. Martínez-Austria, P. F., Hidalgo, A. V. & Patiño-Gómez, C. Dynamic modelling of the climate change impact in the Conchos River basin water management. *Tecnol. y Ciencias del Agua* **10**, 207–233 (2019).
81. Berrang-Ford, L. *et al.* Systematic mapping of global research on climate and health: a machine learning review. *Lancet Planet. Heal.* **5**, e514–e525 (2021).
82. Mills, J. N., Gage, K. L. & Khan, A. S. Potential influence of climate change on vector-borne and zoonotic diseases: A review and proposed research plan. *Environ. Health Perspect.* **118**, 1507–1514 (2010).
83. Patz, J. A. Health: Ecosystem Regulation of Infectious Diseases. in *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends* (ed. Millennium Ecosystem Assessment) (Island Press, 2005).
84. Shimshony, A. Zoonoses remain a significant concern in modern medicine. *Infect. Dis. News* **8** (2008) doi:10.3201/eid0302.970221.
85. Buhnerkempe, M. G. *et al.* Eight challenges in modelling disease ecology in multi-host, multi-agent systems. *Epidemics* **10**, 26–30 (2015).

86. Acha, P. N. & Szyfres, B. Zoonosis y enfermedades transmisibles comunes al hombre y a los animales. Volumen I: Bacteriosis y micosis. *Rev. Esp. Salud Publica* **75**, 263–264 (2001).
87. Bueno-Marí, R., Almeida, A. P. G. & Navarro, J. C. Editorial: Emerging Zoonoses: Eco-Epidemiology, Involved Mechanisms, and Public Health Implications. *Frontiers in Public Health* vol. 3 (2015).
88. Hurtado-Díaz, M., Riojas-Rodríguez, H., Rothenberg, S. J., Gomez-Dantés, H. & Cifuentes, E. Short communication: Impact of climate variability on the incidence of dengue in Mexico. *Trop. Med. Int. Heal.* **12**, 1327–1337 (2007).
89. Colón-González, F. J., Lake, I. R. & Bentham, G. Climate variability and dengue fever in warm and humid Mexico. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* **84**, 757–763 (2011).
90. Dantés, H. G., Farfán-Ale, J. A. & Sarti, E. Epidemiological Trends of Dengue Disease in Mexico (2000–2011): A Systematic Literature Search and Analysis. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8**, e3158–e3158 (2014).
91. Ibáñez-Cervantes, G. *et al.* Evolution of incidence and geographical distribution of Chagas disease in Mexico during a decade (2007–2016). *Epidemiol. Infect.* **147**, e41–e41 (2019).
92. A Vado-Solís, I. *et al.* Estudio de casos clínicos e incidencia de leptospirosis humana en el estado de Yucatán, México durante el período 1998 a 2000. *Rev. Biomédica* **13**, 157–164 (2002).
93. Eisen, L. *et al.* Temporal correlations between mosquito-based dengue virus surveillance measures or indoor mosquito abundance and dengue case numbers in Mérida City, Mexico. *J. Med. Entomol.* **51**, 885–890 (2014).
94. García, C., García, L., Espinosa-Carreón, L. & César, L. Abundancia y distribución de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) y dispersión del dengue en guasave sinaloa, México. *Rev. Biol. Trop.* **59**, 1609–1619 (2011).
95. Hernández-Aguilar, I., Lorenzo, C., Santos-Moreno, A., Gutiérrez, D. N. & Naranjo, E. J. Current Knowledge and Ecological and Human Impact Variables Involved in the Distribution of the Dengue Virus by Bats in the Americas. *Vector-Borne Zoonotic Dis.* **21**, 217–231 (2021).
96. Leduc-Galindo, D. *et al.* Characterization of the dengue outbreak in Nuevo Leon state, Mexico, 2010. *Infection* **43**, 201–206 (2015).
97. Núñez-López, M., Alarcón Ramos, L. & Velasco-Hernández, J. X. Migration rate estimation in an epidemic network. *Appl. Math. Model.* **89**, 1949–1964 (2021).
98. Robles-Fernández, Á. L., Santiago-Alarcon, D. & Lira-Noriega, A. American Mammals Susceptibility to Dengue According to Geographical, Environmental, and Phylogenetic Distances. *Front. Vet. Sci.* **8**, 604560 (2021).
99. Solís-Navarro, M., Vargas-De-León, C., Gúzman-Martínez, M. & Corzo-Gómez, J. A Bayesian Prediction Spatial Model for Confirmed Dengue Cases in the State of Chiapas, Mexico. *J. Trop. Med.* **2022**, 1971786 (2022).
100. Brunkard, J. M., Cifuentes, E. & Rothenberg, S. J. Assessing the roles of temperature, precipitation, and ENSO in dengue re-emergence on the Texas-Mexico border region. *Salud Publica Mex.* **50**, 227–234 (2008).
101. Betanzos-Reyes, Á. F. *et al.* Association of dengue fever with *Aedes* spp. abundance and climatological effects. *Salud Publica Mex.* **60**, 12–20 (2018).

102. Bowman, L. R. *et al.* Alarm variables for dengue outbreaks: A multi-centre study in Asia and Latin America. *PLoS One* **11**, e0157971–e0157971 (2016).
103. Escobar-Mesa, J. & Gómez-Dantés, H. Determinantes de la transmisión de dengue en Veracruz: Un abordaje ecológico para su control. *Salud Publica Mex.* **45**, 43–53 (2003).
104. Laureano-Rosario, A. E. *et al.* Application of Artificial Neural Networks for Dengue Fever Outbreak Predictions in the Northwest Coast of Yucatan, Mexico and San Juan, Puerto Rico. *Trop. Med. Infect. Dis.* **3**, 5 (2018).
105. Moreno-Banda, G. L., Riojas-Rodríguez, H., Hurtado-Díaz, M., Danis-Lozano, R. & Rothenberg, S. J. Effects of climatic and social factors on dengue incidence in Mexican municipalities in the state of Veracruz. *Salud Publica Mex.* **59**, 41–52 (2017).
106. Ordoñez-Sierra, R. *et al.* Spatial Risk Distribution of Dengue Based on the Ecological Niche Model of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in the Central Mexican Highlands. *J. Med. Entomol.* **57**, 728–737 (2020).
107. Sánchez-González, G., Condé, R., Moreno, R. N. & López Vázquez, P. C. Prediction of dengue outbreaks in Mexico based on entomological, meteorological and demographic data. *PLoS One* **13**, e0196047–e0196047 (2018).
108. Villarreal-Treviño, C. *et al.* Composition and abundance of anopheline species according to habitat diversity in Mexico. *Salud Publica Mex.* **62**, 388–401 (2020).
109. Hernández-Avila, J. E. *et al.* Determinant factors for malaria transmission on the coast of Oaxaca State, the main residual transmission focus in Mexico. *Salud Publica Mex.* **48**, 405–417 (2006).
110. Garza, M. *et al.* Projected Future Distributions of Vectors of *Trypanosoma cruzi* in North America under Climate Change Scenarios. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8**, e2818–e2818 (2014).
111. Moo-Llanes, D. A., Montes de Oca-Aguilar, A. C. & Rodríguez-Rojas, J. J. Pattern of climate connectivity and equivalent niche of *Triatominae* species of the *Phyllosoma* complex. *Med. Vet. Entomol.* **34**, 440–451 (2020).
112. Schettino, P. M. S. *et al.* *Triatoma mexicana* (Hemiptera: Reduviidae) in Guanajuato, Mexico: house infestation and seasonal variation. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* **102**, 803–807 (2007).
113. Torres, M. E. *et al.* Biogeographical Factors Determining *Triatoma recurva* Distribution In Chihuahua, México, 2014. *Biomedica* **40**, 516–527 (2020).
114. González-Salazar, C. *et al.* Toward New Epidemiological Landscapes of *Trypanosoma cruzi* (Kinetoplastida, Trypanosomatidae) Transmission under Future Human-Modified Land Cover and Climatic Change in Mexico. *Trop. Med. Infect. Dis.* **7**, 221 (2022).
115. Carmona-Castro, O., Moo-Llanes, D. A. & Ramsey, J. M. Impact of climate change on vector transmission of *Trypanosoma cruzi* (Chagas, 1909) in North America. *Med. Vet. Entomol.* **32**, 84–101 (2018).
116. Chico-Avelino, M. *et al.* Synanthropic triatomines in Hidalgo state, Mexico: Spatial-temporal distribution, domestic transmission cycle, and natural infection with *Trypanosoma cruzi*. *Acta Trop.* **234**, 106618 (2022).
117. Cruz-Reyes, A. & Pickering-López, J. M. Chagas disease in Mexico: An analysis of geographical distribution during the past 76 years - A review. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* **101**, 345–354 (2006).

118. Flores-López, C. A. *et al.* Potential distributions of the parasite *Trypanosoma cruzi* and its vector *Dipetalogaster maxima* highlight areas at risk of Chagas disease transmission in Baja California Sur, Mexico, under climate change. *Med. Vet. Entomol.* **36**, 469–479 (2022).
119. Ramsey, J. M. *et al.* Atlas of Mexican Triatominae (Reduviidae: Hemiptera) and vector transmission of Chagas disease. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* **110**, 339–352 (2015).
120. Valdez Tah, A. R., Huicochea Gómez, L., Nazar Beutelspacher, A., Ortega Canto, J. & Ramsey, J. M. Human vulnerability to *Trypanosoma cruzi* vector transmission through health-disease processes and social appropriation of the territory. *Salud Colect.* **11**, 191–210 (2015).
121. Guzmán-Gómez, D. *et al.* 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. *Trop. Med. Int. Heal.* **26**, 916–926 (2021).
122. de Fuentes-Vicente, J. A. *et al.* What makes an effective Chagas disease vector? Factors underlying *Trypanosoma cruzi*-triatomine interactions. *Acta Trop.* **183**, 23–31 (2018).
123. Cunze, S., Kochmann, J., Koch, L. K., Genthner, E. & Klimpel, S. Vector distribution and transmission risk of the Zika virus in South and Central America. *PeerJ* **2019**, e7920–e7920 (2019).
124. Onyango, M. G. *et al.* Increased temperatures reduce the vectorial capacity of *Aedes* mosquitoes for Zika virus. *Emerg. Microbes Infect.* **9**, 67–77 (2020).
125. Illoldi-Rangel, P. *et al.* Species distribution models and ecological suitability analysis for potential tick vectors of Lyme disease in Mexico. *J. Trop. Med.* **2012**, 959101 (2012).
126. Feria-Arroyo, T. P. *et al.* 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**, 199 (2014).
127. González, C. *et al.* Climate change and risk of leishmaniasis in North America: Predictions from ecological niche models of vector and reservoir species. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **4**, e585–e585 (2010).
128. Moo-Llanes, D. *et al.* Current and Future Niche of North and Central American Sand Flies (Diptera: Psychodidae) in Climate Change Scenarios. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **7**, e2421–e2421 (2013).
129. Purse, B. V. *et al.* How will climate change pathways and mitigation options alter incidence of vector-borne diseases? A framework for leishmaniasis in South and Meso-America. *PLoS One* **12**, e0183583–e0183583 (2017).
130. Flores Monter, Y. M. *et al.* Edaphoclimatic seasonal trends and variations of the *Salmonella* spp. infection in Northwestern Mexico. *Infect. Dis. Model.* **6**, 805–819 (2021).
131. Equihua, M. *et al.* Establishment of *Aedes aegypti* (L.) in mountainous regions in Mexico: Increasing number of population at risk of mosquito-borne disease and future climate conditions. *Acta Trop.* **166**, 316–327 (2017).
132. Mejía-Guevara, M. D. *et al.* *Aedes aegypti*, the dengue fever mosquito in Mexico city. Early invasion and its potential risks. *Gac. Med. Mex.* **156**, 388–395 (2020).
133. Tovar-Zamora, I. *et al.* Seasonal Variation in Abundance of Dengue Vector in the Southern Part of the Baja California Peninsula, Mexico. *Southwest. Entomol.* **44**, 885–895 (2019).

134. Asin, S. & Catala, S. Development of *Trypanosoma cruzi* in *Triatoma infestans*: Influence of temperature and blood consumption. *J. Parasitol.* **81**, 1–7 (1995).
135. Carcavallo, R. U. Climatic Factors Related to Chagas Disease Transmission. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz* **94**, 367–369 (1999).
136. Tamayo, L. D., Guhl, F., Vallejo, G. A. & Ramírez, J. D. The effect of temperature increase on the development of *Rhodnius prolixus* and the course of *Trypanosoma cruzi* metacyclogenesis. *PLoS Negl. Trop. Dis.* **12**, e0006735–e0006735 (2018).
137. Yañez-Arenas, C. *et al.* Characterizing environmental suitability of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in Mexico based on regional and global niche models. *J. Med. Entomol.* **55**, 69–77 (2018).
138. Lubinda, J. *et al.* Environmental suitability for *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* and the spatial distribution of major arboviral infections in Mexico. *Parasite Epidemiol. Control* **6**, e00116–e00116 (2019).
139. Escamilla-Núñez, C. *et al.* Trends in the prevalence of ARIs and ADDs in early childhood and associated factors: Ensanut 2012 and 100k. *Salud Publica Mex.* **61**, 798–808 (2019).
140. Hurtado-Díaz, M., de la Cruz, J. C., Blanco-Muñoz, J., Azamar-Arizmendi, R. A. & Riojas-Rodríguez, H. Revisión rápida de los efectos de la variación de la temperatura y la humedad en la morbilidad y mortalidad por Covid-19. *Salud Publica Mex.* **63**, 120–125 (2020).
141. Salcido, A. & Castro, T. Influence of meteorological patterns on the 2020 COVID-19 pandemic in the Mexico City region. *Environ. Adv.* **7**, 100157 (2022).
142. Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., Elizalde-Martínez, I. & Shruti, V. C. Impacts of the COVID-19 lockdown on air quality and its association with human mortality trends in megapolis Mexico City. *Air Qual. Atmos. Heal.* **14**, 553–562 (2021).
143. Escamilla-Núñez, M. C. *et al.* Traffic-related air pollution and respiratory symptoms among asthmatic children, resident in Mexico City: The EVA cohort study. *Respir. Res.* **9**, 74 (2008).
144. Carbajal-Arroyo, L. *et al.* Effect of PM10 and O3 on infant mortality among residents in the Mexico City Metropolitan Area: A case-crossover analysis, 1997–2005. *J. Epidemiol. Community Health* **65**, 715–721 (2011).
145. Hurtado-Díaz, M. *et al.* Short-term effects of ambient temperature on non-external and cardiovascular mortality among older adults of metropolitan areas of Mexico. *Int. J. Biometeorol.* **63**, 1641–1650 (2019).
146. Ugalde-Resano, R., Riojas-Rodríguez, H., Texcalac-Sangrador, J. L., Cruz, J. C. & Hurtado-Díaz, M. Short term exposure to ambient air pollutants and cardiovascular emergency department visits in Mexico city. *Environ. Res.* **207**, 112600 (2022).
147. Hansson, E., Mansourian, A., Farnaghi, M., Petzold, M. & Jakobsson, K. An ecological study of chronic kidney disease in five Mesoamerican countries: associations with crop and heat. *BMC Public Health* **21**, 840 (2021).
148. Burke, M. *et al.* Higher temperatures increase suicide rates in the United States and Mexico. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 723–729 (2018).
149. Yu, J. *et al.* Seasonality of suicide: A multi-country multi-community observational study. *Epidemiol. Psychiatr. Sci.* **29**, e163–e163 (2020).

150. Fernández-Arteaga, V. *et al.* Association between completed suicide and environmental temperature in a Mexican population, using the Knowledge Discovery in Database approach. *Comput. Methods Programs Biomed.* **135**, 219–224 (2016).
151. Chowell, G., Hyman, J. M., Díaz-Dueñas, P. & Hengartner, N. W. Predicting scorpion sting incidence in an endemic region using climatological variables. *Int. J. Environ. Health Res.* **15**, 425–435 (2005).
152. Hurtado-Díaz, M. *et al.* Influence of increasing temperature on the scorpion sting incidence by climatic regions. *Int. J. Climatol.* **38**, 2167–2173 (2018).
153. Gasparrini, A. *et al.* Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet. Heal.* **1**, e360–e367 (2017).
154. López-Olmedo, N. *et al.* Climate Trends and Consumption of Foods and Beverages by Processing Level in Mexican Cities. *Front. Nutr.* **8**, 647497 (2021).
155. Conde, C., Ferrer, R. & Liveman, D. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo Ceres-Maize. *México Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en Mex.* 93–110 (2000).
156. Villers-Ruiz, L. & Trejo-Vázquez, I. El cambio climático y la vegetación en México. *Inst. Geogr. UNAM Sin vol*, 57–68 (2000).
157. Estrada, F., Gay, C. & Conde, C. A methodology for the risk assessment of climate variability and change under uncertainty. A case study: Coffee production in Veracruz, Mexico. *Clim. Change* **113**, 455–479 (2012).
158. Estrada, F. & Martínez, B. *Economía del Cambio Climático en la Ciudad de México*. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2011).
159. Estrada, F., Botzen, W. J. W. & Tol, R. S. J. Economic losses from US hurricanes consistent with an influence from climate change. *Nat. Geosci.* **8**, (2015).
160. Estrada, F., Tol, R. S. J. & Gay-García, C. The persistence of shocks in GDP and the estimation of the potential economic costs of climate change. *Environ. Model. Softw.* **69**, 155–165 (2015).
161. Estrada, F., Botzen, W. J. W. & Tol, R. S. J. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nat. Clim. Chang.* **7**, 403–406 (2017).
162. Ignjacevic, P., Estrada, F. & Botzen, W. J. W. Time of emergence of economic impacts of climate change. *Environ. Res. Lett.* **16**, 074039 (2021).
163. SEMARNAT-INECC. *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático*. SEMARNAT (2018).
164. INECC. Evaluación Estratégica del Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/261388/Informe__evaluacion_PECC_final_limpio_1_.pdf (2017).
165. INECC. Evaluación Estratégica del Anexo Transversal del Presupuesto de Egresos de la Federación en materia de Cambio Climático. Informe Final. 86 https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/261388/Informe__evaluacion_PECC_final_limpio_1_.pdf (2017).
166. INECC. Sistema de Indicadores de la Política Nacional de Cambio Climático. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/690906/124_2021_Sistema_Indicadores_PNCC.pdf (2021).

167. SENER. Reporte Anual del Potencial de Mitigación de GEI en el Sector Eléctrico y su metodología. 9-12 <https://www.gob.mx/sener/articulos/reporte-anual-del-potencial-de-mitigacion-de-gei-en-el-sector-electrico> (2020).
168. Estrada, F., Botzen, W. J. W. & Calderon-Bustamante, O. The Assessment of Impacts and Risks of Climate Change on Agriculture (AIRCCA) model: a tool for the rapid global risk assessment for crop yields at a spatially explicit scale. *Spat. Econ. Anal.* **15**, 262-279 (2020)

La publicación de esta obra la realizó
el Programa de Investigación en Cambio Climático.
Se publicó el 15 de septiembre de 2023.

