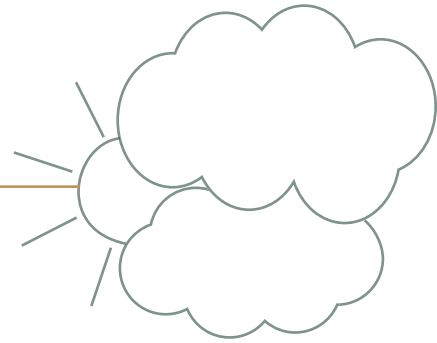


# ATMÓSFERA

---



## INTRODUCCIÓN

La atmósfera es un factor clave para el desarrollo y el mantenimiento de la vida en la Tierra. Cumple funciones esenciales tales como filtrar la radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol y regular el clima, tanto por el movimiento de las masas de aire frío y caliente sobre los océanos y las masas continentales, como por su efecto en las corrientes oceánicas y en el transporte del vapor de agua que cae luego como precipitación en los continentes (Delworth y Greatbatch, 2000; UNEP, 2012a). A lo anterior hay que agregar que actúa también como reservorio de elementos químicos que circulan en la biosfera, en los llamados “ciclos biogeoquímicos”, y que necesariamente pasan por una fase gaseosa, como son los casos del carbono y el nitrógeno (Gruber y Galloway, 2008; Aufdenkampe *et al.*, 2011).

Muchos de los residuos de las actividades humanas se liberan a la atmósfera en forma de gases y pueden permanecer suspendidos en ella unos pocos días (como en el caso del material particulado y el carbono negro; recuadro [El carbono negro y la salud](#)), por décadas (como los clorofluorocarbonos) o incluso siglos, tal como ocurre con algunos gases de efecto invernadero (el dióxido de carbono, por ejemplo). Aunque algunos contaminantes pueden degradarse en la atmósfera, depositarse en el suelo o en los océanos, o integrarse en los ciclos biogeoquímicos, sus emisiones crecientes han sido la causa de algunos de los problemas ambientales más importantes que enfrentamos en la actualidad: la degradación de la capa de ozono estratosférico, el cambio climático y el deterioro de la calidad del aire en las zonas urbanas. La contaminación atmosférica es de vital importancia porque incide negativamente en la salud de la población, y de la biodiversidad en general, por lo que su efecto puede verse reflejado en la disminución en la calidad de vida, reducir la productividad y tener impactos no deseados en la economía.

En este sentido, resulta fundamental contar con información actualizada y confiable sobre los temas más relevantes relacionados con la atmósfera, la cual debe ser útil para el análisis de sus problemáticas y para diseñar y ejecutar acciones efectivas a los niveles local, nacional y global. En este contexto, en la primera sección de este capítulo se describe la emisión de contaminantes atmosféricos y su relación con la calidad del aire en algunas de las zonas urbanas con monitoreo; y también se describen la situación y las tendencias de la calidad del aire en las ciudades que cuentan con éste. En las últimas dos secciones se abordan dos temas de carácter global: el cambio climático y el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico. En cada una se hace una descripción de las causas, las consecuencias y las medidas tomadas para enfrentarlos.

## CALIDAD DEL AIRE

El crecimiento constante de la población en las zonas urbanas ha traído consigo la concentración de las actividades económicas y productivas, que bajo ciertas circunstancias agudizan problemáticas como las relacionadas con la mala calidad del aire. En particular, la exposición al aire contaminado tiene implicaciones sociales y económicas importantes, siendo quizá una de las más relevantes la de ser la principal causa ambiental de muertes prematuras a nivel mundial. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS; WHO por sus siglas en inglés), en 2012 la contaminación del aire fue responsable de 3.7 millones de muertes en el planeta (11% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, 6% por cáncer de pulmón; 40% por enfermedad isquémica del corazón, 40% por accidente cerebrovascular y alrededor de 3% por infección respiratoria aguda). La mayor parte de estos decesos, cerca del 70%, ocurrió en los países de la región Pacífico occidental y el sureste de Asia (1.67 millones y 936 000 muertes, respectivamente), sin embargo, en el continente americano se registraron cerca de 58 000 decesos (WHO, 2014a).

La mala calidad del aire también tiene impactos en el ámbito económico, debido a que los problemas de salud de la población generan tanto la disminución de la productividad como un incremento del presupuesto que debe destinarse a los gastos en salud, afectando finalmente la competitividad de los países.<sup>1</sup> El Banco Mundial ha estimado que el impacto al Producto Interno Bruto (PIB) en los países de América Latina como consecuencia de las afectaciones a la salud por la emisión de contaminantes a la atmósfera es de alrededor del 2% (Clean Air Institute, 2013).

En México, en 2010 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014a) evaluó el impacto económico y sobre la salud de la calidad del aire en las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (AMM), encontrando que si se cumplieran los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud<sup>2</sup> para la concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> se evitarían pérdidas económicas por 45 000 millones de pesos y 2170 muertes prematuras. Considerando lo establecido en la normatividad mexicana para este mismo tipo de partículas,<sup>3</sup> si su concentración se mantuviera por debajo del límite determinado, se evitaría un gasto de 27 000 millones de pesos y alrededor de 1 317 muertes prematuras (para mayor información sobre salud ambiental se recomienda ver el capítulo sobre [Población y medio ambiente](#)).

Además de los efectos sobre la salud de las personas, la contaminación atmosférica también afecta a los bosques y ecosistemas acuáticos, debido a la presencia de contaminantes como los óxidos de nitrógeno y de azufre, los cuales se producen por la quema de combustibles fósiles y que, al combinarse con el agua presente en la atmósfera, provocan el fenómeno conocido como lluvia o deposición ácida.

---

<sup>1</sup> El Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) en su evaluación de la competitividad global, incluye a la población expuesta a la concentración de contaminantes en el aire (particularmente PM<sub>2.5</sub>) como un indicador del componente de sustentabilidad ambiental del Índice Global de Competitividad.

<sup>2</sup> El límite establecido por la OMS es de 25 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas.

<sup>3</sup> El límite en México indica que no deben excederse los 45 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas.

Los impactos ambientales, sociales y económicos de la contaminación atmosférica hacen necesario conocer no solo las concentraciones de los principales contaminantes, sino también sus fuentes de origen y sus volúmenes de emisión. Esta información apoya el diseño y la implementación de acciones de política pública orientadas a reducir la presencia de los contaminantes en la atmósfera y minimizar así sus impactos sobre la salud de la población y los ecosistemas.

## FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD DEL AIRE

El volumen y las características de los contaminantes emitidos a la atmósfera, tanto local como regionalmente, determinan en buena medida la calidad del aire en una zona particular. No obstante, las características climáticas y geográficas también influyen en las condiciones del aire a las que están expuestas las poblaciones. En esta sección del capítulo se presentan y analizan la emisión nacional de contaminantes, por tipo y fuente, así como por ubicación geográfica.

### Emisión de contaminantes

El último Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) reporta datos para el año 2014<sup>4</sup> (Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, 2018). Incluye la estimación de las emisiones de contaminantes criterio para fuentes fijas, de área y naturales por entidad federativa, pero no para fuentes móviles.<sup>5</sup> Existen también inventarios locales elaborados para algunas zonas metropolitanas y ciudades del país, los que pueden ser consultados directamente en sus respectivos Programas para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire). Destacan los inventarios de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), cuya actualización ha sido regular y la última incluye datos al año 2016 (recuadro [Monitoreo y emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México](#)).

En 2014 se emitieron a nivel nacional, sin considerar a las fuentes móviles, alrededor de 23.3 millones de toneladas de contaminantes. En total, las fuentes naturales<sup>6</sup> emitieron 51.5% del total de los contaminantes y las antropogénicas el 48.5% restante. En el caso de las emisiones de las fuentes naturales, el 86% correspondió a compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes de la vegetación y el restante 14% a óxidos de nitrógeno generados por la vegetación y la actividad microbiana del suelo.

Las fuentes antropogénicas son de especial relevancia porque son las que se generan en o cerca de los centros de población y afectan en mayor grado la salud

---

<sup>4</sup> El primer inventario de emisiones se desarrolló en 1988 con la implementación del Sistema Nacional del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas y un estudio que cuantificó las emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

<sup>5</sup> Es importante mencionar que los datos publicados en el INEM 2008 no son comparables con aquellos publicados en inventarios anteriores, ya que las metodologías empleadas han cambiado con el fin de mejorar la calidad de la información. Esto pone de manifiesto la necesidad de recalcular cualquier inventario anterior cada vez que la metodología sufra algún cambio, con la finalidad de hacerlos comparables.

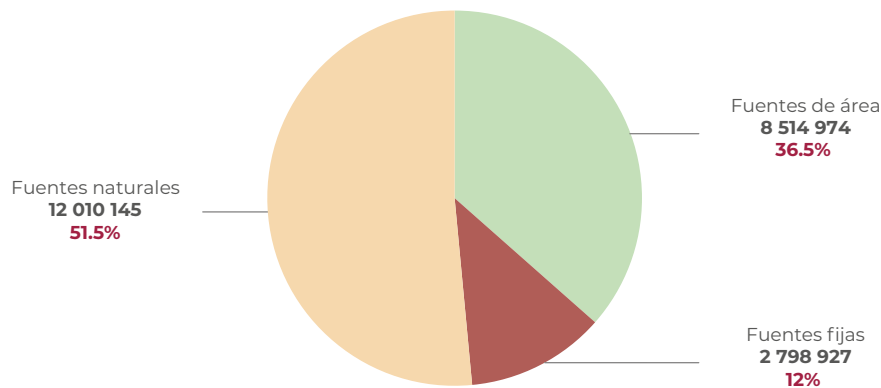
<sup>6</sup> Incluyen fuentes biogénicas como la vegetación y la actividad microbiana del suelo.

de las personas que viven en o cerca de ellos. A este respecto, el mayor volumen emitido provino de las fuentes de área<sup>7</sup> (75.3%) mientras que las fuentes fijas<sup>8</sup> aportaron el 24.7% restante (Figura 5.1; IB 1.1-2; cuadro D3\_AIRE01\_31).

Los contaminantes emitidos en mayor proporción por fuentes antropogénicas en 2014, sin considerar a las fuentes móviles,<sup>9</sup> fueron los COV (3.4 millones de toneladas; 30.5%), el monóxido de carbono (CO; 3.2 millones de toneladas; 28.2% del total) y el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>; 1.3 millones de toneladas; 11.9%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje entre el 6 y el 9% (Figura 5.2). Las fuentes de área emitieron en mayor proporción COV (38% del total emitido por este tipo de fuente) y CO (34%), mientras que las fuentes fijas generaron principalmente SO<sub>2</sub> (47%) y NO<sub>x</sub> (24%). Las fuentes naturales emitieron principalmente COV (86%) y NO<sub>x</sub> (14%; Figura 5.3; cuadro D3\_AIRE01\_31).

A nivel estatal, sin considerar las emisiones de fuentes fijas, las cinco entidades federativas que emitieron una mayor cantidad de contaminantes fueron Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Campeche y Guerrero (Figura 5.4). Sus contribuciones individuales oscilaron entre el 9 y 6% del total nacional. En contraste, Tlaxcala, Aguascalientes, Morelos, Ciudad de México y Querétaro emitieron, cada una, menos del 1%.

**Figura 5.1** Emisión nacional de contaminantes por fuente,<sup>1</sup> 2014



**Notas:**

<sup>1</sup> La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles.

<sup>2</sup> Los datos se muestran en toneladas.

**Fuente:**

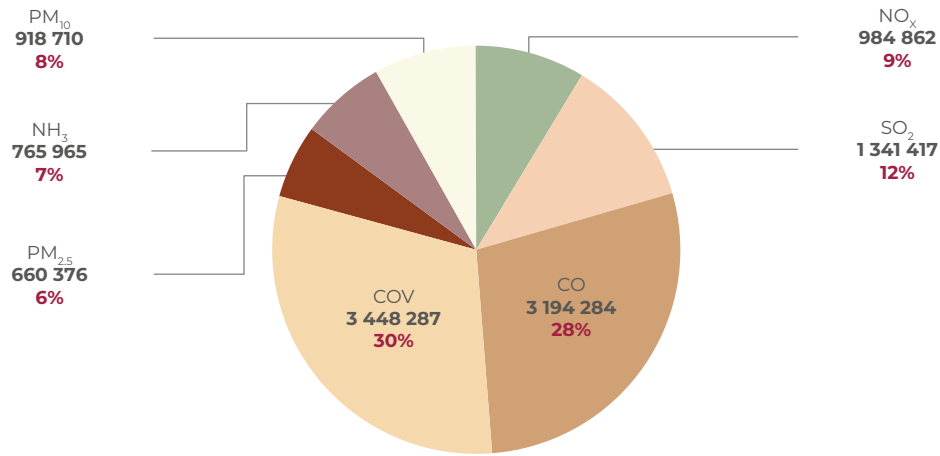
Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, Semarnat. México. Agosto de 2018.

<sup>7</sup> Incluyen combustión agrícola y doméstica, artes gráficas, asfaltado, lavado en seco, pintado automotriz, pintura para señalización vial, recubrimiento de superficies, uso doméstico de solventes, limpieza de superficies industriales, manejo y distribución de gas licuado de petróleo, gasolinas y diésel, actividades de construcción, asados al carbón, panificación, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda, ganaderas de amoníaco, la branza, aguas residuales, incendios de construcciones, incendios forestales, emisiones domésticas de amoníaco, esterilización de material hospitalario, cruces fronterizos, terminales de autobuses y quemas agrícolas.

<sup>8</sup> Incluyen a las industrias del petróleo y petroquímica, química (incluye plásticos), producción de pinturas y esmaltes, metalúrgica y siderúrgica, automotriz, celulosa y papel, cemento y cal, asbesto, vidrio, alimentos y bebidas, textil, madera, generación de energía eléctrica, residuos peligrosos, hospitales y producción de asfalto, entre otras.

<sup>9</sup> En 2008 el 59% de las emisiones en el país provino de las fuentes móviles (34.8 millones de toneladas).

**Figura 5.2** Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante,<sup>1</sup> 2014



**Notas:**

<sup>1</sup> La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles.

CO: monóxido de carbono

COV: compuestos orgánicos volátiles

NH<sub>3</sub>: amoníaco

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno

PM<sub>2.5</sub>: partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros

PM<sub>10</sub>: partículas iguales o menores a 10 micrómetros

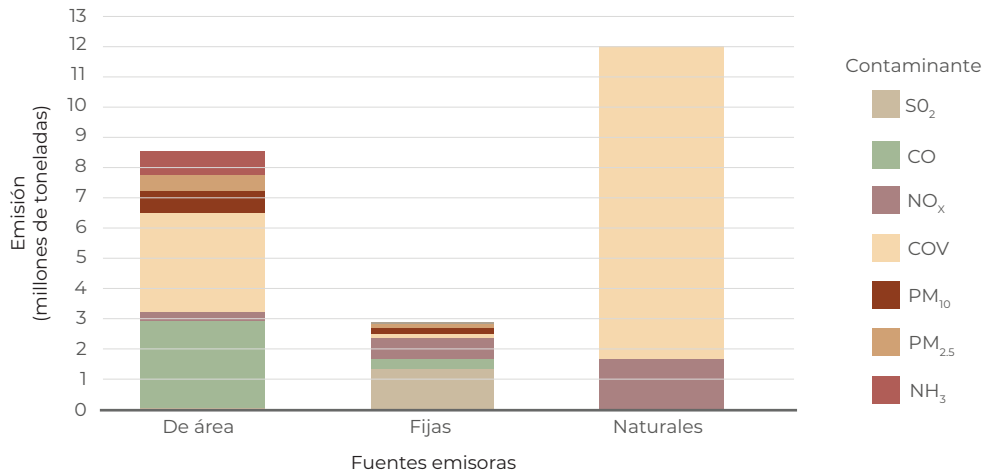
SO<sub>2</sub>: dióxido de azufre

<sup>2</sup> Los datos se muestran en toneladas.

**Fuente:**

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, Semarnat. México. Agosto de 2018.

**Figura 5.3** Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico, por fuente y contaminante, 2014



**Notas:**

La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles.

CO: monóxido de carbono

COV: compuestos orgánicos volátiles

NH<sub>3</sub>: amoníaco

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno

PM<sub>2.5</sub>: partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros

PM<sub>10</sub>: partículas iguales o menores a 10 micrómetros

SO<sub>2</sub>: dióxido de azufre

**Fuente:**

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, Semarnat. México. Agosto de 2018.



El carbono negro (CN) forma parte de los llamados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), entre los que se encuentran el metano (CH<sub>4</sub>), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Está constituido por esferas de carbón de pocas micras a las que por lo general se adhieren compuestos orgánicos y pequeñas cantidades de nitratos y sulfatos (Tollefson, 2009; Bond *et al.* 2013). El CN se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles como el diésel y el combustóleo, así como por la quema de leña y otros tipos de biomasa (Molina *et al.*, 2009; Tollefson, 2009; Bond *et al.*, 2013). Tiene un tiempo de vida en la atmósfera de apenas unos días o semanas, es decir, menor al del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>; Tollefson, 2009).

Aun cuando el mayor interés sobre el CN se ha centrado en su efecto en el aumento de la temperatura global (ver el recuadro La importancia del carbono negro en el calentamiento global en la sección de Cambio climático en este capítulo), sus consecuencias negativas sobre la salud también causan preocupación. La asociación del CN con ciertos padecimientos se centra principalmente en las partículas suspendidas con diámetros iguales o menores a 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>). Estas partículas, además de producirse por la combustión de combustibles fósiles, también se generan en los hogares por la quema de biocombustibles (por ejemplo, leña) empleados para cocinar o para calefacción. A diferencia de las partículas PM<sub>10</sub>, el reducido tamaño de las PM<sub>2.5</sub> les permite alcanzar zonas más profundas del sistema respiratorio, como la región bronquial, aumentando la incidencia de diversas afecciones, entre las que son más frecuentes los accidentes cerebrovasculares, diversas enfermedades del corazón y cáncer de pulmón (Janssen *et al.*, 2012; WHO, 2015). Según las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) alrededor de 4.2 millones de muertes prematuras ocurren cada año por la exposición a partículas PM<sub>2.5</sub> (OMS, 2018, Figura a).

Se considera que la población mayormente afectada por la exposición a las partículas más pequeñas del CN a nivel global son las mujeres (con una exposición promedio anual de 337 µg/m<sup>3</sup>) y los niños (285 µg/m<sup>3</sup>), mientras que los hombres se ven expuestos a concentraciones relativamente menores (204 µg/m<sup>3</sup>). Estos niveles son más de 20 veces mayores que los recomendados por la OMS como promedio anual (10 µg/m<sup>3</sup>; WHO, 2015). Se ha identificado que, por lo general, los sectores de



la población con ingresos bajos y medios son los más vulnerables a la exposición de CN debido a su dependencia de los biocombustibles para cocinar o calentar la vivienda. En el caso de México, en el año 2014, aproximadamente el 18.6% de la población utilizaba carbón o leña para cocinar y, por consiguiente, se encontraba en riesgo de padecer enfermedades derivadas de la exposición al CN.

Como parte de las acciones encaminadas a reducir los problemas de salud derivados del deterioro de la calidad del aire (en particular por efecto del CN) y también con la finalidad de reducir la emisión de compuestos de efecto invernadero que exacerban en calentamiento global, México se ha comprometido, de manera no condicionada, a reducir para el año 2030 en 51% sus emisiones de CN. Esta reducción se podría incrementar, de manera condicionada, hasta alcanzar un 70% (Semarnat, 2015). Para cumplir esta última meta es necesario adoptar mecanismos de mercado y acuerdos a nivel global que comprendan acciones tales como asignar precio al carbono internacional, ajustes a aranceles por contenido de carbono, cooperación técnica, acceso a recursos financieros de bajo costo y a transferencia de tecnología (Semarnat, 2015).

#### Referencias:

Bond, T.C., S.J. Doherty y D.W. Fahey *et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (118):5380-5552. 2013. Disponible en: [doi:10.1002/jgrd.50171](https://doi.org/10.1002/jgrd.50171).

Janssen, N.A.H., M.E. Gerlofs-Nijland, T. Lanki *et al.* *Health effects of black carbon*. WHO. Dinamarca. 2012.

Molina, M., D. Zaelke, K.M. Sarmac *et al.* Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (106)49:20616-20621. 2009.

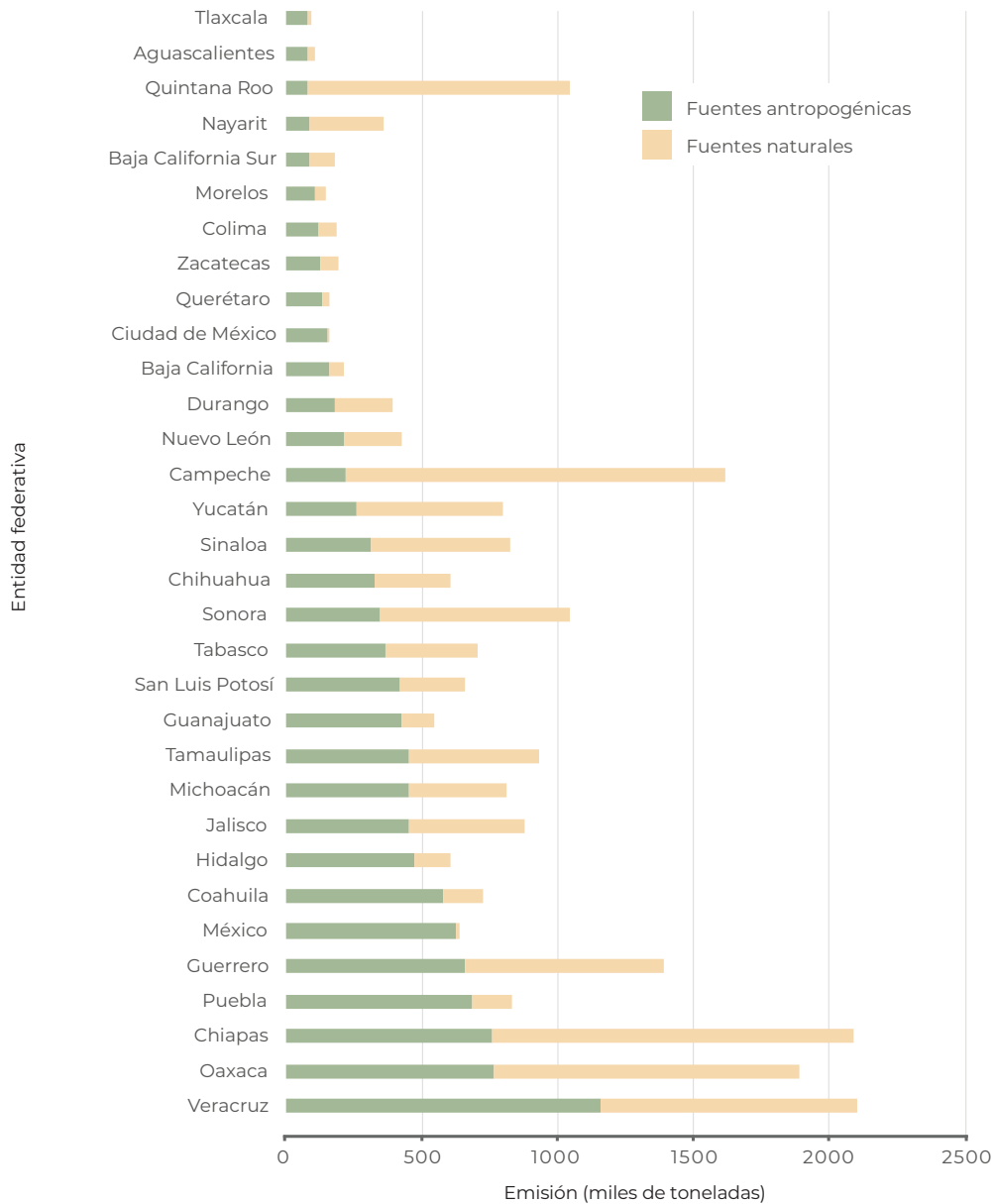
OMS. *Calidad del aire y salud*. OMS. 2018. Disponible en: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Fecha de consulta: septiembre de 2018.

Semarnat. *Intended Nationally Determined Contribution. iNDC. Semarnat*. México. 2015. Disponible en: [www4.unfcccint/submissions/INDC/Published%20Documents/Mexico/1/MEXICO%20INDC%2003.30.2015.pdf](http://www4.unfcccint/submissions/INDC/Published%20Documents/Mexico/1/MEXICO%20INDC%2003.30.2015.pdf). Fecha de consulta: julio de 2016.

Tollefson, J. Atmospheric Sciences: Climate's smoky spectre. *Nature* 460: 29-32. 2009.

WHO. *Reducing Global Health Risks Through Mitigation of Short-Lived Climate Pollutants. Scoping. Report For Policy-makers*. WHO. Suiza. 2015.

**Figura 5.4** Emisión de contaminantes por entidad federativa, 2014



**Nota:**  
La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles.

**Fuente:**  
Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, Semarnat. México. Agosto de 2018.

## MONITOREO Y CALIDAD DEL AIRE

### Redes de monitoreo existentes en el país

El desarrollo de los centros de población promueve una mayor demanda de servicios (como transporte, agua, electricidad y su infraestructura asociada) que genera, a su vez, una mayor generación de residuos y la emisión y concentración



de contaminantes a la atmósfera (Lezama, 2010). Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire constituyen una fuente importante de información que permite conocer las concentraciones de contaminantes a las que está expuesta la sociedad y apoyar el diseño de políticas públicas para reducir su impacto sobre la salud. En este contexto, la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, establece las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire y su campo de aplicación, que incluye zonas o centros de población que cuenten con alguna de las siguientes condiciones: asentamientos humanos con más de 500 000 habitantes, zonas metropolitanas, asentamientos humanos con emisiones superiores a 20 000 toneladas anuales de contaminantes criterio primarios, conurbaciones y aquellas que por sus características requieran del establecimiento de estaciones de monitoreo y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos (DOF, 2012b).

En México se han establecido estaciones y redes de monitoreo atmosférico en sitios que van desde ciudades y zonas metropolitanas, hasta localidades donde existe una intensa actividad industrial. En este contexto, el país contaba en 2017 con equipos instalados para la medición de estos contaminantes en 30 entidades, con un total de 249 estaciones (Mapa 5.1; cuadro D3\_AIRE01\_02).

Es importante resaltar que no todas las ciudades que cuentan con monitoreo poseen datos suficientes ni confiables que permitan examinar la evolución de las concentraciones de contaminantes, y por tanto, de la calidad del aire en periodos largos de tiempo. La calidad de la información que es generada en cada estación a lo largo del país es verificada y validada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y este mismo instituto es el responsable de dar a conocer la información. Dado lo anterior, en las siguientes secciones se muestran las tendencias en la calidad del aire solo para aquellas ciudades o zonas metropolitanas del país que cuentan con información adecuada para hacerlo.

La red de monitoreo más grande del país se localiza en la ZMVM, que cuenta con 23 estaciones de monitoreo automático, 2 manuales y 9 mixtas. La red registra, entre otras variables, las concentraciones de  $O_3$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , considerados como contaminantes criterio. Debido a la mejora en la calidad de las gasolinas, ya no se hace necesario incluir información sobre las emisiones de plomo (Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, 2018).

Otros ejemplos de ciudades con monitoreo que cuentan con datos desde mediados de los años noventa son Guadalajara, Monterrey, Toluca y ciudades fronterizas como Tijuana, Mexicali y Ciudad Juárez. La lista completa de las estaciones de monitoreo y los contaminantes registrados se pueden consultar en la Base de Datos Estadísticos del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (BADESNIARN).<sup>10</sup> En el Mapa 5.2 se muestra el cumplimiento de las normas de calidad del aire en ciudades que realizan monitoreo ambiental hasta el año 2017.

---

<sup>10</sup> Puede consultarse en la sección "Atmósfera" de la Base de Datos en la dirección electrónica: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia\\_mce/html/mce\\_index.html?De=BADESNIARN](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/mce_index.html?De=BADESNIARN)



La calidad del aire de la Ciudad de México empezó a monitorearse en 1966, con la instalación de cuatro estaciones que registraban las concentraciones de bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y de las partículas suspendidas. A partir de ese momento el esfuerzo e interés por conocer el tipo y la cantidad de los contaminantes emitidos a la atmósfera creció y en 1972 se creó la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente y se adoptaron las metodologías usadas por la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para realizar el monitoreo de contaminantes (Zuk, *et al.*, 2007; Secretaría de Medio Ambiente, 2002; Sedema, 2018).

Sin embargo, la información recopilada no siempre se publicó de forma sistemática, y es hasta 1986 que se propuso la realización de un inventario de emisiones periódico que permitiera estudiar la producción de contaminantes atmosféricos y la implementación de medidas adecuadas para salvaguardar la salud de los habitantes de la urbe. A raíz de esta iniciativa, en 1989 se realizó el inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y diversas secretarías integraron el Programa Integral para el Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA). A partir de ese año las autoridades locales y federales que convergen en la zona metropolitana determinaron las políticas ambientales que permitieron realizar el monitoreo de la calidad del aire y tomar las medidas pertinentes en caso de que se rebasaran las normas establecidas. Desde 1994 los inventarios de emisiones de la ZMVM se publican bienalmente, actualizando el grado de precisión y desagregación de la información (Sedema, 2018).

La red de monitoreo de la ZMVM ha crecido significativamente y pasó de cuatro estaciones en 1966 a cubrir la totalidad de las delegaciones que conforman la Ciudad de México y algunos municipios de las entidades vecinas. Hasta el año 2005 la ZMVM estuvo conformada por las 16 delegaciones del Distrito Federal (ahora denominadas alcaldías) y 18 municipios del estado de México, más recientemente se han incorporado más municipios del estado de México, hasta llegar a 59, además de un municipio del estado de Hidalgo (Sedema, 2018).

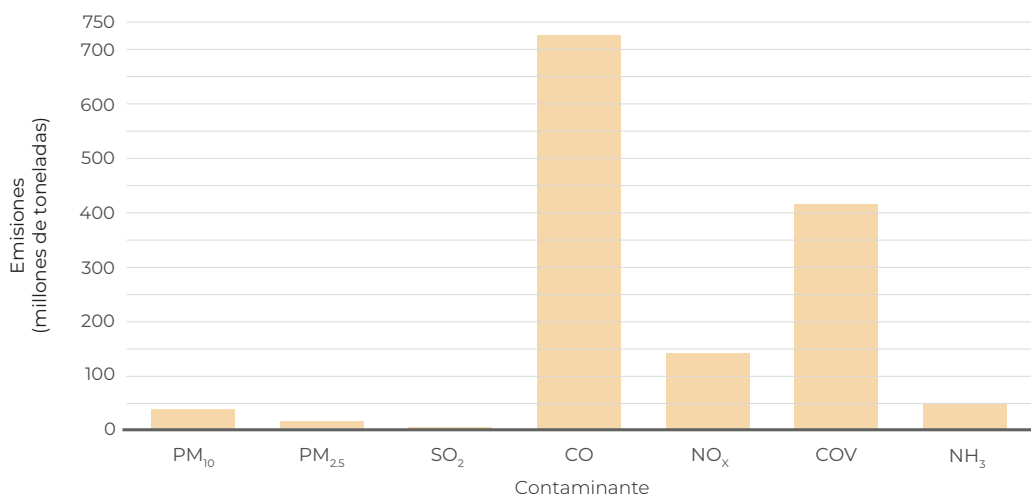
Con el tiempo también ha aumentado el número de contaminantes criterio que se monitorean. Antes de 1998 se generaba información sobre partículas iguales o menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos totales (HC) y bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). A partir del año 2000 se agregó también el monitoreo de las partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), y en vez de reportar los hidrocarburos totales (HCT) se empezaron a reportar los compuestos orgánicos totales (COT), mientras que el metano ( $\text{CH}_4$ ) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) se reportan ahora por separado.



### Emisiones

En la ZMVM, en el año 2016, se emitieron 1.39 millones de toneladas de contaminantes criterio: 37 967 toneladas de partículas  $PM_{10}$  (2.7 del total de contaminantes), 15 433 toneladas de partículas  $PM_{2.5}$  (1.1%), 2 662 toneladas de  $SO_2$  (0.2%), 728 562 toneladas de CO (52.5%), 140 607 toneladas de  $NO_x$  (10.1%), 416 089 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV; 30%) y 47 717 toneladas de  $NH_3$  (3.4%; Sedema, 2018; Figura 5.1.a).

**Figura 5.1.a** Emisión de contaminantes atmosféricos en la ZMVM, 2016



**Notas:**

$PM_{10}$ : partículas iguales o menores a 10 micrómetros  
 $PM_{2.5}$ : partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros  
 $SO_2$ : dióxido de azufre  
 CO: monóxido de carbono  
 $NO_x$ : óxidos de nitrógeno  
 COV: compuestos orgánicos volátiles  
 $NH_3$ : amoníaco

**Fuente:**

Sedema. *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Sedema. México, 2018.

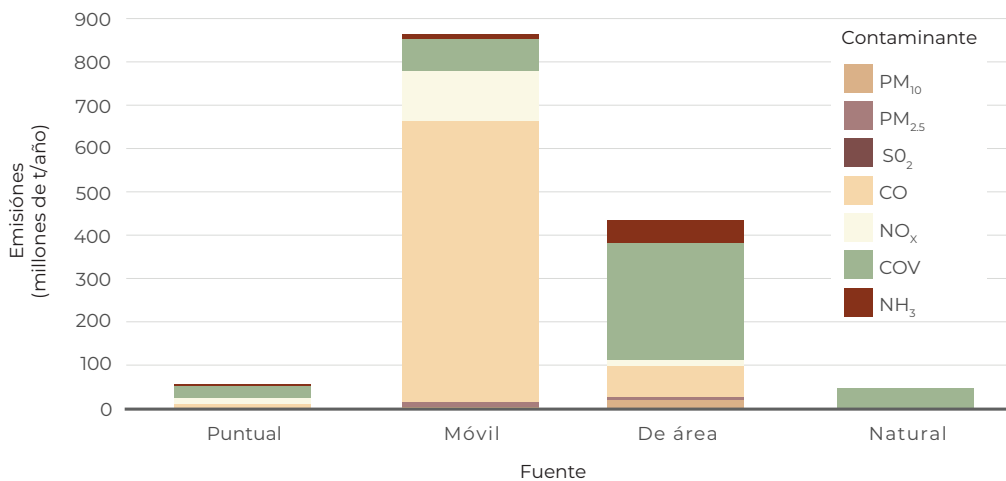
En lo que se refiere al origen de los contaminantes, el 61.8% de las emisiones provino de las fuentes móviles (857 971 toneladas), siendo el CO el contaminante con las mayores emisiones (646 434 toneladas; 75.3% del total, Figura 5.b). Las altas emisiones asociadas a las fuentes móviles se deben a factores como el número de vehículos en circulación, la cantidad de combustible que consumen y las emisiones de vehículos sin tecnologías de control incorporadas. En 2016, los autos particulares representaban el 58.2% de los vehículos que circulaban en la ZMVM y también los que producían la mayor cantidad de contaminantes emitidos por fuentes móviles (32.25%). No obstante, los tractocamiones, aunque menos abundantes (3.04% del



total de vehículos), son una fuente muy importante de generación de material particulado, de tal forma que este tipo de vehículos generan el 18.6% de las partículas  $PM_{10}$  y el 25% de las  $PM_{2.5}$  (Sedema, 2018).

A las fuentes móviles le siguieron en importancia las fuentes de área (que emitieron 30.8% del total de los contaminantes de la ZMVM; con 428 396 toneladas), las fuentes puntuales (4%; 54 898 toneladas), mientras que las fuentes naturales, las cuales corresponden a la vegetación y suelos, contribuyeron con un porcentaje muy reducido de emisiones (3.4% del total, con 47 772 toneladas; Figura 5.1.b; Sedema, 2018).

**Figura 5.1.b** Emisión de contaminantes atmosféricos por fuente en la ZMVM, 2016



**Notas:**

- CO: monóxido de carbono
- COV: compuestos orgánicos volátiles
- NH<sub>3</sub>: amoníaco
- NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno
- PM<sub>2.5</sub>: partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros
- PM<sub>10</sub>: partículas iguales o menores a 10 micrómetros
- SO<sub>2</sub>: dióxido de azufre

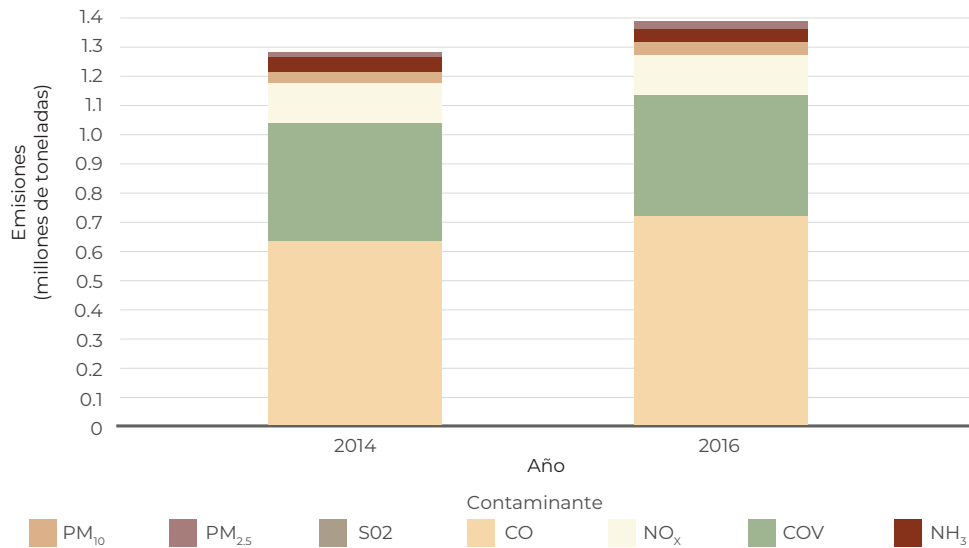
**Fuente:**

Sedema. *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Sedema. México. 2018.

La emisión de contaminantes de la ZMVM se incrementó un 8% del año 2014 al 2016. El mayor aumento se registró en la emisión de CO (13.1%), seguido por las partículas  $PM_{2.5}$  (10.1%) y el  $SO_2$  (7.95). Mientras que los contaminantes con el menor cambio en sus emisiones fueron los  $NO_x$  (0.32%) y el  $NH_3$  (2.2%; Figura 5.1.c).



**Figura 5.1.c** Emisión de contaminantes en la ZMVM, 2014 - 2016



**Notas:**

El inventario 2014 contempla 16 delegaciones y 59 municipios, mientras que el inventario 2016 presenta los datos relativos a 16 delegaciones y 60 municipios.

CO: monóxido de carbono

COV: compuestos orgánicos volátiles

NH<sub>3</sub>: amoníaco

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno

PM<sub>2.5</sub>: partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros

PM<sub>10</sub>: partículas iguales o menores a 10 micrómetros

SO<sub>2</sub>: dióxido de azufre

**Fuente:**

Sedema. *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Sedema. México. 2018.

**Referencias:**

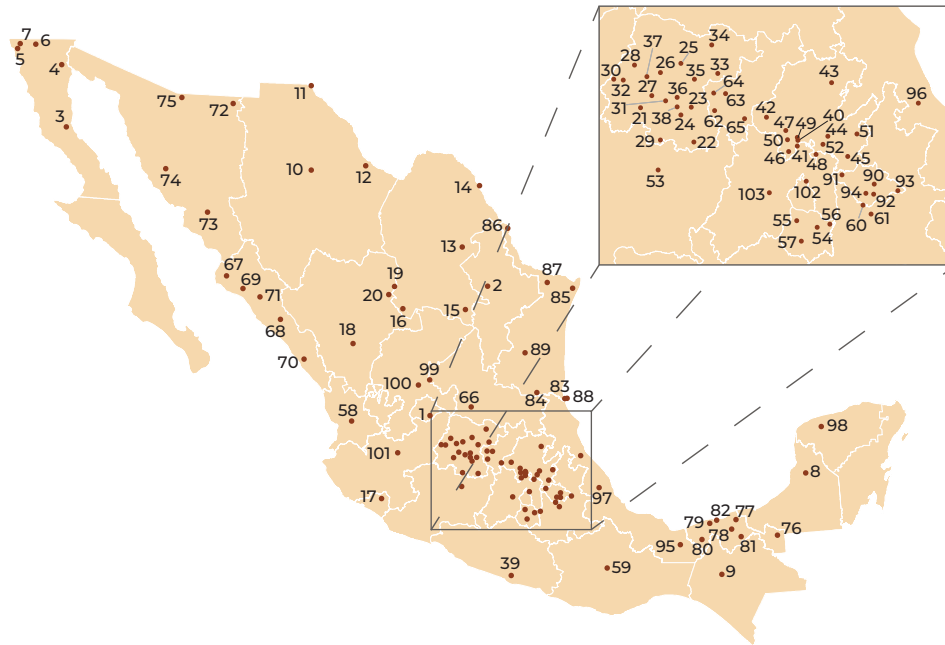
Sedema. *Inventarios de Emisiones de la ZMVM*. Sedema. México. Disponible en: [www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhn-mI=&dc=Zg==](http://www.aire.df.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhn-mI=&dc=Zg==). Fecha de consulta: octubre de 2018.

Sedema. *Inventario de emisiones de la Ciudad de México 2016*. Sedema. México. 2018. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/inventario-emisiones-2016.pdf>.

Zuk, M., M.G. Tzintzun y L. Rojas Bracho. *Tercer Almanaque de Datos y Tendencias de la Calidad del Aire en Nueve Ciudades Mexicanas*. Semarnat, INE. México. 2007.

## Mapa 5.1

### Zonas metropolitanas o poblaciones con equipos instalados para el monitoreo de la calidad del aire, 2017



#### Zona metropolitana o población

1 Aguascalientes	27 Irapuato	53 Morelia	79 Comalcalco
2 AMM	28 León	54 Cuautla	80 Huimanguillo
3 Ensenada	29 Moreleón	55 Cuernavaca	81 Macuspana
4 Mexicali	30 Purísima del Rincón	56 Ocuilco	82 Paraíso
5 Playas de Rosarito	31 Salamanca	57 Zacatepec	83 Ciudad Madero
6 Tecate	32 San Francisco del Rincón	58 Tepic	84 El Mante
7 Tijuana	33 San José Iturbide	59 Oaxaca de Juárez	85 Matamoros
8 Campeche	34 San Luis de la Paz	60 Coronango	86 Nuevo Laredo
9 Tuxtla Gutiérrez	35 San Miguel de Allende	61 Puebla	87 Reynosa
10 Chihuahua	36 Santa Cruz de Juventino Rosas	62 Corregidora	88 Tampico
11 Juárez	37 Silao de la Victoria	63 El Marqués	89 Victoria
12 Ojinaga	38 Villagrán	64 Querétaro	90 Apizaco
13 Monclova	39 Acapulco de Juárez	65 San Juan del Río	91 Calpulalpan
14 Piedras Negras	40 Atitalaquia	66 San Luis Potosí	92 Chiautempan
15 Saltillo	41 Atotonilco de Tula	67 Ahome	93 Cuapixtla
16 Torreón	42 Huichapan	68 Culiacán	94 Tlaxcala
17 Villa de Álvarez	43 Lolotla	69 Guasave	95 Minatitlán
18 Durango	44 Pachuca de Soto	70 Mazatlán	96 Poza Rica de Hidalgo
19 Gómez Palacio	45 Tepeapulco	71 Salvador Alvarado	97 Xalapa
20 Lerdo	46 Tepeji del Río de Ocampo	72 Agua Prieta	98 Mérida
21 Abasolo	47 Tepetitlán	73 Cajeme	99 Guadalupe
22 Acámbaro	48 Tizayuca	74 Hermosillo	100 Zacatecas
23 Celaya	49 Tlaxcoapan	75 Nogales	101 ZMG
24 Cortazar	50 Tula de Allende	76 Balancán	102 ZMVM
25 Dolores Hidalgo	51 Tulancingo de Bravo	77 Centla	103 ZMVT
26 Guanajuato	52 Zapotlán de Juárez	78 Centro	

#### Fuente:

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. Marzo de 2018.

Derivado de los problemas de la contaminación del aire y de sus efectos sobre la salud de la población, se han generado normas que establecen las concentraciones máximas de contaminantes en períodos definidos de tiempo que, de rebasarse, incrementan los riesgos a la salud. Nuestro país ha tenido avances y mejoras significativas en la definición de sus normas de calidad del aire desde su primera publicación, en 1994, hasta la fecha. No obstante, los valores establecidos como

## Mapa 5.2

### Cumplimiento de la normatividad de calidad del aire en zonas metropolitanas o poblaciones en México, 2016



**Notas:**

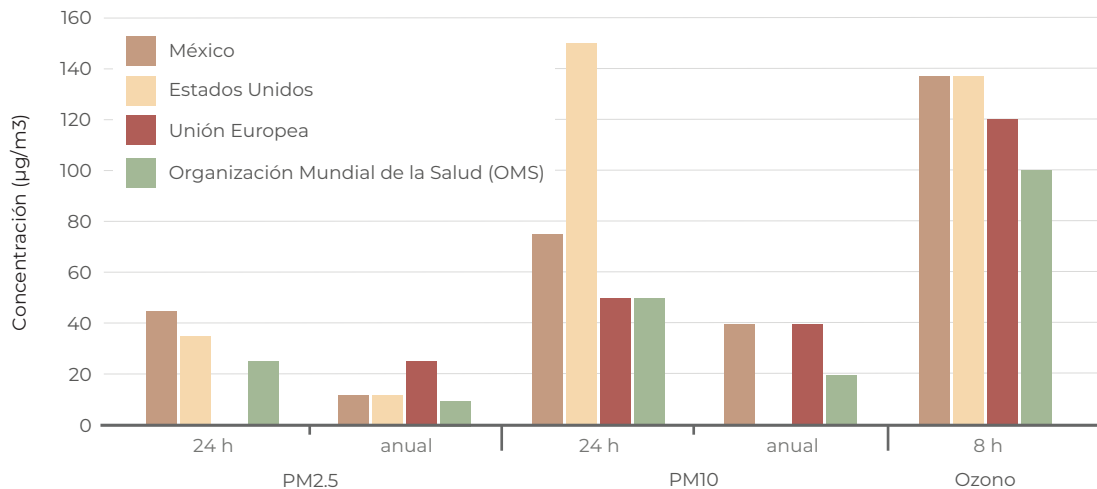
- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca

**Fuente:**

INECC. Informe Nacional de Calidad del Aire 2016. México. INECC. México. 2017. Disponible en: [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/294715/INFORME\\_NACIONAL\\_DE\\_CALIDAD\\_DEL\\_AIRE\\_2016.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/294715/INFORME_NACIONAL_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_2016.pdf). Fecha de consulta: agosto de 2018.

límites máximos de concentración aún se encuentran por arriba de los recomendados por la OMS, la Unión Europea y, en algunos casos, respecto a Estados Unidos (Figura 5.5; cuadro D3\_R\_AIRE01\_03). Estas normas son expedidas por la Secretaría de Salud, mientras que la Semarnat es responsable de las normas que establecen los procedimientos para la medición y calibración del equipo empleado para medir las concentraciones de los contaminantes, de establecer los valores máximos permisibles de emisión a la atmósfera y las especificaciones en cuanto a la calidad de los combustibles que se utilizan.

**Figura 5.5** Límites máximos recomendados de algunos contaminantes



**Fuentes:**

European Commission. Environment. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>. Fecha de consulta: agosto de 2018.  
 Organización Mundial de la Salud. *Calidad del aire (exterior) y salud*. OMS. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. Fecha de consulta: agosto de 2018.  
 US Environmental Protection Agency. Criteria Air pollutants. Disponible en: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Fecha de consulta: agosto de 2018.  
 PM<sub>2.5</sub>: Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014: No exceder 45 µg/m<sup>3</sup> como promedio de 24 horas y no exceder de 12 µg/m<sup>3</sup> como promedio anual.  
 PM<sub>10</sub>: Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. No exceder 75 µg/m<sup>3</sup> como promedio de 24 horas y no exceder de 40 µg/m<sup>3</sup> como promedio anual.  
 O<sub>3</sub>: Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014. No exceder 0.070 ppm (137 µg/m<sup>3</sup>) como promedio móvil de 8 h.

**Calidad del aire en algunas ciudades**

El análisis de la calidad del aire puede realizarse de distintas formas, ya sea midiendo la concentración de contaminantes, del número de días en los que se rebasan los límites definidos por las normas o a través de índices de calidad del aire. La evaluación de las concentraciones de contaminantes junto con el número de días en los que se exceden los valores establecidos en la normatividad permite obtener una aproximación a la dinámica temporal de la calidad del aire y así es posible evaluar la efectividad de las acciones implementadas para controlar la contaminación atmosférica.

La generación de indicadores de calidad del aire es un proceso complejo que involucra la recopilación, validación, integración y análisis de un gran volumen

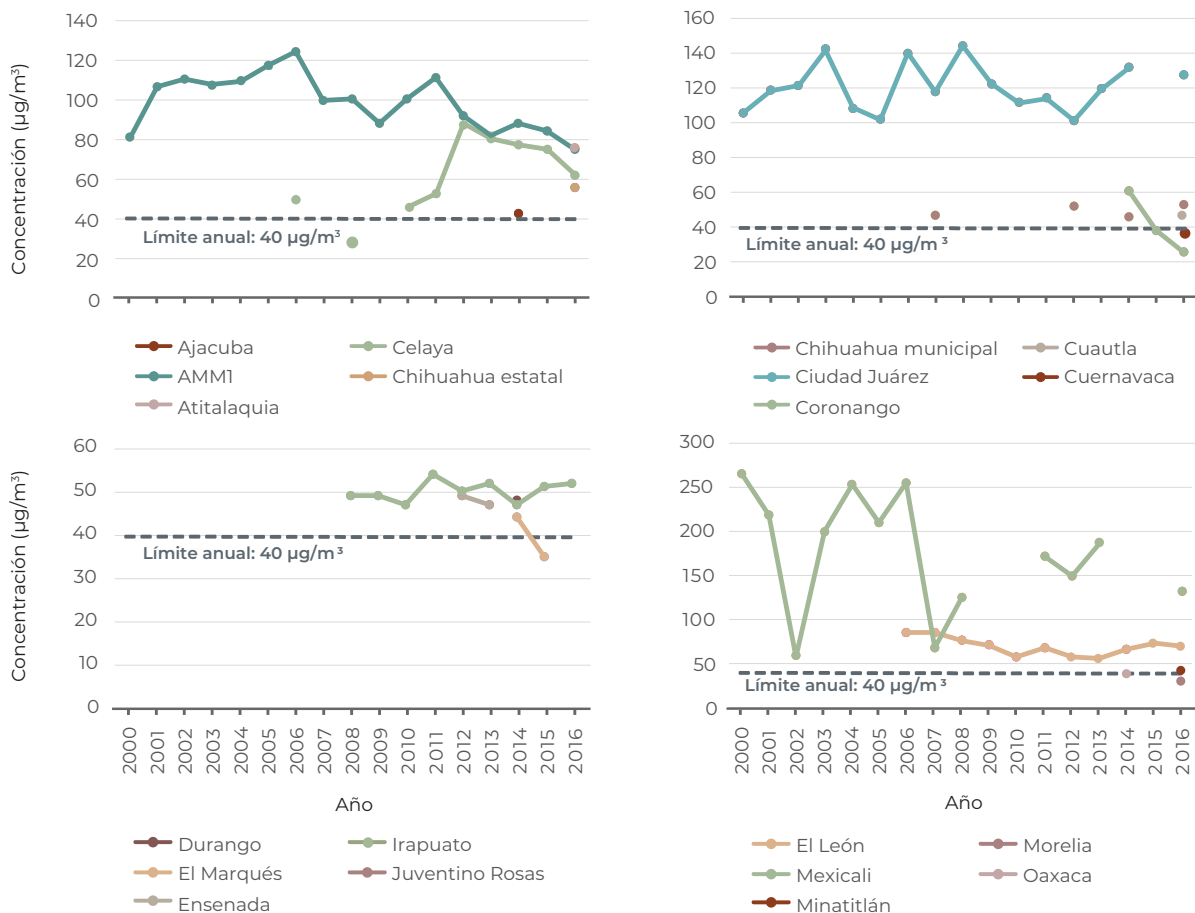


de datos de los diversos contaminantes en diferentes estaciones de monitoreo y en diversas ciudades. Por ello, aunque existe información histórica para todos los contaminantes criterio, por el momento los datos disponibles, con buena calidad y actualizados sobre la calidad del aire solo incluyen cuatro contaminantes:  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  y  $SO_2$ .

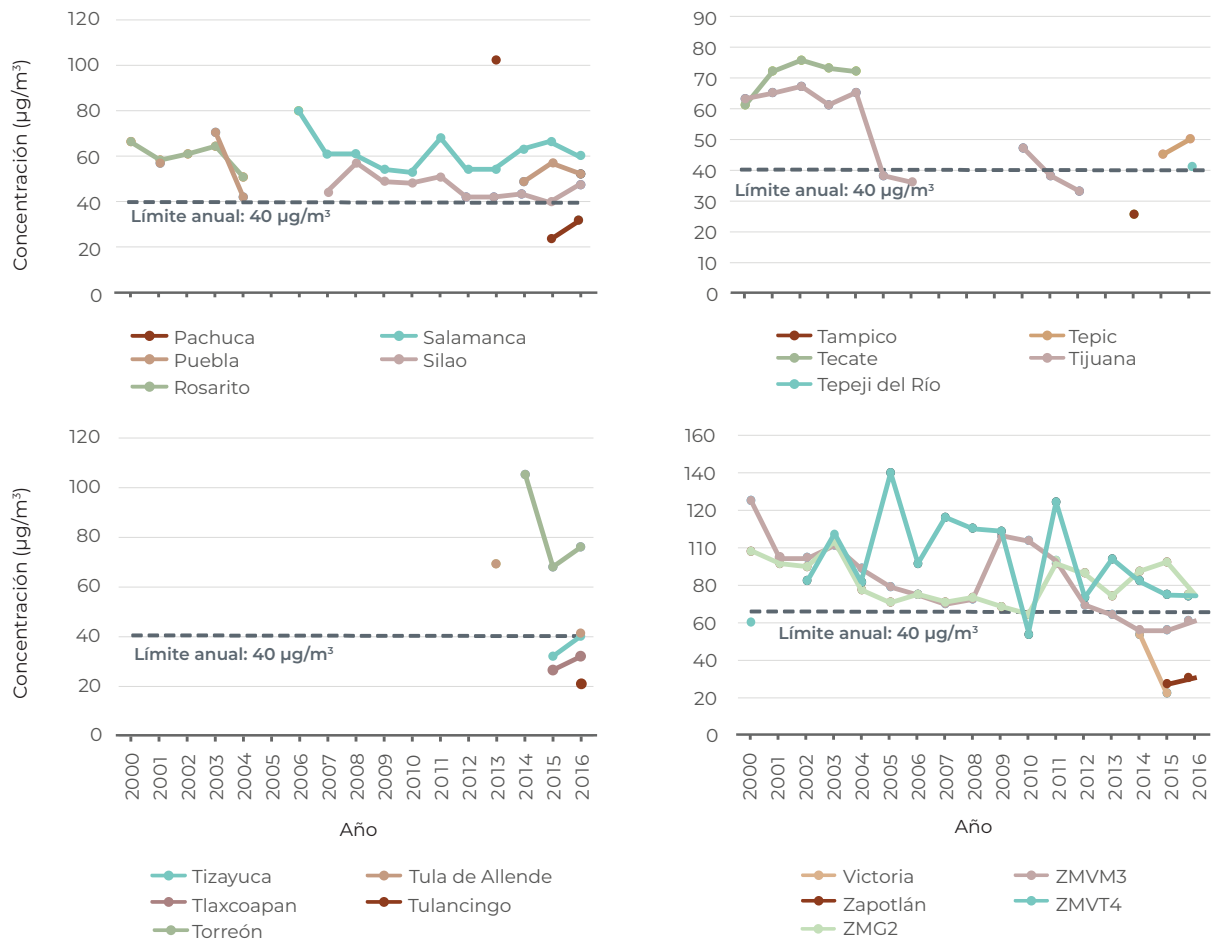
### Concentraciones atmosféricas

En el caso del material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), se reporta el promedio anual de los promedios de 24 horas. El valor límite determinado en la norma para las partículas  $PM_{10}$  es de  $40 \mu g/m^3$  mientras que para las partículas  $PM_{2.5}$  el valor límite corresponde a  $12 \mu g/m^3$ . En 2016 el valor de la norma para las partículas  $PM_{10}$  solo se cumplió en las siguientes ciudades: Coronango (Puebla;  $26 \mu g/m^3$ ), Cuernavaca (Morelos;  $37 \mu g/m^3$ ), Morelia (Michoacán;  $30 \mu g/m^3$ ), Tizayuca, Tlaxcoapan, Tulancingo y Zapotlán (Hidalgo; 40, 32, 21 y  $30 \mu g/m^3$ , respectivamente). Mientras que las concentraciones más elevadas se registraron en Ciudad Juárez ( $127 \mu g/m^3$ ) y Mexicali ( $132 \mu g/m^3$ ; Figura 5.6; IB 1.1-5; cuadro D3\_AIRE01\_22).

**Figura 5.6** Concentración anual de  $PM_{10}$  (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2000 - 2016



**Figura 5.6** Continuación...



**Notas:**

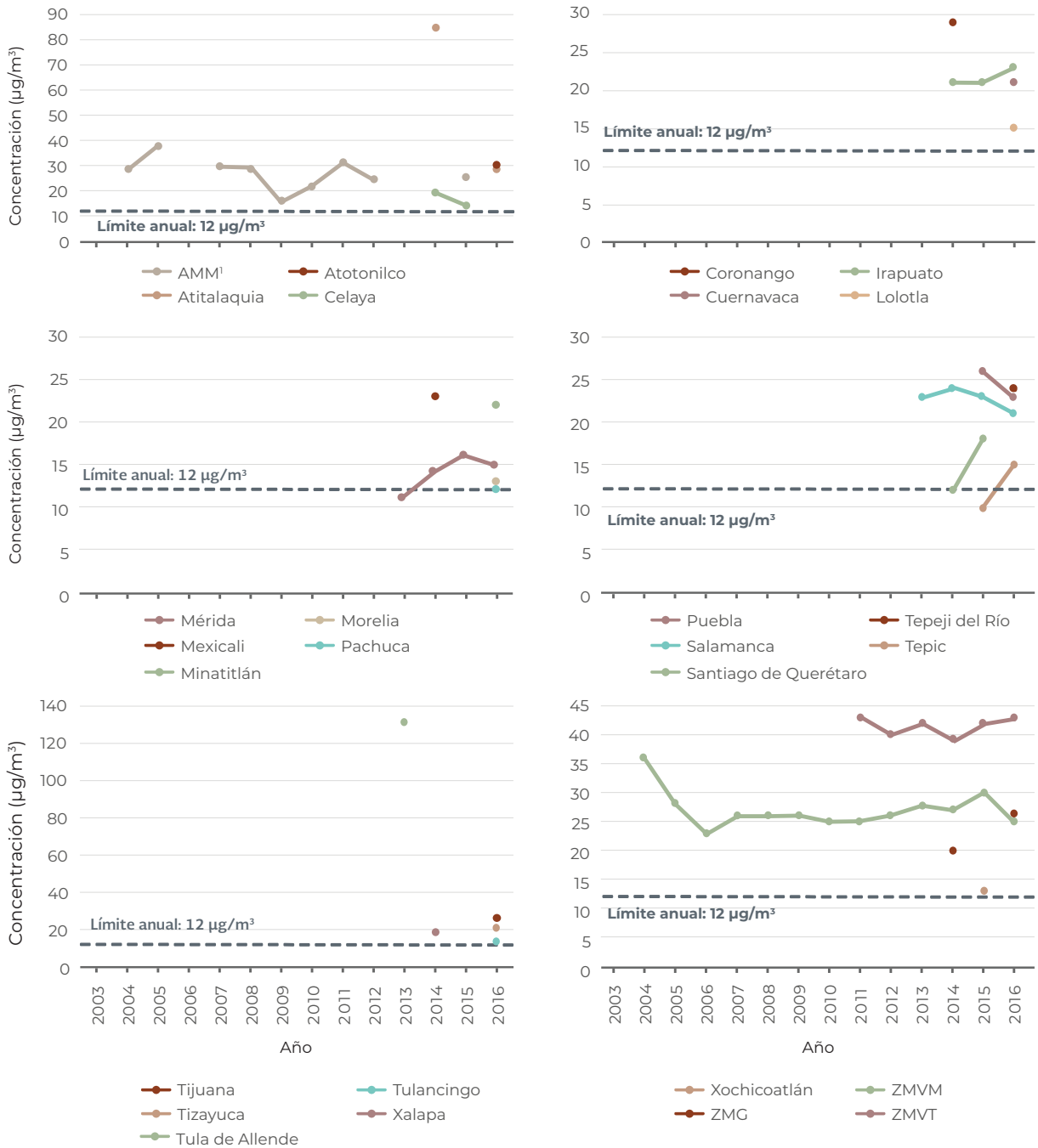
- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

**Fuentes:**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. Marzo de 2018.  
 NECC. *Informe Nacional de la Calidad del Aire*. Ediciones 2014-2016. INECC. México. Disponibles en: [www.gob.mx/busquedas?utf8=%E2%9C%93&q=informe+de+la+calidad+del+aire&site=inecc&documentos&fechaInicio=&fechaFin=](http://www.gob.mx/busquedas?utf8=%E2%9C%93&q=informe+de+la+calidad+del+aire&site=inecc&documentos&fechaInicio=&fechaFin=)

Respecto a las partículas PM<sub>2.5</sub>, pocas ciudades han monitoreado este contaminante por largos períodos de tiempo: el registro histórico más completo corresponde a la ZMVM y el AMM. En años recientes más ciudades se están incorporando a su monitoreo, debido a la repercusión que este contaminante tiene en la salud de las personas. En 2016 solo la ciudad de Pachuca (Hidalgo) registró valores dentro de lo permitido por la norma (12 µg/m<sup>3</sup>; Figura 5.7; IB 1.1-8; cuadro D3\_AIRE01\_23). El caso más severo de contaminación del aire con estas partículas ocurrió en la ZMVT, en donde la concentración registrada fue de 43 µg/m<sup>3</sup>, es decir, más de tres veces el valor permitido.

**Figura 5.7** Concentración anual de PM<sub>2.5</sub> (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2003 - 2016



**Notas:**

<sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.

<sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.

<sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

<sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

**Fuentes:**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. Marzo de 2018.

INECC. *Informe Nacional de la Calidad del Aire*. Ediciones 2014-2016. INECC. México. Disponibles en: [www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93&q=informe+de+la+calidad+del+aire&site=inecc&documentos&fechaInicio=&fechaFin=](http://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93&q=informe+de+la+calidad+del+aire&site=inecc&documentos&fechaInicio=&fechaFin=)

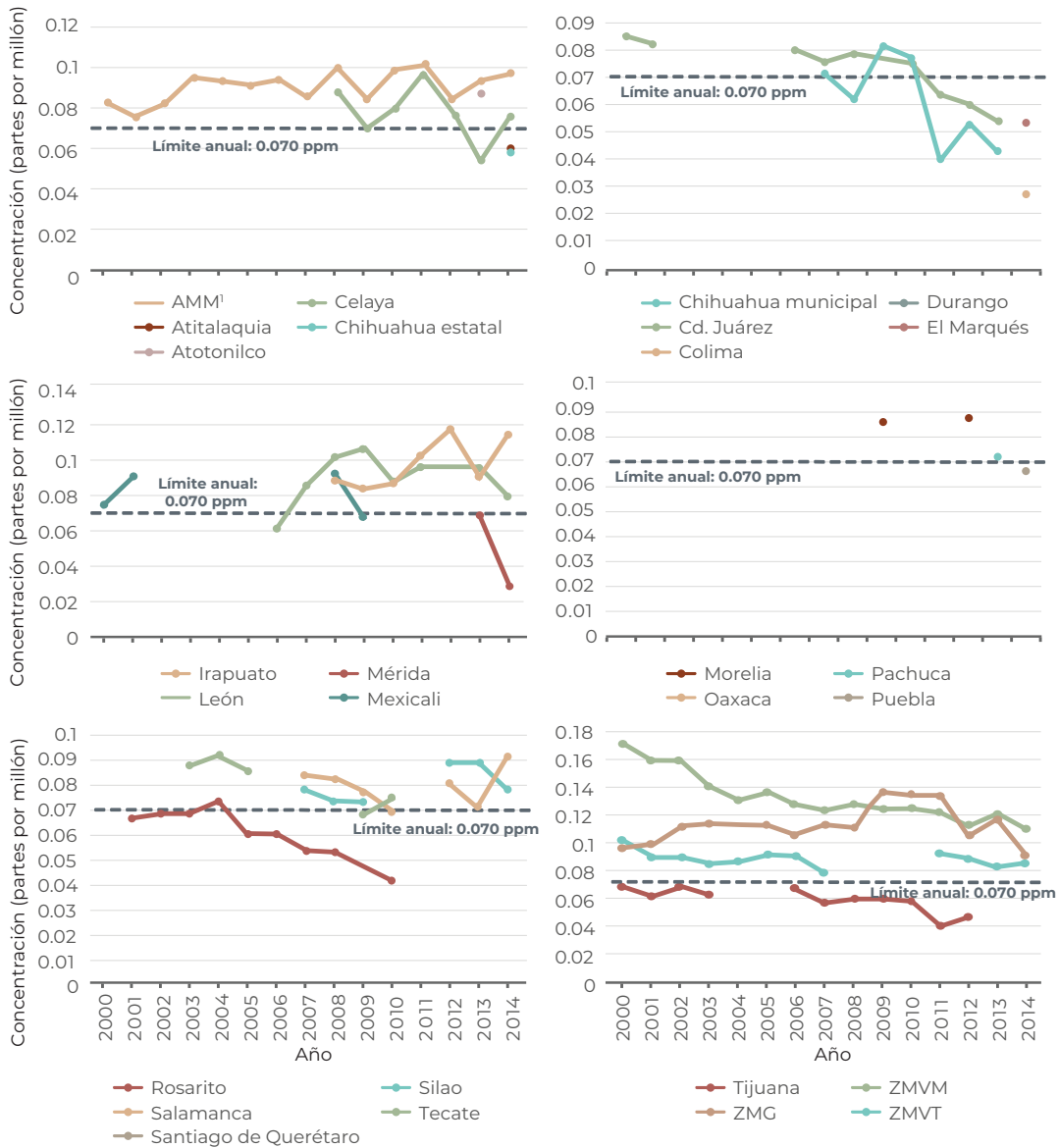
El ozono afecta la calidad del aire en varias ciudades. La Norma Oficial NOM-020-SSAI-2014 establece los límites permisibles de concentración de ozono anual en  $0.070 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio móvil de ocho horas. Tijuana, Rosarito y las zonas metropolitanas AMM, ZMG, ZMVM y ZMVT son las que han monitoreado este contaminante durante periodos más prolongados de tiempo. En el periodo comprendido entre 2000 y 2014 el comportamiento de la concentración de  $\text{O}_3$  en varias ciudades no muestra una tendencia clara, pero en el caso de Ciudad Juárez, Rosarito, Tijuana (Baja California), Chihuahua (red municipal) y la ZMVM puede hablarse de un descenso progresivo en su concentración a lo largo del tiempo. En 2014 los valores más bajos para este contaminante se registraron en Colima (Colima;  $0.027 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Mérida (Yucatán;  $0.029 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y Querétaro (Querétaro;  $0.031 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Figura 5.8; IB 1.1-7; cuadro D3\_AIRE01\_21).

En el caso de las concentraciones de  $\text{SO}_2$ , solo Salamanca (Guanajuato) y la ZMVM cuentan con datos para varios años en el período que va de 2000 a 2014. En ambos casos, la concentración de este contaminante ha tendido a disminuir en el tiempo, aunque no ha sido lo suficiente para estar por debajo de lo establecido en la norma como límite anual (0.025 ppm; Figura 5.9; IB 1.1-6; cuadro D3\_AIRE01\_18). En 2014 cuatro ciudades registraron concentraciones por debajo de los valores permisibles: Chihuahua (red estatal; 0.016 ppm), Colima (0.017 ppm), Oaxaca (0.016 ppm) y Puebla (0.024 ppm). Sin embargo, estas ciudades no han generado datos para más años, por lo que no es posible observar tendencias en las concentraciones de este contaminante a lo largo del tiempo.

### Número de días con buena calidad del aire

Como se mencionó anteriormente, el análisis de la calidad del aire también puede hacerse evaluando el número de días en que se rebasa el valor permitido por la norma, sin embargo, en muchas ciudades con equipo de monitoreo instalado no se cuenta con los valores diarios de calidad del aire por múltiples razones, por ejemplo, porque no se realizan el número de mediciones suficientes, porque los datos no se consideran confiables una vez que se hace su recopilación o, incluso, porque el equipo de monitoreo se encuentra averiado y el registro de la calidad del aire no se puede llevar a cabo. En la Tabla 5.1 se muestra la calidad del aire para algunas ciudades y zonas metropolitanas, con respecto al material particulado ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ),  $\text{O}_3$  y  $\text{SO}_2$ , aunque este contaminante ha dejado de monitorearse en años recientes debido a la comercialización de gasolinas sin azufre. Por mencionar sólo un par de ciudades, la ZMG tiene mayormente días con calidad regular de aire en el caso del  $\text{O}_3$  y de las partículas  $\text{PM}_{10}$ , mientras que las partículas  $\text{PM}_{2.5}$  se han monitoreado sólo dos años. El AMM tiene mayormente días con calidad del aire regular en el caso de los tres contaminantes.

**Figura 5.8** Concentración anual de O<sub>3</sub> (quinto máximo de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 horas), 2000 - 2014



**Notas:**

- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

**Fuentes:**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. Junio de 2017.  
 INECC. *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2014*. INECC. México. 2015. Disponible en: [www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/Informe%20nacional%20calidad%20del%20aire%202014\\_Final.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/Informe%20nacional%20calidad%20del%20aire%202014_Final.pdf).

Para mayor detalle sobre los días con calidad del aire buena, regular y mala por ciudad y contaminante, se sugiere revisar las tablas en la base de datos estadísticos del SNIARN (Badesniarn; cuadro D3\_AIRE01\_20), así como el Informe Nacional de Calidad del Aire 2016 (INECC, 2017). No existe información actualizada a 2016 para el CO ni para el NO<sub>2</sub> en las ciudades que realizan monitoreo de calidad del aire. Si se desea examinar las tendencias históricas de estos contaminantes se recomienda revisar el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México edición 2012 (Semarnat 2013).

**Figura 5.9** Concentración anual de SO<sub>2</sub> (promedio anual de las concentraciones horarias), 2000 - 2014



**Notas:**

- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

**Fuente:**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. Julio de 2016.

**Tabla 5.1**

**Calidad del aire con suficiencia del 75 por ciento, en algunas ciudades y zonas metropolitanas (número de días)**

Entidad federativa	Ciudad o municipio	Contaminante	Calidad del aire	Año														
				2000	2002	2004	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Guanajuato	Irapuato	O <sub>3</sub>	Buena				77	148	164	105	156	75	84	175	127	41		
			Regular				166	201	180	217	183	284	249	173	203	235		
			Mala				0	2	1	0	12	6	26	17	35	70		
			D. I.				122	14	21	43	14	0	7	0	0	19		
		PM <sub>10</sub>	Buena				137	212	202	259	268	238	281	264	269	94		
			Regular				39	134	141	102	90	121	85	101	96	234		
			Mala				1	7	10	4	6	1	0	0	0	37		
		PM <sub>2.5</sub>	D. I.				188	12	13	0	1	5	0	0	0	0		
			Buena											132	322	185		
	Regular												48	31	150			
	Mala												0	0	5			
	D. I.												185	12	25			
	Buena					181	85	163	246	297	203	155	263	165	46			
	O <sub>3</sub>	Regular				141	267	202	115	68	160	206	100	190	310			
		Mala				17	11	1	2	0	0	5	2	10	9			
		D. I.				26	2	0	2	0	2	0	0	0	0			
		Buena	124	163	163	186	220	326	359	359	355	275	358					
	SO <sub>2</sub>	Regular	122	90	105	115	129	37	6	6	10	89	7					
Mala		86	100	94	64	16	3	0	0	0	2	0						
D. I.		34	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0						
Buena					116	170	169	212	227	161	199	224	181	7				
PM <sub>10</sub>	Regular				197	181	179	144	124	188	158	138	172	249				
	Mala				43	14	18	9	14	16	9	3	12	109				
	D. I.				9	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	Buena											240	285	189				
PM <sub>2.5</sub>	Regular											89	61	162				
	Mala											4	10	8				
	D. I.											32	9	6				
Jalisco	ZMC	O <sub>3</sub>	Buena	100	90	100	89	68	85	71	47	20	87	107	144	89		
			Regular	196	198	212	189	212	224	225	201	206	246	203	200	230		
			Mala	61	74	45	87	85	57	69	117	137	33	55	21	46		
			D. I.	9	3	9	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		
		PM <sub>10</sub>	Buena	57	75	79	123	135	131	141	148	95	121	88	89	8		
			Regular	173	178	225	180	213	208	211	197	143	176	229	199	107		
			Mala	127	109	53	62	17	27	13	20	125	69	47	77	250		
			D. I.	9	3	9	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0		
		PM <sub>2.5</sub>	Buena												312	176		
	Regular													16	29			
	Mala													0	0			
	D. I.													37	160			
	México	ZMVT	O <sub>3</sub>	Buena	57	84	94	72	99	42			66	91	117	118	71	55
				Regular	266	261	264	281	264	136			286	268	244	240	278	285
				Mala	38	20	8	12	2	4			13	7	4	7	16	26
				D. I.	5	0	0	0	0	184			0	0	0	0	0	0
			PM <sub>10</sub>	Buena	203	115	97	116	129	83	136	120	84	113	117	12	9	31
				Regular	138	170	133	127	132	132	75	61	112	182	156	163	192	183
Mala				15	80	136	122	104	151	154	90	169	71	92	190	164	152	
D. I.				10	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	
PM <sub>2.5</sub>			Buena										100	101	110	127	12	22
	Regular										230	232	217	214	214	172		
	Mala										35	33	38	24	139	172		
	D. I.										0	0	0	0	0	0		

**Tabla 5.1** Continuación...

Entidad federativa	Ciudad o municipio	Contaminante	Calidad del aire	Año													
				2000	2002	2004	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Nuevo León	AMM	O <sub>3</sub>	Buena	167	155	135	102	142	119	113	126	95	114	127	134	103	
			Regular	184	199	195	239	206	217	240	208	225	234	215	189	208	
			Mala	11	8	36	24	17	29	12	31	45	18	23	42	54	
			D. I.	4	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
		PM <sub>10</sub>	Buena	48	23	34	32	40	43	39	39	18	36	65	38	5	
			Regular	270	209	209	187	233	210	243	199	180	234	240	240	121	
			Mala	45	130	123	146	92	112	83	127	167	96	60	87	239	
			D. I.	3	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
		PM <sub>2.5</sub>	Buena			162	101	162	157	214	196	192	270	212	234	66	
			Regular			160	199	179	178	144	154	159	90	57	119	238	
			Mala			16	31	8	13	6	6	13	6	5	4	51	
			D. I.			28	34	16	18	1	9	1	0	91	8	10	
Puebla	Puebla	O <sub>3</sub>	Buena	34	109	201	78	78	203	289	182	155	162	245	299	185	
			Regular	102	235	165	268	250	116	14	14	203	192	104	61	180	
			Mala	17	21	0	19	37	17	0	0	7	12	15	1	0	
			D. I.	213	0	0	0	0	30	62	169	0	0	1	4	0	
		PM <sub>10</sub>	Buena	76	158	201	265	347	351	283					243	60	
			Regular	70	182	153	96	15	4	1					120	245	
			Mala	7	25	12	1	2	0	0					2	60	
			D. I.	213	0	0	3	1	11	81					0	0	
		PM <sub>2.5</sub>	Buena												278	182	
			Regular												39	163	
			Mala												1	18	
			D. I.												47	2	
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	ZMVM	O <sub>3</sub>	Buena	4	13	21	29	26	33	29	38	22	33	40	31	19	20
			Regular	39	52	107	122	120	149	157	181	191	215	199	211	134	134
			Mala	323	300	238	214	219	184	179	146	152	118	126	123	212	212
			D. I.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		SO <sub>2</sub>	Buena	298	348	338	360	360	361	365	362	361	366	353			
			Regular	60	16	28	5	5	5	0	3	4	0	12			
			Mala	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			D. I.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		PM <sub>10</sub>	Buena	110	89	93	124	109	85	90	87	104	145	128	56	29	40
			Regular	202	226	235	192	240	237	230	214	205	202	216	182	204	186
			Mala	54	50	38	49	16	44	45	64	56	19	21	127	132	140
			D. I.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PM <sub>2.5</sub>	Buena			164	174	169	162	240	244	185	195	183	214	78	106		
	Regular			188	175	191	176	120	108	171	166	166	149	244	217		
	Mala			14	16	5	28	5	13	9	5	16	2	43	43		
	D. I.			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

**Notas:**

- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

**Fuente:**

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. Julio de 2017.

**Acciones para mejorar la calidad del aire**

Con la finalidad de atender la problemática de la calidad del aire se han desarrollado instrumentos para revertir las tendencias de deterioro en las principales ciudades de México. Entre los más importantes están los programas de gestión para mejorar la calidad del aire, conocidos como ProAire, que incorporan una visión de mediano



y largo plazos e incluyen acciones concretas para la reducción y control de las emisiones, enfocándose en las principales fuentes de emisión (Semarnat, 2018). Los ProAire se han aplicado en zonas metropolitanas o ciudades que, por el tamaño de su población, actividad industrial, parque vehicular y condiciones climáticas y geográficas, presentan los mayores problemas de contaminación atmosférica.

Actualmente hay 30 zonas metropolitanas y ciudades con programas de gestión para mejorar la calidad del aire (ProAire) vigentes; uno más se encuentra en fase de elaboración (Mapa 5.3; IB 1.1-10; cuadro D3\_R\_AIRE01\_06). En conjunto, los ProAire vigentes benefician potencialmente a cerca de 59.4 millones de personas.

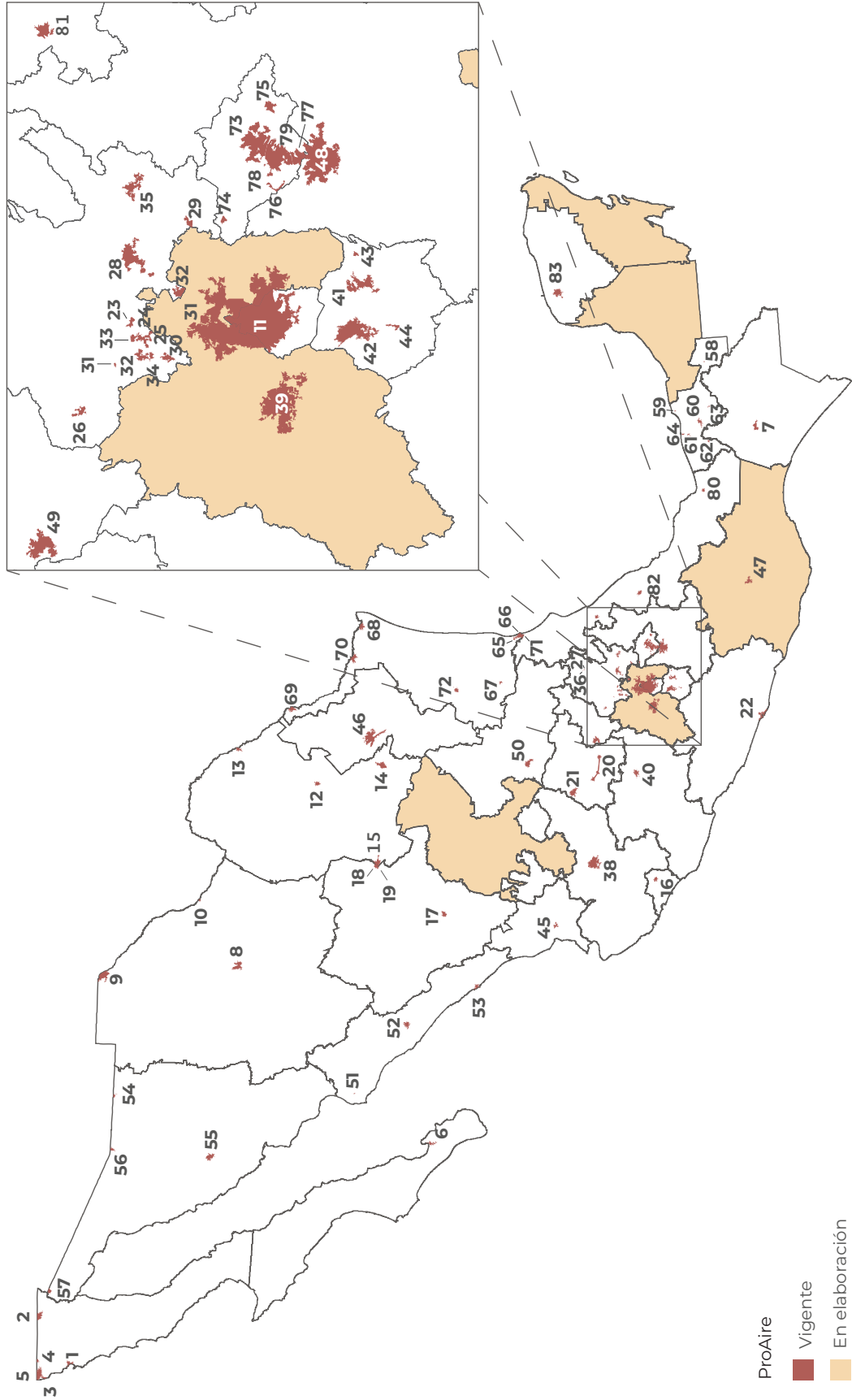
Además de los ProAire y la mejora de combustibles, existen otros programas y políticas tendientes a mejorar la calidad del aire. Las medidas que influyen directa o indirectamente en la calidad del aire son diversas y van desde acciones de pavimentación y reforestación, hasta el desarrollo e implementación de tecnologías innovadoras para limpiar el aire. Además, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) en coordinación con otras dependencias del gobierno federal, es responsable de establecer los programas de reducción de emisiones en las industrias de jurisdicción federal, así como en los vehículos automotores nuevos en planta. Así mismo, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que las autoridades locales instrumentarán los programas de verificación vehicular y elaborarán los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en las entidades federativas, con la posterior evaluación y, en su caso, aprobación de la Semarnat.

## CAMBIO CLIMÁTICO

Las huellas de la extracción y del uso de los recursos naturales del planeta necesarios para la producción de los bienes y servicios que consume la sociedad humana se observan no solo en la pérdida y la degradación de los ecosistemas terrestres, dulceacuícolas y marinos, sino también en la atmósfera. El cambio climático es una consecuencia de ello. Sus efectos globales no sólo se restringen al ambiente, también alcanzan las esferas económica, social y política y, sin duda, serán determinantes para el desarrollo económico y social de nuestro país y del mundo en el futuro. Dada la relevancia de este tema a nivel global, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que marcará las políticas y la ruta de desarrollo de gran parte de las naciones del mundo en el futuro, ha dedicado el Objetivo 13 hacia la acción por el clima.

Ante esta situación resulta esencial no sólo avanzar en el conocimiento científico relacionado con el tema, sino también implementar medidas tanto para detener su avance a través de la mitigación de las emisiones nacionales, como para diseñar e implementar estrategias que permitan la adaptación y enfrentar así sus efectos más importantes. En esta sección se abordarán las evidencias y consecuencias de este fenómeno, sus causas, así como las medidas que se toman tanto a nivel nacional como internacional para enfrentarlo.

**Mapa 5.3** ProAire vigentes y en elaboración, 2018



## Mapa 5.3 Continuación...

### Poblaciones o zonas metropolitanas

	1	Ensenada		42	Cuernavaca
	2	Mexicali	Morelos	43	Ocuituco
Baja California	3	Playas de Rosarito		44	Zacatepec
	4	Tecate	Nayarit	45	Tepic
	5	Tijuana	Nuevo León	46	Área Metropolitana de Monterrey
Baja California Sur	6	La Paz	Oaxaca	47	Zona Metropolitana de Oaxaca
Chiapas	7	Tuxtla Gutiérrez	Puebla	48	Zona Metropolitana del Valle de Puebla
	8	Chihuahua	Querétaro	49	Zona Metropolitana de Querétaro-San Juan del Río
Chihuahua	9	Juárez		50	Zona Metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez
	10	Ojinaga	San Luis Potosí	51	Ahome
Ciudad de México y zona metropolitana	11	Zona Metropolitana del Valle de México		52	Culiacán
	12	Monclova	Sinaloa	53	Mazatlán
Coahuila	13	Piedras Negras		54	Agua Prieta
	14	Saltillo	Sonora	55	Hermosillo
	15	Torreón		56	Nogales
Colima	16	Villa de Álvarez		57	San Luis Río Colorado
	17	Durango		58	Balancán
Durango	18	Gómez Palacio		59	Centla
	19	Lerdo		60	Centro
Guanajuato	20	Salamanca, Celaya e Irapuato	Tabasco	61	Comalcalco
	21	Zona Metropolitana de León		62	Huimanguillo
Guerrero	22	Acapulco de Juárez		63	Macuspana
	23	Ajacuba		64	Paraíso
	24	Atitalaquia		65	Altamira
	25	Atotonilco de Tula		66	Ciudad Madero
	26	Huichapan		67	El Mante
	27	Lolotla	Tamaulipas	68	Matamoros
	28	Pachuca de Soto		69	Nuevo Laredo
	29	Tepeapulco		70	Reynosa
Hidalgo	30	Tepeji del Río de Ocampo		71	Tampico
	31	Tepetitlán		72	Victoria
	32	Tizayuca		73	Apizaco
	33	Tlaxcoapan		74	Calpulalpan
	34	Tula de Allende		75	Huamantla
	35	Tulancingo	Tlaxcala	76	Ixtacuixtla
	36	Xochicoatlán		77	Santa Cruz Quilehtla
	37	Zapotlán de Juárez		78	Tenexyecac
Jalisco	38	Zona Metropolitana de Guadalajara		79	Tlaxcala
	39	Zona Metropolitana del Valle de Toluca		80	Minatitlán
México	40	Morelia	Veracruz	81	Poza Rica
Michoacán	41	Cuautla		82	Xalapa
Morelos			Yucatán	83	Mérida

#### Fuente:

Semarnat. *Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire)*. Semarnat. México. 2018. Disponible en: <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire?idiom=es>. Fecha de consulta: agosto de 2018.

El clima, y en particular la temperatura del planeta, dependen del balance entre la energía que recibe del sol y el calor que emite. Los gases de efecto invernadero (GEI) presentes naturalmente en la atmósfera dejan pasar la radiación solar hacia la superficie terrestre, pero absorben la radiación infrarroja que esta última emite, produciendo con ello un efecto neto de calentamiento, de manera similar a como ocurre en los invernaderos. Las actividades humanas emiten volúmenes de GEI que se suman a los existentes en la atmósfera, con lo que se incrementa su concentración en la atmósfera y con ello el efecto de calentamiento.

El Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como “...todo cambio en el clima a través del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas” (IPCC, 2007a). Algunos de los cambios en el clima que han sido detectados son el incremento de la temperatura (tanto en zonas terrestres como en las marinas), los cambios tanto en la intensidad y en la distribución temporal y espacial de la precipitación, como en la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, el deshielo de los glaciares y el incremento del nivel del mar, entre otros.

## EVIDENCIAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

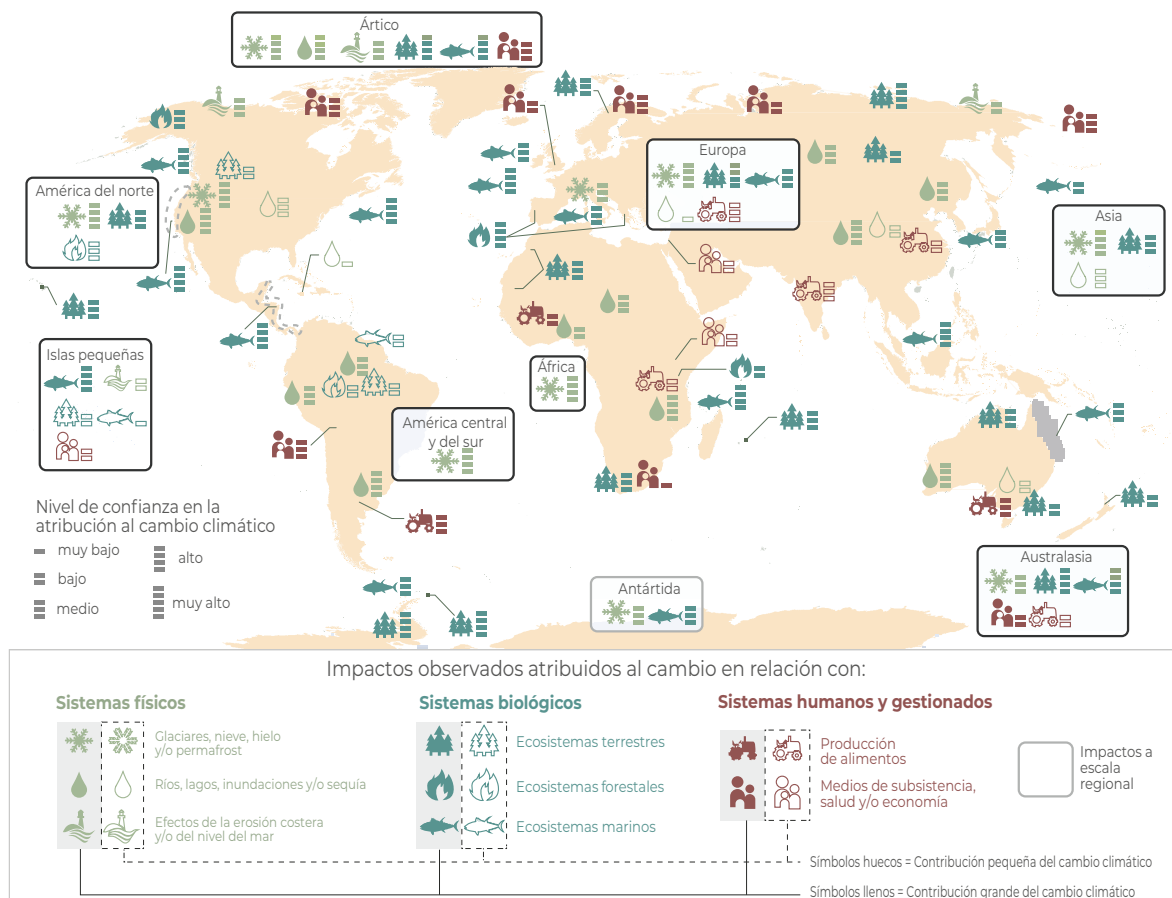
En la Figura 5.10 se presenta un resumen de los principales impactos a nivel global identificados por el IPCC en los sistemas físicos, biológicos y humanos; en las siguientes secciones se abordarán con detalle algunos de ellos, así como las principales evidencias de su presencia.

Muchas regiones del planeta registran alteraciones en el ciclo hidrológico como resultado de cambios en los patrones de precipitación, temperatura y en los balances de los depósitos de hielos de glaciares y otros mantos. La extensión de los glaciares sigue disminuyendo en diversas regiones del mundo. En el caso de los glaciares tropicales de los Andes, el retroceso observado en los últimos 50 años no tiene precedentes desde la última edad de hielo: pasaron de perder 0.2 metros de grosor en el periodo 1964-1975 a 0.76 metros entre 1976 y 2010 (Rabatel *et al.*, 2013); tasas crecientes de pérdida de hielo también se han observado desde los años noventa en Groenlandia y en Antártica (Moon, 2017). El incremento de la temperatura también ha provocado el deshielo de los suelos congelados (el permafrost) en latitudes altas y zonas elevadas, lo que además de liberar a la atmósfera grandes cantidades del metano que retenían, también afecta negativamente a la vegetación que crece en ellos.

Los impactos del cambio climático no solo afectan la esfera ambiental, también han alcanzado a los sectores productivos. En la agricultura, ha provocado en muchas regiones y a nivel global una disminución en el rendimiento de cultivos como el trigo y el maíz (IPCC, 2013; Figura 5.10). También se ha registrado una reducción en el rendimiento del arroz y la soya, aunque en menor nivel. Tendencias como éstas podrían afectar la seguridad alimentaria de muchos países en el futuro, o

bien, encarecer los productos a tal nivel que se vuelvan inaccesibles para amplios sectores de la población, pues existe el antecedente de incrementos de los precios de alimentos después de eventos climáticos extremos.

**Figura 5.10** Resumen de los impactos globales del cambio climático



**Fuente:**

Tomado de:

IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Reino Unido y Nueva York, 2014.

La biodiversidad también ha sido afectada por el cambio climático, esto debido a que el clima tiene una relevancia determinante en la distribución de las especies. Los cambios en el clima y la ocurrencia de eventos extremos pueden conducir a la reducción e incluso la pérdida de las poblaciones de numerosas especies. En los arrecifes de coral, por ejemplo, se tienen registros de eventos de blanqueamiento; en otros ecosistemas han cambiado las áreas de distribución de especies de invertebrados, peces, insectos, aves y plantas; también se han observado cambios en las épocas de floración en plantas y el anticipo en la llegada y reproducción de aves migratorias (IPCC, 2013; Pecl *et al.*, 2017; Figura 5.10).

En cuestión de salud humana, se han documentado incrementos de la mortalidad asociada a eventos de calor extremo. En Rusia, por ejemplo, en 2010 murieron alrededor de 55 000 personas por la onda de calor registrada (Barriopedro *et al.*,

2011). También los cambios locales de temperatura y precipitación han modificado y extendido la distribución de algunos vectores de enfermedades, como el caso de los mosquitos que transmiten el dengue y el paludismo.

Otros efectos secundarios de este fenómeno global se dan sobre grupos sociales en condición de pobreza que por su vulnerabilidad resienten con mayor intensidad la disminuciones en los rendimientos de los cultivos, la destrucción de sus hogares ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos extremos y los aumentos en los precios de los alimentos, entre otros (Figura 5.10).

### Cambios en la temperatura

El reporte más reciente del IPCC, publicado en 2013, señala que es probable<sup>11</sup> que el incremento de la temperatura superficial observado en todas las regiones con excepción de la Antártida desde mediados del siglo XX se deba muy probablemente al incremento de las concentraciones de GEI de origen antropogénico<sup>12</sup> (IPCC, 2014).

El IPCC refiere que entre 1880 y 2012, la temperatura anual global (considerando la terrestre y oceánica) registró un aumento de 0.85 °C con respecto al promedio del periodo 1961-1990 (IPCC, 2014). A este fenómeno de incremento global de temperatura se le conoce como “calentamiento global” y es una de las evidencias más contundentes del cambio climático. De acuerdo con mediciones de la NASA, en el año 2016 se registró la mayor desviación de temperatura (0.99 °C) respecto a la media del periodo 1951-1980, por arriba de 2017 (0.89 °C) y 2015 (0.87 °C) que en sus respectivos años a su vez habían registrado las mayores anomalías en los últimos años con respecto al promedio del periodo; Figura 5.11; IB 1.2-5).

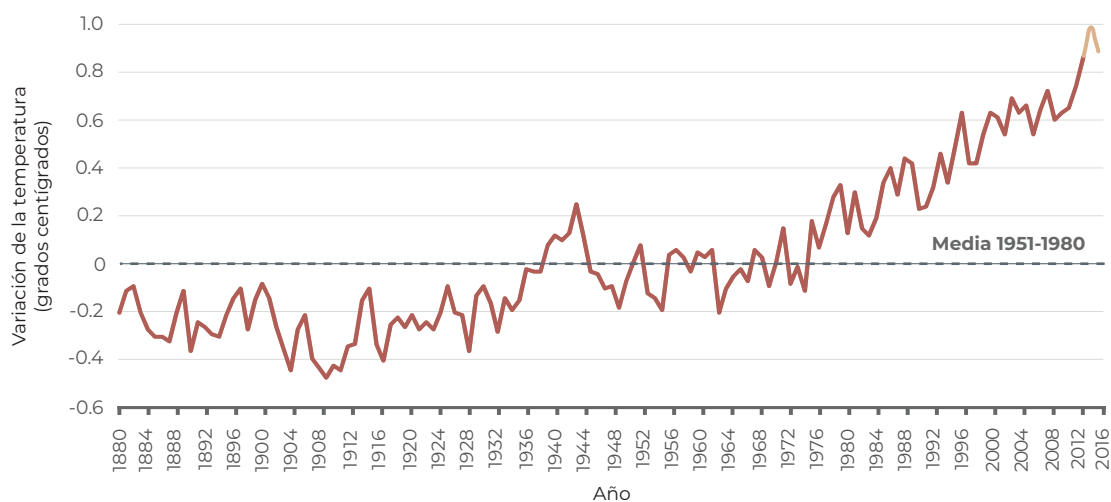
El calentamiento no ha sido homogéneo en el planeta (Figura 5.12). Desde mediados del siglo XX se observa un calentamiento significativo en América del Norte y Asia: en el norte de Alaska, por ejemplo, la temperatura aumentó hasta 3 °C (de principios de los ochentas a mediados de la década del 2000) y hasta 2 °C en algunas regiones norteadas de la parte europea de Rusia (de 1971 a 2010; IPCC, 2013). La evaluación del IPCC (2013) también señala que, entre 1983 y 2012 ocurrió el periodo más cálido de los últimos 1400 años, el cual ha generado un aumento en la frecuencia de ondas de calor en Europa, Asia y Australia (IPCC, 2013).

En la Figura 5.12 se muestra también que las superficies cubiertas por hielos perpetuos han sido afectadas por el incremento global de la temperatura. El IPCC calcula que en el periodo 1993-2009 la tasa de pérdida de hielo de los glaciares a nivel global, con excepción de los glaciares ubicados en la periferia de Groenlandia

<sup>11</sup> De acuerdo con el IPCC, probable corresponde a una probabilidad entre 66 y 100% (IPCC, 2014).

<sup>12</sup> En el caso de la Antártida, debido a la gran incertidumbre relativa a las observaciones, existe un nivel de confianza bajo en cuanto a que los forzamientos antropogénicos hayan contribuido al calentamiento observado.

**Figura 5.11** Variación de la temperatura global, 1880 - 2017<sup>1</sup>



**Nota:**

<sup>1</sup> La serie de tiempo presenta el registro combinado de la temperatura global superficial terrestre y marina.

**Fuente:**

NASA. GISS Surface Temperature Analysis. Global Annual Mean Surface Air Temperature Change. Global Land-Ocean Surface Temperature Anomaly (Base: 1951-1980). Disponible en: [http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/). Fecha de consulta: agosto de 2018.

y Antártica, pudo haber sido de hasta 275 gigatoneladas al año en promedio, lo que podría haber contribuido a un aumento del nivel del mar de poco más de 12 centímetros en el periodo.<sup>13</sup>

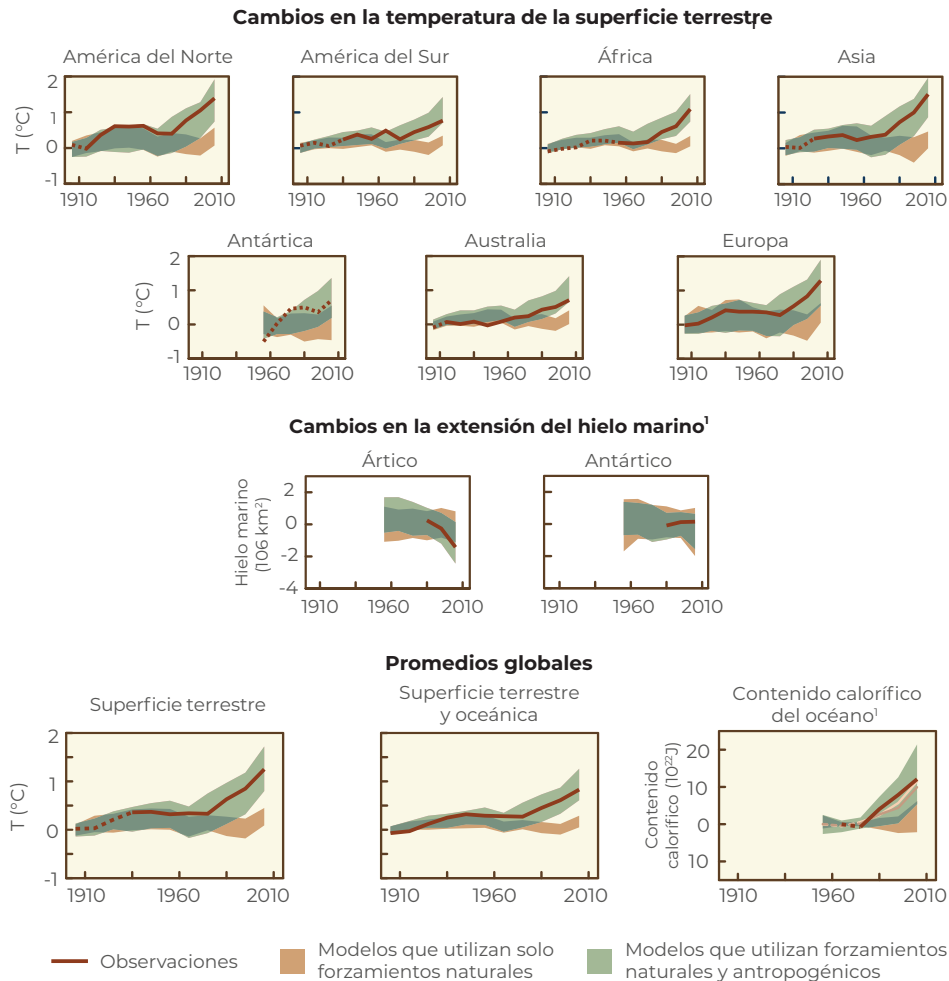
La temperatura promedio del permafrost<sup>14</sup> se ha incrementado en la mayor parte de las regiones desde principios de la década de 1980, lo que ha causado, por ejemplo, en algunas zonas del norte de Rusia una reducción importante del grosor y extensión de su superficie entre 1975 y 2005. Esta pérdida resulta importante ya que el permafrost es un reservorio natural de grandes cantidades de dióxido de carbono y metano (dos de los principales gases de efecto invernadero) que se liberan cuando el suelo se descongela, aumentando su concentración en la atmósfera. Según un estudio publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el deshielo del permafrost podría liberar a la atmósfera entre 43 y 135 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente en 2100 y entre 246 y 415 para el año 2200 (UNEP, 2012a). Otro estudio estima que las emisiones procedentes del deshielo de permafrost podrían aumentar la temperatura entre 0.13 y 1.69 °C adicionales para el año 2030 (MacDougall *et al.*, 2012).

En el caso de la temperatura superficial marina, entre 1971 y 2010 se incrementó 0.11 °C por década (IPCC, 2013). El calentamiento del océano sobresale notoriamente debido a que se calcula que en ese mismo periodo representó más del 90% de la energía acumulada en el sistema climático (IPCC, 2013).

<sup>13</sup> Se considera que el derretimiento de 100 gigatoneladas de hielo equivalen a una elevación media mundial del nivel del mar de 0.28 milímetros.

<sup>14</sup> Se refiere a la capa del suelo permanentemente congelado en las regiones muy frías.

**Figura 5.12** Cambio en la temperatura terrestre, extensión del hielo marino en el Ártico y Antártica y contenido calorífico en las capas superiores del océano de las principales cuencas oceánicas<sup>3</sup>



**Notas:**

<sup>1</sup> La extensión de los hielos marinos es la registrada en septiembre.

<sup>2</sup> Las gráficas muestran los cambios en temperatura utilizando dos tipos de modelos. Estos cambios difieren si se emplean solo los forzamientos naturales o si se agrega la influencia humana; en todos los casos, las mediciones de temperatura coinciden con el modelo que utiliza la suma de los forzamientos radiativos natural y antropogénico.

**Fuente:**

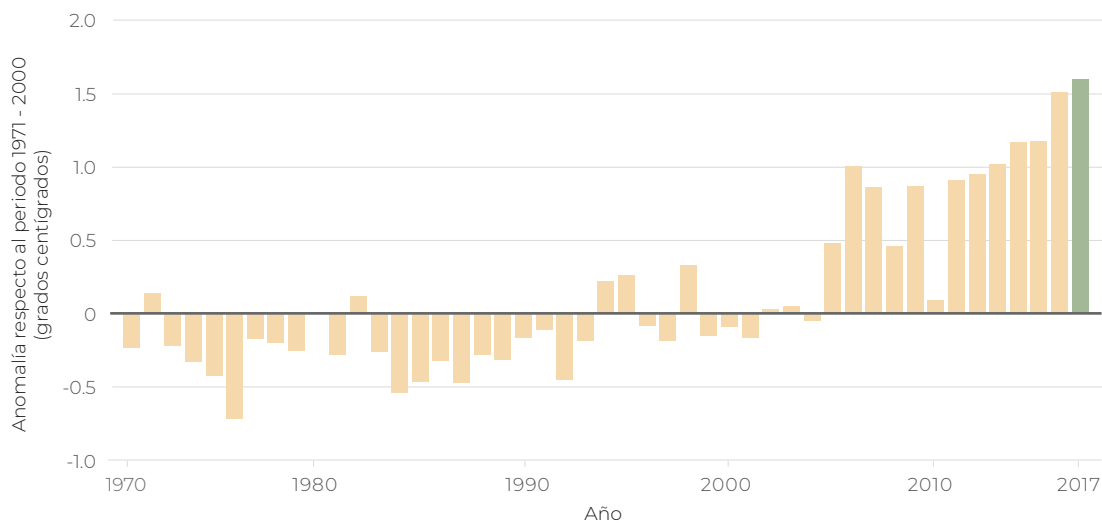
IPCC. *Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Reino Unido y EE. UU. 2013.

A nivel nacional, entre 1960 y 2012, el incremento promedio de la temperatura fue de 0.85 °C, valor similar al reportado a nivel mundial para el periodo 1880-2012 (Semarnat, 2014). En México, desde el año 2005 los registros anuales de temperatura han estado por arriba del valor promedio anual de temperatura registrado en el periodo 1981-2010, el cual fue de 21 °C. Si se analizan las anomalías de temperatura<sup>15</sup> nacionales se observa que entre 2006 y 2015 la temperatura nacional estuvo más de medio grado centígrado por arriba del promedio del periodo 1981-2010, con excepción de los años 2008 y 2010 (Figura 5.13). Se estima además que la temperatura media nacional durante 2017 fue de 22.6 °C, valor 1.6 °C por arriba del periodo 1981-2010, con lo que se convierte junto con 2016 como los más cálidos desde 1971 (Conagua, 2017).



El calentamiento observado a nivel global se ha acompañado en las latitudes medias por el aumento del número de días cálidos extremos, así como por la disminución de la cantidad de días gélidos extremos y heladas (IPCC, 2007a). Los registros demuestran que las temperaturas extremas y las olas de calor en el mundo aumentaron en frecuencia y duración, lo que tiene importantes efectos sobre la salud de la población. Por ejemplo, en Europa murieron 72 210 personas durante la ola de calor de 2003, en Rusia tan solo la cifra alcanzó alrededor de 55 000 personas (en el peor evento de calor ocurrido en Europa desde 1950) y en Perú perecieron 339 personas el mismo año (WMO, 2014b). Desde el punto de vista económico, la onda de calor en Rusia en 2010 causó pérdidas por cerca de 15 000 millones de dólares (Ragone *et al.*, 2018).

**Figura 5.13** Anomalía de la temperatura media anual en México, 1971 - 2017



**Nota:**

La barra oscura corresponde a la anomalía estimada en 2017.

**Fuente:**

Conagua. *Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2017*. Conagua, México, 2017.

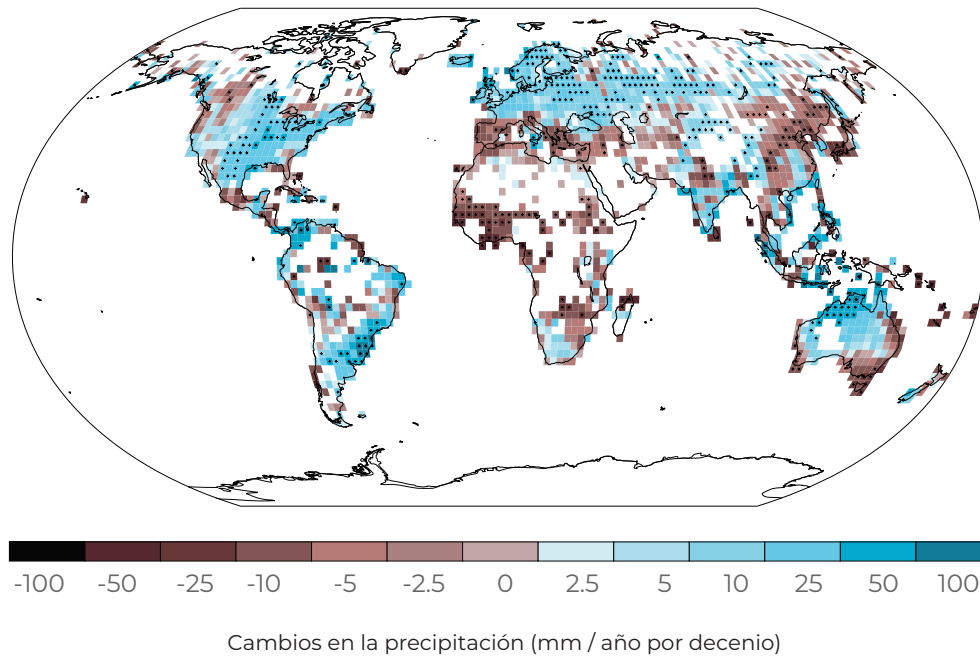
### Cambios en los patrones de precipitación

De acuerdo con el IPCC, las variaciones en los patrones de precipitación a nivel global representan otra alteración del sistema climático. A partir de 1976 la humedad superficial ha aumentado en estrecha relación con las temperaturas más altas tanto terrestres como oceánicas. El vapor de agua total en el aire sobre los océanos, aumentó 1.2% por década desde 1988 hasta 2004, lo que podría reflejarse en el aumento de precipitaciones tanto en forma de lluvia como de nieve (IPCC, 2007b). Se ha observado un incremento significativo de la frecuencia o intensidad de las precipitaciones en América del Norte y Europa, así como condiciones más secas en el Mediterráneo, África meridional y algunas zonas de Asia meridional (Figura 5.14; IPCC, 2007b, 2008 y 2013).

<sup>15</sup> Anomalía se refiere a la desviación de un valor medido (temperatura o precipitación) respecto a su valor promedio en un periodo de referencia (Conagua, 2014).

A diferencia de la temperatura, en nuestro país la precipitación no ha seguido un patrón claro de cambio: muestra aumentos o disminuciones con variaciones regionales (Figura 5.15). En el periodo 1941-2015, 55% de los años (41 de 74 años) registraron niveles de precipitación por debajo del promedio; 1945 fue el año menos lluvioso (638.8 mm) y 1958 el más lluvioso (997.8 mm). En el 2015 la precipitación (872 mm) fue 11.7% superior al promedio anual del periodo.

**Figura 5.14** Cambios en la precipitación terrestre, 1951 - 2010



**Fuente:**

IPCC. *Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Reino Unido y EE. UU. 2013.

### Incremento del nivel del mar

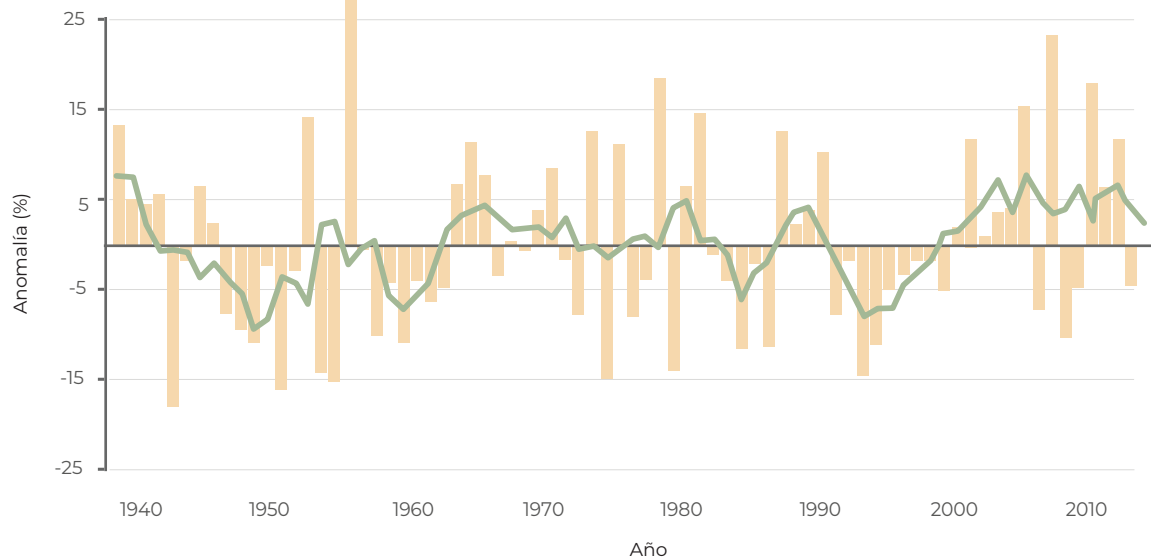
La expansión de mares y océanos al calentarse<sup>16</sup> y el agua que llega a ellos producto del derretimiento de glaciares y otros mantos de hielo produce la elevación de su nivel, otro de los efectos documentado del cambio climático. Desde inicios de los años setenta estos dos factores han sido responsables del 75% de la elevación observada del nivel medio global del mar (IPCC, 2013). Es importante señalar que el efecto de la expansión oceánica por el calentamiento del agua marina no ha ocurrido en todo el planeta: zonas del Atlántico norte, Pacífico norte y Pacífico ecuatorial se enfriaron en los últimos 50 años, siguiendo un patrón opuesto a la tendencia global de calentamiento (IPCC, 2007b).

El incremento total del nivel medio del mar durante el periodo 1901-2010 fue de 19 centímetros, con un rango que oscila entre los 17 y 21 centímetros (IPCC, 2013). El ritmo al que ha ocurrido el ascenso del nivel, para el mismo periodo, se ha estimado

<sup>16</sup> Los océanos han absorbido alrededor del 90% del calor que se ha adicionado al sistema climático (IPCC, 2013).

en 1.7 milímetros por año en promedio (IPCC, 2013). Tal vez este incremento parezca mínimo, pero si se considera que existen numerosas ciudades ubicadas en zonas costeras bajas e incluso por debajo del nivel del mar (como es el caso de Ámsterdam, Holanda, que está en promedio 4 metros por debajo del nivel del mar), pequeños cambios pueden tener efectos importantes. De acuerdo con registros recientes de la NASA, en el periodo 1993-2018, la tasa de incremento del nivel global del mar fue de 3.2 milímetros anuales, con un incremento total estimado de 8.63 centímetros hasta junio de 2018 (Figura 5.16).

**Figura 5.15** Anomalía de la precipitación anual en México, 1941 - 2017



**Nota:**

La barra café corresponde a la anomalía nacional estimada en 2017 y la línea naranja a la media móvil de cinco años.

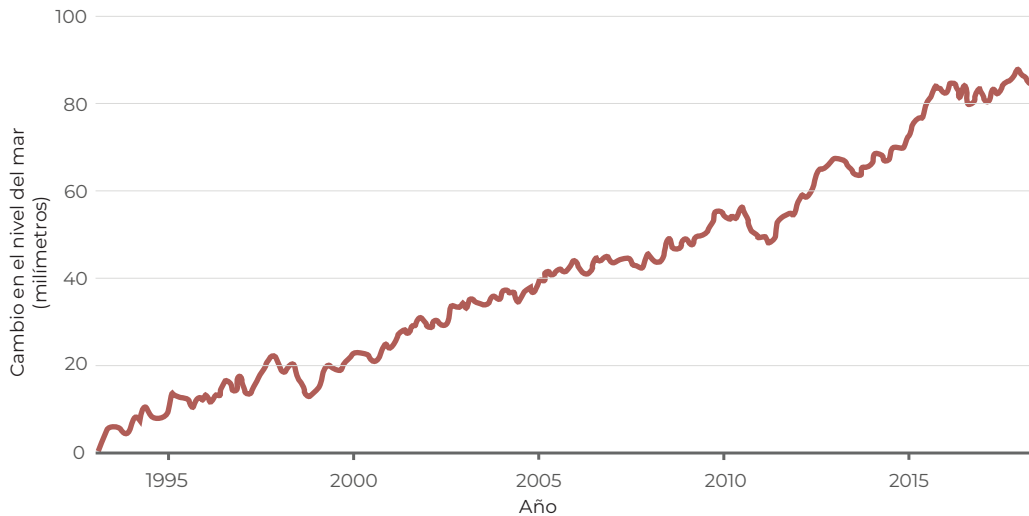
**Fuente:**

Conagua. *Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2017*. Conagua, México, 2017.

El deshielo de los glaciares pudo contribuir con alrededor del 30% del incremento del nivel del mar entre 1993 a 2009 (Nicholls y Cazenave, 2010). De acuerdo con el último reporte del IPCC, el derretimiento de los glaciares y casquetes polares contribuyó con 0.076 metros al incremento del nivel del mar en el periodo 1993-2010 (IPCC, 2013).

Nuestras costas también han sido afectadas por la elevación del nivel del mar. En 17 sitios estudiados en el Golfo y en el Pacífico entre principios de los años cincuenta y el año 2000 se encontraron evidencias de elevación del nivel del mar. En el Golfo de México, el incremento anual registrado varió entre 1.9 milímetros en Veracruz, Veracruz, hasta 9.16 milímetros en Ciudad Madero, Tamaulipas (Figura 5.17). En el Pacífico sobresalieron Guaymas, Sonora y Manzanillo, Colima, con incrementos anuales de 4.23 y 3.28 milímetros, respectivamente (INE et al., 2008).

**Figura 5.16** Cambio en el nivel medio global del mar, 1993 - 2018



**Fuente:**

GSFC. *Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters TOPEX/Poseidon, Jason-1, OSTM/Jason-2 Version 4.2 Ver. 4.2*. PO.DAAC, CA, EE. UU. 2017. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

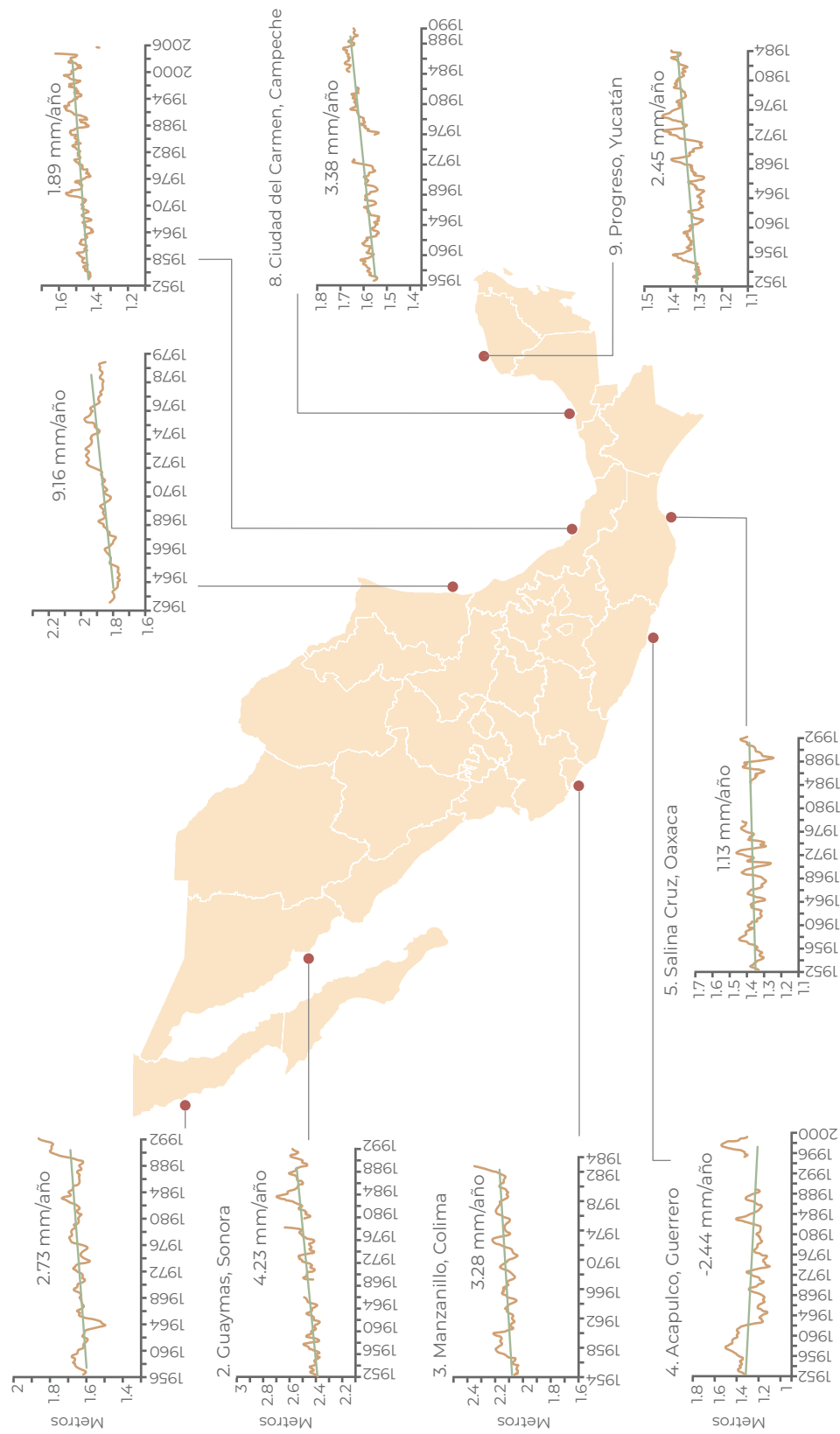
## Deshielos

El aumento de la temperatura global ha llevado también a una mayor velocidad de deshielo de los glaciares y casquetes polares a lo largo del planeta. Durante las últimas seis décadas, de acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, por sus siglas en inglés) y con el Servicio de Monitoreo Global de los Glaciares (WGMS, por sus siglas en inglés) el balance global de masa promedio de los glaciares fue negativo, es decir, el volumen perdido de hielo fue mayor al volumen acumulado anualmente. La pérdida acumulada de espesor del hielo en 2005 fue de aproximadamente 15 metros de agua equivalente (mae)<sup>17</sup> respecto al año 1980 (UNEP y WGMS, 2008).

En el caso de Antártica, destaca la pérdida del hielo de la plataforma Larsen B que actualmente cubre una superficie aproximada de 1 600 km<sup>2</sup>. En el año 2002 ocurrió una fragmentación y pérdida significativas de hielo en esta plataforma. Investigadores de la NASA indican en un nuevo estudio que sus glaciares se han adelgazado entre 20 y 22 metros y que la reducción de hielo se ha acelerado considerablemente. Dado que en los glaciares normalmente existe un flujo de agua, un incremento en el volumen o velocidad del flujo puede acelerar la pérdida de hielo; en el caso de la Plataforma Larsen B, el flujo se aceleró 55% entre 1997 y 2012. Bajo estas condiciones, dicho estudio plantea la posibilidad de que los restos de la Plataforma Larsen B desaparezcan a finales de esta década (Khazendara et al., 2015).

<sup>17</sup> Los glaciólogos expresan el balance de masa anual de los glaciares (es decir, su ganancia o pérdida en grosor) en metros de agua equivalentes (mae).

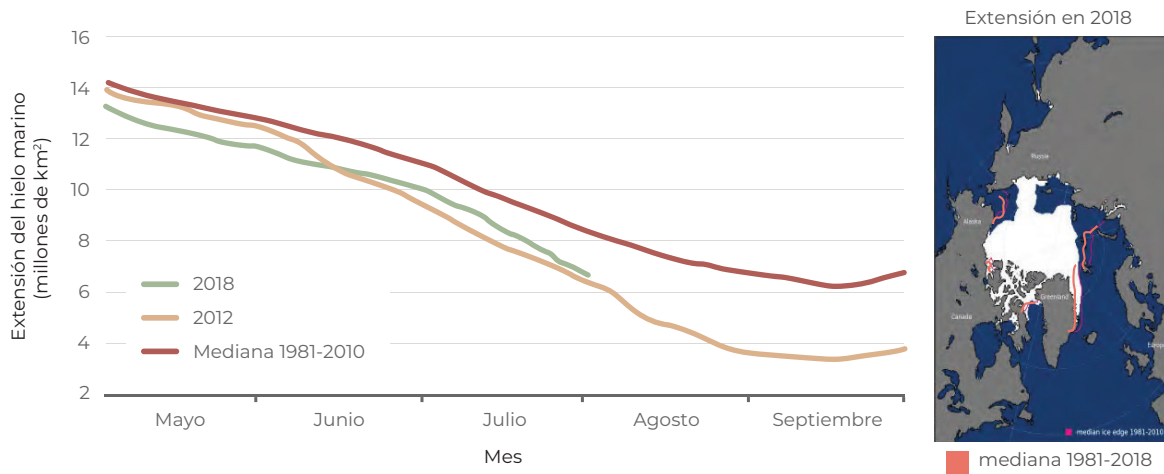
**Figura 5.17** Variación del nivel del mar en algunos sitios de los litorales mexicanos



**Fuente:** INE, Semarnat y UNAM. *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al calentamiento global y fenómenos hidrometeorológicos extremos.* INE, Semarnat y UNAM. México, 2008.

La Figura 5.18 muestra la extensión del hielo marino en el Ártico en distintos periodos; en octubre de 2018 la extensión promedió 6.06 millones de kilómetros cuadrados, lo que la coloca como el tercer registro más bajo para el mismo mes en el periodo 1979-2018 y alrededor de 2.29 millones de kilómetros cuadrados por debajo del valor promedio para el periodo 1981-2010. Las temperaturas registradas ese mes estuvieron por arriba del valor promedio a través de prácticamente todo el océano Ártico, con temperaturas particularmente altas (de entre 5 y 7 °C arriba del promedio en algunas regiones (NSIDC, 2018).

**Figura 5.18** Reducción en la extensión de hielo marino en el Ártico, 1981 - 2018



**Fuente:**

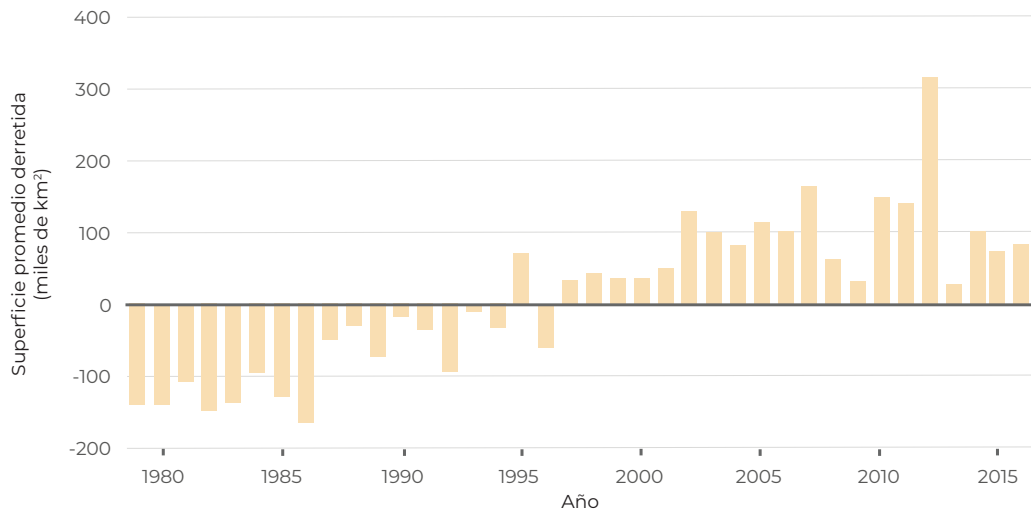
NSIDC. *Arctic Sea Ice News & Analysis*. NSIDC. 2015. Disponible en: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

La superficie de hielo en Groenlandia, durante el verano de 2014, sólo alcanzó a cubrir una superficie del 39.3% con respecto a la superficie promedio de 1981-2010 (NOAA, 2015). Ese año fue el séptimo con la mayor extensión de hielo derretido en los últimos 35 años. El área total derretida de junio a agosto de 2016 fue de alrededor de 90 000 kilómetros por arriba del promedio de 1981-2010 (Figura 5.19; NASA, 2018).

Los deshielos no solo afectan a los casquetes polares o Groenlandia, también ocurren en los hielos o glaciares que cubren las montañas: en el 2006 perdieron 402 gigatoneladas de agua en promedio (NASA, 2011). Se ha documentado también un retroceso de los glaciares alpinos, escandinavos, islandeses, andinos y aquellos de regiones occidentales y septentrionales de América del Norte. Existe también un incremento en las fracturas de los taludes de roca de la zona occidental de los Alpes (IPCC, 2014). En el caso de México, se han registrado reducciones de hasta el 40% entre 1960 y 1983 en la extensión de los glaciares del Iztaccíhuatl. El Pico de Orizaba y el Popocatepetl mostraron una tendencia similar (aunque en este último la reducción se aceleró por su actividad volcánica). Se ha planteado que de mantenerse las tasas de reducción de los glaciares mexicanos, es posible que desaparezcan en menos de 30 años (Delgado, 2007; Delgado *et al.*, 2007).

La pérdida acelerada de hielo de los glaciares de montaña podría tener efectos socioeconómicos importantes. Más de un sexto de la población mundial que vive en cuencas fluviales alimentadas por el agua que se derrite de la nieve o los glaciares podría verse afectada al reducirse su disponibilidad; al igual que lo sería la generación de energía hidroeléctrica a causa de la disminución del volumen de agua almacenado en los glaciares y la reducción de su esorrentía (IPCC, 2017b).

**Figura 5.19** Superficie de hielo perdida en Groenlandia de junio a agosto de cada año,<sup>1</sup> 1979 - 2016



**Nota:**

<sup>1</sup> La pérdida de hielo se reporta con respecto a la superficie del periodo 1981-2010.

**Fuente:**

NASA. *Greenland Ice Sheet Today*. NASA. 2018. Disponible en: <http://nsidc.org/>. Fecha de consulta: septiembre de 2018.

### Eventos meteorológicos extremos

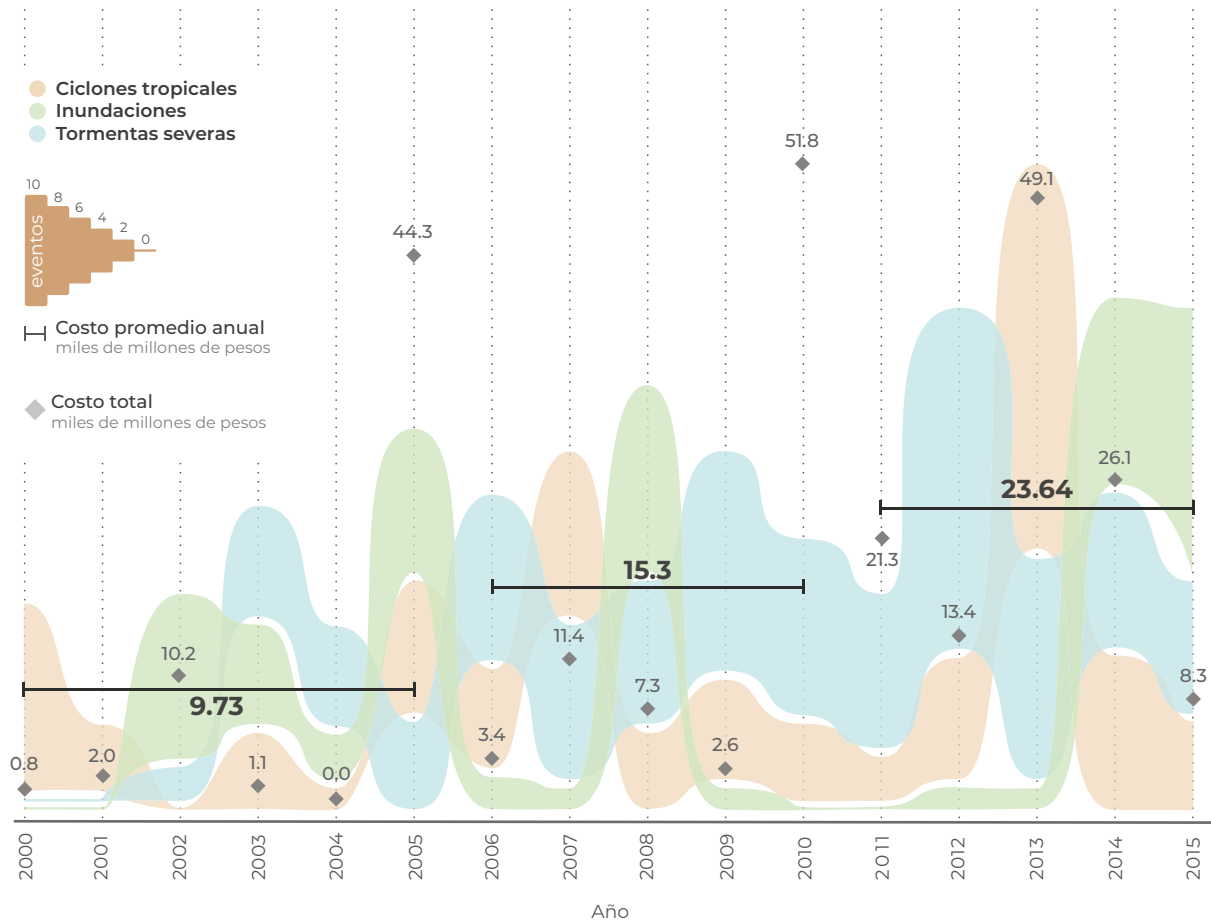
En la Figura 5.20 se muestran los eventos meteorológicos (ciclones tropicales, inundaciones y tormentas severas) que en el periodo 2000-2015 fueron calificados como “desastres” por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En los 15 años del periodo, el número de desastres por año, a pesar de ciertas oscilaciones, muestra una tendencia creciente: mientras que entre 2000 y 2003 se declararon 72 desastres, entre 2012 y 2015 la cifra alcanzó los 190. Por su parte, los costos promedio anuales también muestran incrementos: entre 2000 y 2005 ascendieron a 9 731 millones de pesos, mientras que entre 2011 y 2015 contabilizaron los 23 638 millones de pesos por año.

### Ciclones

Entre los posibles efectos del cambio climático están la variación en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como los ciclones. Éstos pueden tener impactos sociales, económicos y ambientales muy importantes

sobre las regiones en las que ocurren, e incluso sobre aquellas que dependen de los recursos o bienes producidos en las zonas de impacto. México, por su ubicación geográfica, condición climática y características socioeconómicas de la población, es particularmente vulnerable a estos fenómenos.

**Figura 5.20** Desastres naturales en México, 2000 - 2015



**Fuente:**

Cenapred. Base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México. Disponible en: [www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/descargas.html](http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/descargas.html). Fecha de consulta: febrero de 2018.

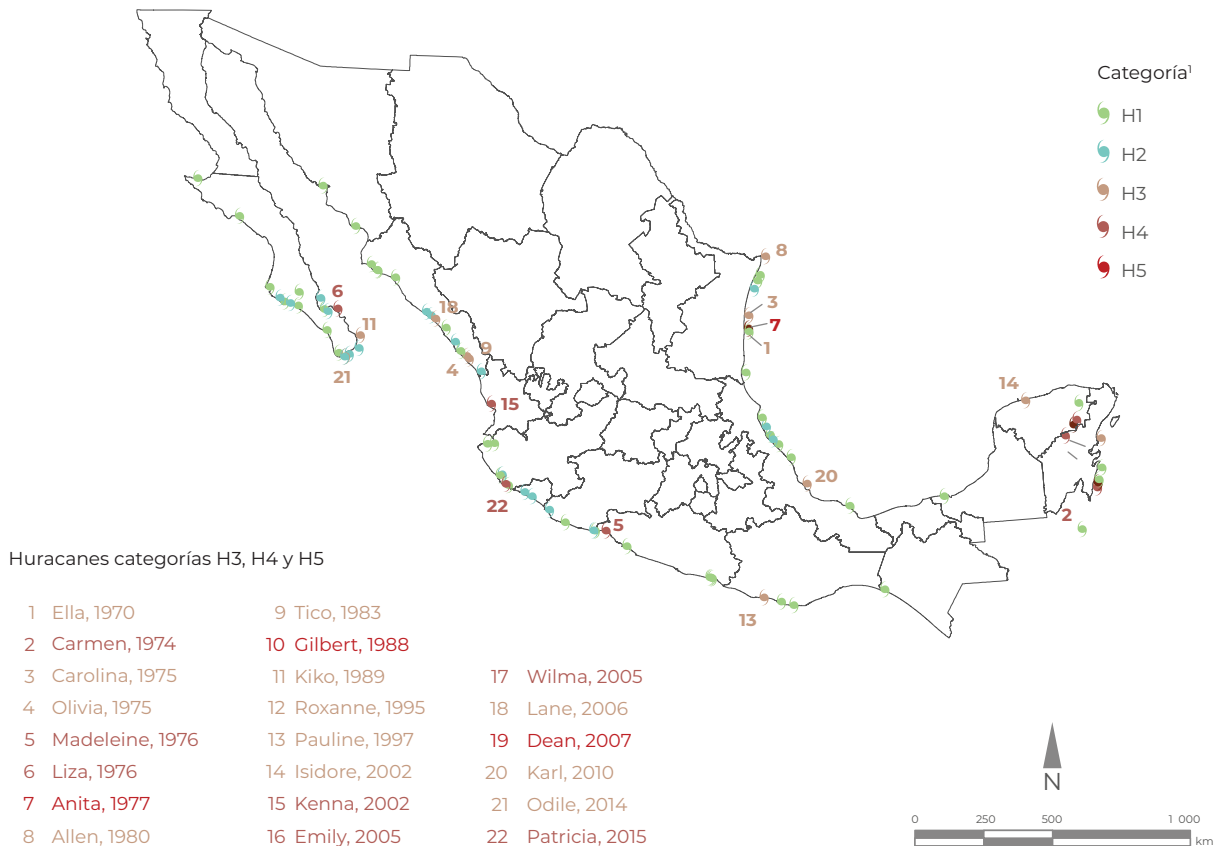
El efecto del incremento en la temperatura sobre el número e intensidad de los ciclones tropicales es un tema en debate. No se ha encontrado una correlación fuerte entre las temperaturas oceánica y atmosférica y el número de huracanes, sin embargo, existe evidencia de que la intensidad de los huracanes ha sido influenciada directamente por el incremento de la temperatura de los océanos (Webster *et al.*, 2005). El Mapa 5.4 muestra los huracanes que han entrado a las costas nacionales entre 1970 y 2015.

En el Atlántico se han incrementado la temperatura superficial oceánica y la intensidad de los ciclones, pero no su ocurrencia (Holland y Webster, 2007; IPCC, 2013). No existe una tendencia clara en su frecuencia en el Atlántico mexicano entre



1970 y 2017 (Figura 5.21). En el Pacífico mexicano el número total de ciclones presenta menos variación que la observada en el océano Atlántico y ninguna tendencia clara en su frecuencia e intensidad en los últimos años. En 2015 alcanzó las costas mexicanas uno de los huracanes más intensos registrados en la historia moderna: en el mes de octubre, el huracán Patricia, clasificado como huracán categoría 5 de la escala Saffir-Simpson, tocó las costas de los municipios de la Huerta y Cihuatlán, en Jalisco. Los registros apuntaron a vientos máximos sostenidos de 324 kilómetros por hora y rachas de hasta 400 kilómetros (Conagua, 2015b). Para el futuro, se ha proyectado que a finales de siglo aumente la intensidad de los ciclones tropicales entre 2 y 11% como consecuencia del aumento de temperatura (Bender *et al.*, 2010; Knutson *et al.*, 2010).

**Mapa 5.4**      Ciclones tropicales en México, 1970 - 2017



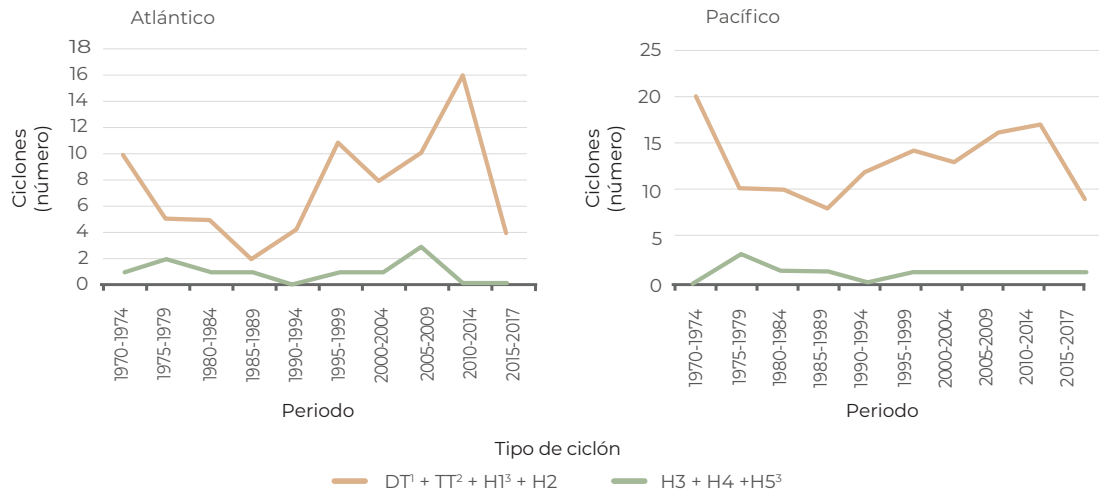
**Nota:**

<sup>1</sup> H = Huracán, ciclón tropical de núcleo caliente en el que el viento medio máximo en superficie es de 118 km/hora, o superior. El número corresponde a la escala Saffir-Simpson.

**Fuente:**

SINA, Conagua. *Ciclones tropicales (nacional)*. Conagua. México. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=huracanes&ver=mapa&o=1&n=nacional>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

**Figura 5.21** Ciclones tropicales que impactaron México, 1970 - 2017



**Notas:**

<sup>1</sup> DT: depresión tropical

<sup>2</sup> TT: tormenta tropical

<sup>3</sup> HI, H2, H3, H4 y H5 se refieren a huracanes con diferentes intensidades de acuerdo con la escala Saffir-Simpson que va de 1 a 5.

**Fuente:**

Conagua-SMN. *Ciclones tropicales - Información histórica*. Conagua, México. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

## Tornados

Los tornados son perturbaciones atmosféricas que se forman por el choque de masas de aire con diferente densidad, temperatura, humedad y velocidad (Cenapred, 2014). La velocidad del viento generada por un tornado oscila, por lo general, entre los 60 y los 420 kilómetros por hora y su duración puede ser de minutos y en casos excepcionales de varias horas. En algunos casos, las consecuencias de los daños que causan a viviendas e infraestructura pueden ser muy significativas.

La mayor parte del territorio mexicano es susceptible a tornados de pequeña intensidad; estacionalmente son más frecuentes en la transición de primavera a verano y en la época lluviosa (Macías Medrano y Avendaño García, 2014). En los últimos 15 años se han presentado 130 tornados en el país (Conagua, 2015a). Algunos de los más recientes son los de Tangancícuaro, Michoacán (2014), San Cristóbal de las Casas, Chiapas (2014) y el de Acatlán, Hidalgo (2015). En mayo de 2015, Ciudad Acuña, en Coahuila, fue impactada por un tornado categoría EF3 (escala de Fujita mejorada),<sup>18</sup> con vientos del orden de 50 kilómetros por hora y rachas mayores a 200 kilómetros. La población afectada fue de alrededor de 6 500 personas, además de ocho decesos (Conagua, 2015a).

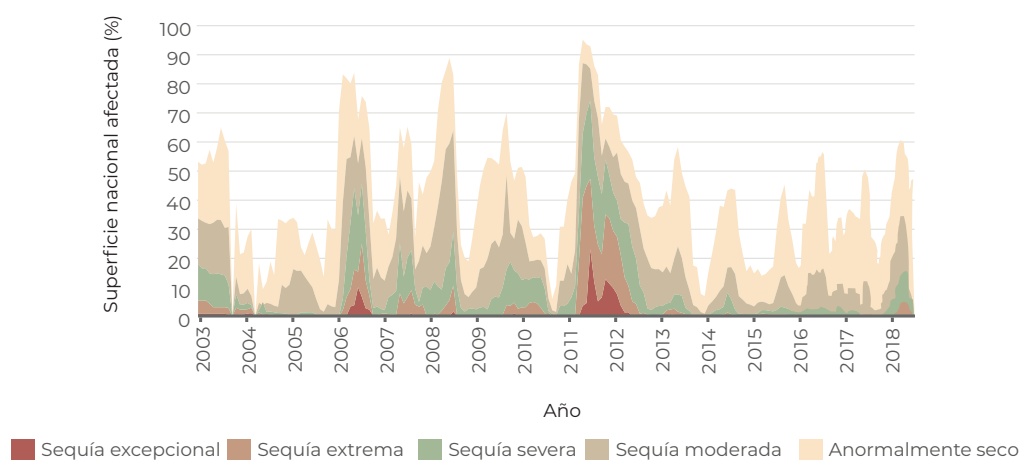
<sup>18</sup> Es la escala empleada para medir la fuerza de los tornados tomando como base los daños que ocasionan. La versión mejorada sustituye a la de Fujita-Pearson de 1971, con seis niveles que van del EF0 al EF5 y que ascienden en la intensidad de los daños.

## Sequías

A diferencia de la aridez, que puede ser una condición natural de una región, la sequía se considera como una condición climática temporal, en la cual el nivel de la precipitación es significativamente menor a la normal, lo que puede ocasionar serios desequilibrios hidrológicos que afectan negativamente a los sistemas ecológicos y productivos (UNCCD, 1996). Entre sus efectos más importantes pueden mencionarse la pérdida de la productividad de las tierras y de la provisión de servicios ambientales de los ecosistemas afectados (con sus importantes consecuencias económicas y sociales).

A partir de 1970 se han registrado sequías más intensas y largas en los trópicos y subtrópicos (IPCC, 2017b, 2014). Durante el siglo XX en el país se registraron cuatro grandes periodos de sequía en 1948-1954, 1960-1964, 1970-1978 y 1993-1996, así como una sequía severa en 1998, los cuales afectaron principalmente a los estados del norte del país (Cenapred, 2001). A inicios de la década pasada, se presentaron varios eventos de sequía: un severo periodo de sequía entre 2000 y 2003, en 2006, entre 2007 y 2008 y en 2009. En la presente década ocurrió un evento importante entre 2010 y 2012 (Figura 5.22); en mayo de 2011, más del 90% de la superficie del país se consideraba afectada por la sequía. Entre 2016 y mediados de 2018 la superficie afectada anualmente fue menor al 60% de la superficie nacional.

**Figura 5.22** Superficie nacional afectada por sequía en México, 2002 - 2018



**Fuente:**

Conagua. *Monitor de Sequía de México*. Servicio Meteorológico Nacional, Conagua. México. Disponible en: <http://smn.conagua.gob.mx/es/monitor-de-sequia-en-mexico2>. Fecha de consulta: septiembre de 2018.

La recurrencia de la sequía puede agravar las condiciones de estrés ambiental y, por tanto, afectar severamente el entorno social y la continuidad de las actividades económicas de las regiones afectadas. Entre 2010 y 2015, si se consideran tan sólo las condiciones de sequía severa y extrema, 45% del territorio sufrió cuando menos dos años de sequías,<sup>19</sup> principalmente en la mitad norte del país y en casi la totalidad de

<sup>19</sup> El número de años de recurrencia de sequía no necesariamente corresponde a años consecutivos.

la península de Yucatán (Figura 5.23). La superficie afectada por cinco y seis años de sequías extremas y severa fue de 0.4% del país, concentrada en la zona fronteriza de Coahuila con los Estados Unidos. De este porcentaje, 0.27% correspondió a zonas con cinco años de sequías y el restante 0.13% a regiones con seis años de sequía consecutivos.

### Impactos sobre la biodiversidad

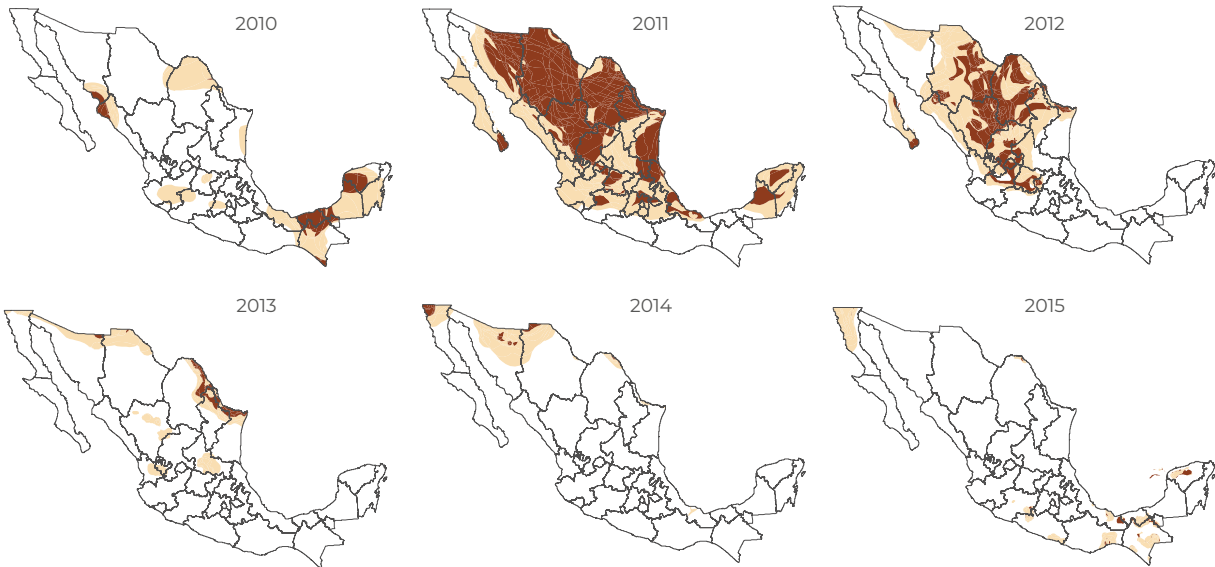
En la actualidad contamos con información relevante que demuestra los efectos del cambio climático global sobre las especies y sus ecosistemas (ver IPCC, 2013). Es importante recordar que el clima es uno de los principales factores que determinan los patrones de vegetación, estructura y composición florística y faunística. En el caso de las especies, los cambios en las condiciones ambientales de sus hábitats alteran, entre otros procesos biológicos, los patrones fenológicos, como son las fechas de floración, anidación, alimentación o migración. En Suiza, por ejemplo, los cerezos silvestres (*Prunus avium*) florecen en años recientes en promedio hasta 16 días antes de la fecha en la que lo hacían en la década de 1950 y su temporada de crecimiento se ha extendido por el aumento de las temperaturas en cerca de 3 días por década desde 1951 (ver Vittoz *et al.*, 2013). En otros casos, está bien documentado el cambio que han sufrido en las últimas décadas las distribuciones de especies, lo cual ha alterado la composición de diversos ecosistemas terrestres, dulceacuícolas y marinos (Wernberg *et al.*, 2016; Pecl *et al.*, 2017).

A nivel de los ecosistemas se han documentado: i) la modificación de los límites de su distribución, ii) el reemplazo de ecosistemas, iii) la degradación, y iv) la modificación de su composición de especies (IPCC, 2002). A lo anterior deben sumarse los efectos ocasionados por el incremento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos (p. ej., huracanes, sequías, inundaciones, granizos y rachas de vientos), así como la presencia de plagas y enfermedades que también tienen efectos importantes en la estructura, composición y dinámica de muchos ecosistemas a lo largo del mundo.

De acuerdo con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), el impacto del cambio climático sobre la biodiversidad ya es apreciable en nuestro país. Los cambios se presentan principalmente en los bosques de coníferas latifoliadas y el bosque mesófilo; así como en el medio marino y los ecosistemas insulares (Challenger y Dirzo, 2008). No obstante, en otros ecosistemas también han sido registrados impactos significativos, como en el caso de los matorrales xerófilos. En un estudio realizado en un área de la zona fronteriza entre México y los Estados Unidos (ver Brown *et al.*, 1997), en donde la precipitación invernal se incrementó substancialmente durante el siglo XX, la cobertura de los arbustos aumentó significativamente desde la década de los años ochenta, y con ella cambió la composición de especies del ecosistema. Especies clave como la rata canguro y algunas especies de hormigas se extinguieron localmente; otras

**Figura 5.23** Recurrencia de la sequía severa y extrema en México, 2010 - 2015

**a) Sequía anual**



**b) Recurrencia de la sequía severa y extrema<sup>1</sup>**

Intensidad  
■ Severa ■ Extrema



**Nota:**

<sup>1</sup> La intensidad de la sequía está basada en el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM).

**Fuente:**

Conagua, Semarnat. *Monitor de Sequía en México*. Conagua, Semarnat. México. 2018.

especies antes comunes se hicieron raras (dos especies de lagartijas cornudas del género *Phrynosoma*) y especies poco comunes, como el roedor *Chaetodipus bayleii* (común en zonas arbustivas) se hicieron más abundantes.

Es importante apuntar que no obstante que el cambio climático tiene actualmente efectos importantes en los ecosistemas nacionales, los principales factores de cambio que continúan afectando negativamente a la biodiversidad son la destrucción de los hábitats, la sobreexplotación de organismos silvestres y la presencia de especies invasoras.

## **LA CAUSA DEL CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPOGÉNICO: INCREMENTO EN LA EMISIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS GEI**

Los gases de efecto invernadero (GEI) se emiten tanto por fuentes naturales como por las actividades humanas. La quema de combustibles fósiles es la principal fuente antropogénica emisora de GEI. A partir de la Revolución Industrial del siglo XVIII, y con mayor intensidad durante la segunda mitad del siglo XX, se aceleró la producción de bienes y servicios y con ello se produjo una mayor demanda y consumo de estos combustibles. Como consecuencia, las emisiones de GEI también aumentaron y se acumularon en la atmósfera, lo que de acuerdo con la evidencia científica disponible, ha promovido el cambio climático (IPCC, 2013).

### **Emisiones globales**

El volumen de emisión mundial de CO<sub>2</sub><sup>20</sup> es representativo de la emisión total de GEI, ya que equivale a más del 70% de las emisiones totales y es para el cual se cuenta con información más confiable y homogénea a nivel mundial. Las estimaciones mundiales de emisión de CO<sub>2</sub> se enfocan principalmente en las generadas por el consumo y quema de combustibles fósiles. Durante el periodo 1990-2017, la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 58.6%, para alcanzar en este último año las 32.5 gigatoneladas (Figura 5.24; IB 1.2-1). Este valor equivale a un crecimiento en 2017 de 1.4% con respecto al año anterior, lo que representa un nuevo crecimiento de las emisiones globales después de tres años de mantenerse cerca del mismo nivel (IEA, 2018).

De las emisiones globales de GEI por consumo de combustibles fósiles, en 2015 la gran mayoría (74% del total) proviene del sector de energía, seguido muy de lejos por la agricultura (13%) y los procesos industriales (8%; Figura 5.25).

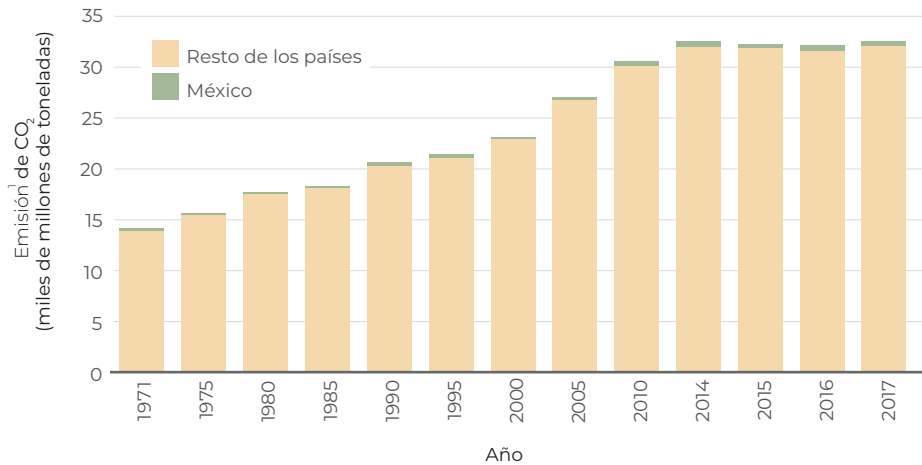
De acuerdo con el último informe publicado por la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en el año 2016 cinco países fueron responsables del 57.6% del CO<sub>2</sub> emitido a nivel mundial por consumo y quema de combustibles fósiles:

---

<sup>20</sup> El CO<sub>2</sub> es el GEI más importante debido a su volumen emitido, su larga vida en la atmósfera (entre 5 y 200 años), su forzamiento radiativo (1.3-1.5 Wm<sup>-2</sup>) y el notable incremento de su concentración en la atmósfera (IPCC, 2013).

China, Estados Unidos, Rusia, Japón e India, en conjunto emitieron 18 597 millones de toneladas de un total de 32.3 mil millones generadas en el planeta (Figura 5.26). Entre estos países, destacan China y Estados Unidos, responsables de 28.2 y 15% de las emisiones en el planeta en ese año, respectivamente. La contribución de México a las emisiones globales en 2016, según los datos de la IEA, fue de 1.4%, ubicándolo entre los primeros quince países por su volumen de emisión (Figura 5.26). Si se considera la emisión de dióxido de carbono en el contexto regional sobresalen Asia, Norteamérica y Europa.

**Figura 5.24** Emisión mundial de CO<sub>2</sub> por consumo de combustibles fósiles, 1971 - 2017



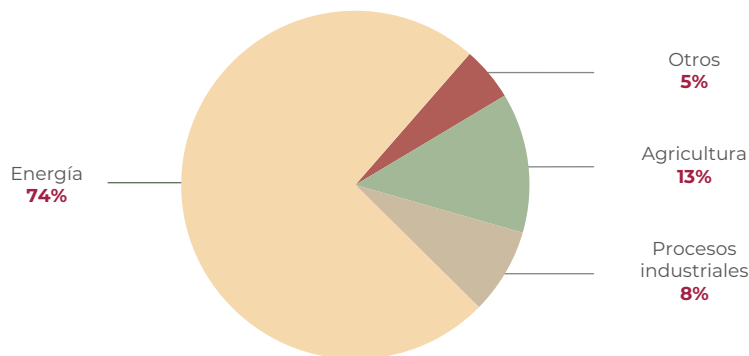
**Nota:**

<sup>1</sup> El total global incluye las emisiones de búnkeres internacionales, tanto marinos como de aviación.

**Fuente:**

IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights. 2017 Edition. IEA. Francia. 2017.

**Figura 5.25** Emisiones globales de GEI por consumo de combustibles fósiles según fuente, 2015



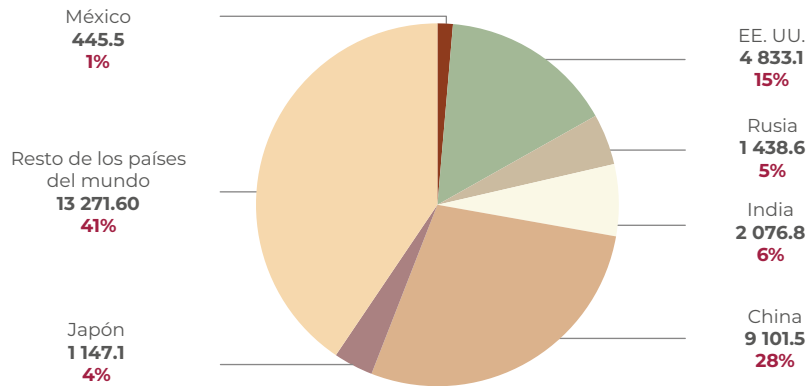
**Nota:**

La categoría "Otros" incluye las emisiones por quema de biomasa, descomposición posterior a la quema, descomposición de turba, emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O de otras fuentes distintas a la agricultura, residuos y uso de solventes.

**Fuente:**

IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights. Edición 2018. IEA. Francia. 2018.

**Figura 5.26** Contribución de los principales países emisores y México a la emisión mundial de CO<sub>2</sub> por consumo y quema de combustibles fósiles, 2016



**Nota:**

La categoría "Otros" incluye quema de biomasa, descomposición posterior a la quema, descomposición de turba, emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O de otras fuentes distintas a la agricultura, residuos y uso de solventes. Las emisiones se muestran en megatoneladas de CO<sub>2</sub>.

**Fuente:**

IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights. Edición 2018. IEA. Francia. 2018.

Las emisiones también se pueden analizar a nivel per cápita con el fin de evaluar la posible contribución promedio de cada habitante a la emisión de CO<sub>2</sub>. A nivel mundial en 2016, destacaron Qatar (30.8 toneladas de CO<sub>2</sub>; por habitante), Curazao (25.9), Kuwait (22.2), Baréin (20.8) y los Emiratos Árabes Unidos (20.7) como los cinco principales emisores por habitante, con volúmenes que representaron entre cuatro y ocho veces la emisión per cápita mundial (4.35 toneladas de CO<sub>2</sub> por habitante; Figura 5.27; IEA, 2018). En el caso de México, el valor varía ligeramente dependiendo de la fuente de datos, entre 3.61 (INECC-Semarnat, 2018) y 3.64 toneladas de CO<sub>2</sub> por consumo de combustibles fósiles por habitante (IEA, 2018). Estas cifras lo ubican en el lugar 65 a nivel mundial y como el más bajo dentro de los países de la OCDE (9.02 toneladas por persona), muy por debajo de la cifra de Luxemburgo (14.51), Australia (16) y Estados Unidos (14.95; IEA, 2018).

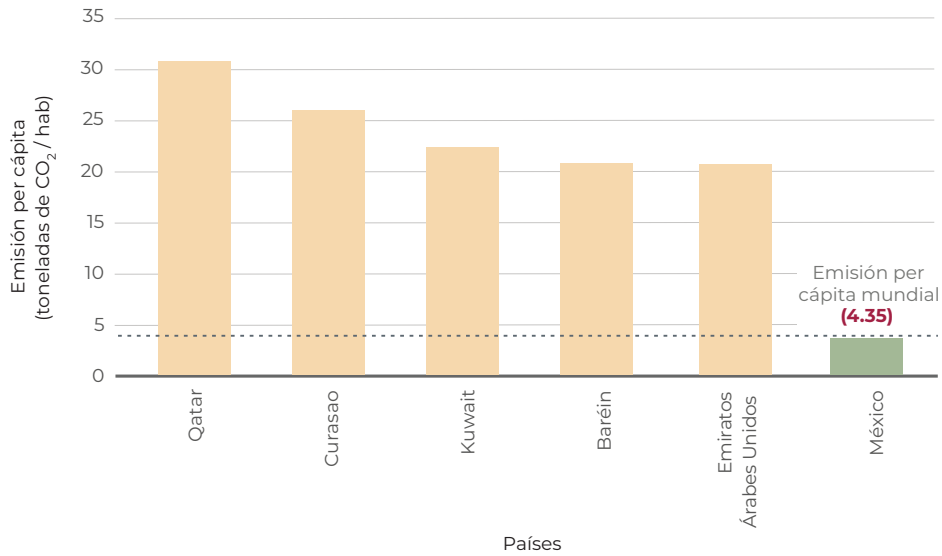
Un indicador útil para mostrar de manera indirecta la relación que guardan la economía de un país y su emisión de CO<sub>2</sub> es la llamada "intensidad de carbono", que expresa el volumen de GEI que se emite por cada unidad de producto interno bruto (PIB) generada por una economía. A nivel global, según datos de la Agencia Internacional de Energía (2018), la intensidad de carbono global<sup>21</sup> se redujo 33.5% entre 1990 y 2016, alcanzando en este último año un valor de 0.3 kilogramos por dólar<sup>22</sup> (IEA, 2018). En el caso de México, la misma fuente reporta una reducción de la intensidad de carbono, en el mismo periodo, de 0.24 a 0.22 kilogramos por dólar, lo que representa una reducción de 11.2% (Figura 5.28).

<sup>21</sup> Considerando exclusivamente la quema de combustibles fósiles.

<sup>22</sup> Considerando el poder de paridad de compra y dólares a precios de 2010

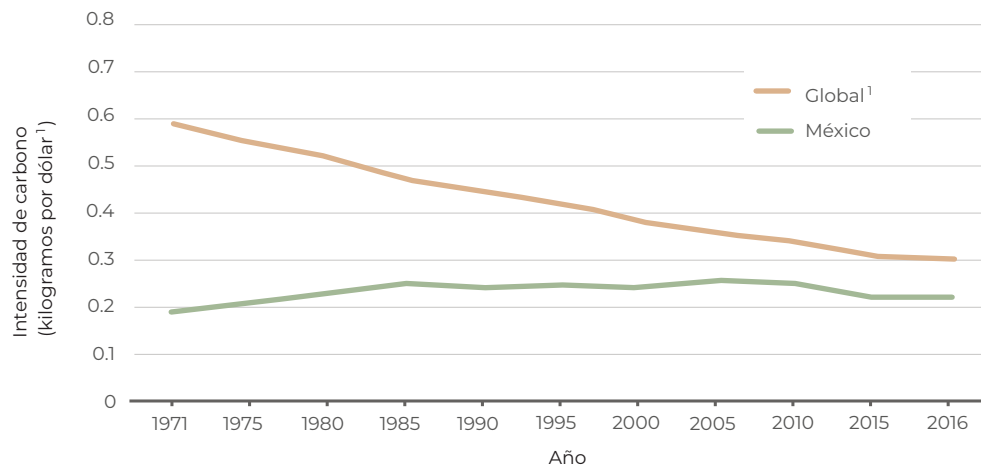


**Figura 5.27** Emisión per cápita de CO<sub>2</sub> en algunos países y México, 2016



**Fuente:**  
IEA. *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights*. Edición 2018. IEA. Francia. 2018.

**Figura 5.28** Intensidad de carbono global y en México, 1971 - 2016



**Notas:**  
<sup>1</sup> Sólo considera las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles.  
<sup>2</sup> Conversión del PIB considerando el poder de paridad de compra y dólares a precios de 2010.

**Fuente:**  
IEA. *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights*. Edición 2018. IEA. Francia. 2018.

## Emisiones nacionales

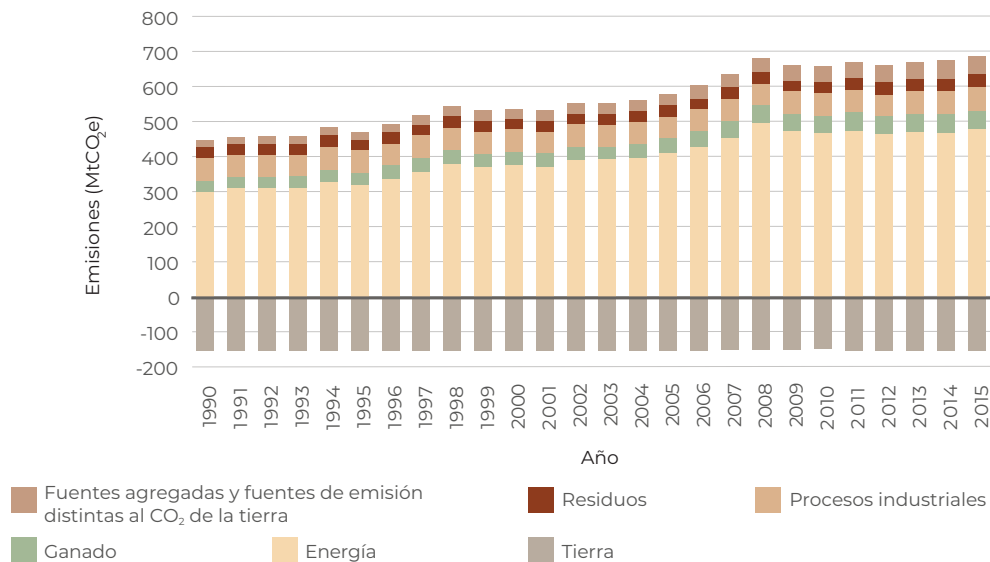
En 2018, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Semarnat, INECC, 2018) actualizó y presentó su Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) 1990-2015.<sup>23</sup> Esta actualización consideró las

<sup>23</sup> Hasta la fecha México ha realizado siete inventarios nacionales, el primero de ellos presentado en 1997 con la Primera Comunicación Nacional.

directrices del IPCC de 2006, con la finalidad de cumplir tanto con los estándares internacionales como con los lineamientos establecidos por la Ley General de Cambio Climático (LGCC). Entre las mejoras metodológicas del nuevo INEGyCEI, que buscan finalmente una mejor estimación de las emisiones nacionales, destacan la incorporación de factores de emisión acordes con las condiciones nacionales y mejores datos de actividad de los sectores económicos del país.

En la Figura 5.29 se muestra la evolución de las emisiones de los GEI en el país entre 1990 y 2015 de acuerdo con el INEGyCEI. Entre esos años las emisiones totales pasaron de 444.7 a 683 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente,<sup>24</sup> lo que es igual a un crecimiento de 53.6% a una tasa de crecimiento anual de 1.73%. Los sectores que tuvieron el mayor crecimiento en su volumen de emisión entre 1990 y 2015 fueron los de residuos (265.8%), el de procesos industriales y uso de productos (65.9%) y el de energía (59.5%), mientras que las emisiones derivadas de la actividad ganadera crecieron tan solo 6.1%. Por su parte, las emisiones derivadas del sector agrícola decrecieron ligeramente, en alrededor de 0.3%, en los 25 años comprendidos por el INEGyCEI.

**Figura 5.29** Emisión de GEI en México, 1990 - 2015



**Fuente:** INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México, 2018.

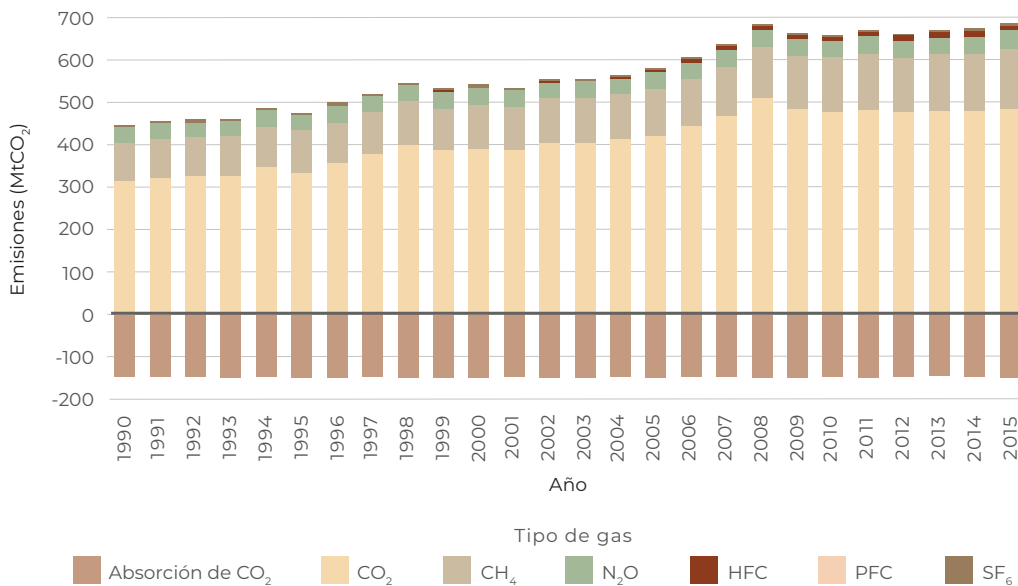
El inventario también reporta los volúmenes de dióxido de carbono capturados por la vegetación. Entre 1990 y 2015, la absorción se mantuvo prácticamente en los mismos niveles, con valores entre las 148 y las 151 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente; el crecimiento registrado en el periodo fue de tan solo 0.05%. El efecto más importante de las absorciones por la vegetación es la reducción del volumen

<sup>24</sup> Estas cifras no consideran las absorciones de dióxido de carbono de la categoría Tierra.

de las emisiones: cuando se les considera dentro de la contabilidad, las emisiones netas en 1990 y 2015, respectivamente, se reducen a 296.5 y 534.6 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Si se analiza la evolución de la emisión de los distintos GEI, los gases cuyos volúmenes de emisión crecieron en términos relativos en mayor grado entre 1990 y 2015 fueron los hidrofluorocarbonos (HFC; 1 559%),<sup>25</sup> el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>; 502.4%); el CO<sub>2</sub> (56.8%) y el CH<sub>4</sub> /47.7%; Figura 5.30). Sin embargo, en términos absolutos, el CO<sub>2</sub> fue el gas que incrementó mayormente su volumen de emisión en los veinticinco años que considera el inventario: pasó de 315 a 494.1 megatoneladas emitidas.

**Figura 5.30** Emisión de GEI en México por tipo de gas, 1990 - 2015



**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México. 2018.

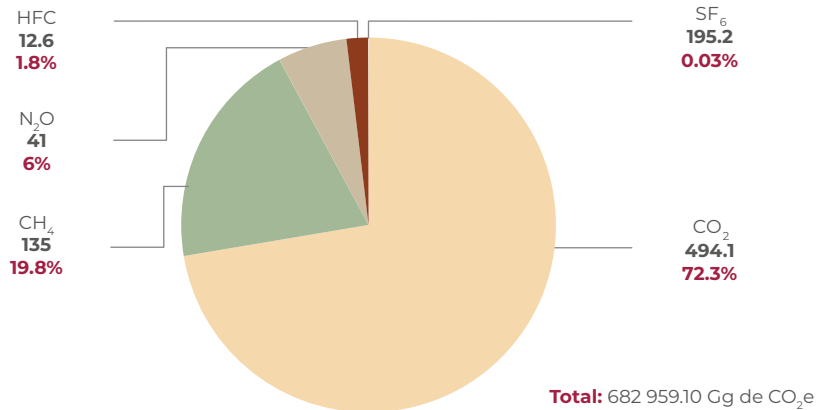
En el último año del inventario, de las 683 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas, el 72.3% correspondió tan solo al CO<sub>2</sub> (Figura 5.31). Le siguieron en importancia el CH<sub>4</sub> (19.8%) y el N<sub>2</sub>O (6%). Con una menor contribución, inferior al 2% del total de las emisiones, están el SF<sub>6</sub> (0.03%) y los HFC (1.85%).<sup>26</sup>

Si se desagregan por sector de emisión, el que tuvo una mayor contribución a la emisión total en 2015 fue el sector de energía, que participó con el 70% del total de las emisiones; le siguieron la categoría de procesos industriales y uso de productos, con 8%; y las emisiones de los sectores de agricultura y ganadería, con el 5 y 10%, respectivamente. El sector de residuos aportó el 7% de las emisiones nacionales en ese año (Figura 5.32).

<sup>25</sup> Este incremento se debió a la sustitución de los clorofluorocarbonos (CFC) por los hidrofluorocarbonos (HFC), con lo cual la producción y uso de estos últimos aumentó significativamente; se emplean comúnmente como refrigerantes a partir de mediados de la primera década del presente siglo como parte del Protocolo de Montreal.

<sup>26</sup> El inventario no incluye las emisiones de perfluorocarbonos (PFC) para el año 2015, ya que a partir de 2004 se dejó de producir aluminio primario en México y en el país no se consumen este tipo de compuestos como sustitutos de SAO.

**Figura 5.31** Emisión de GEI según tipo en México, 2015



**Nota:**

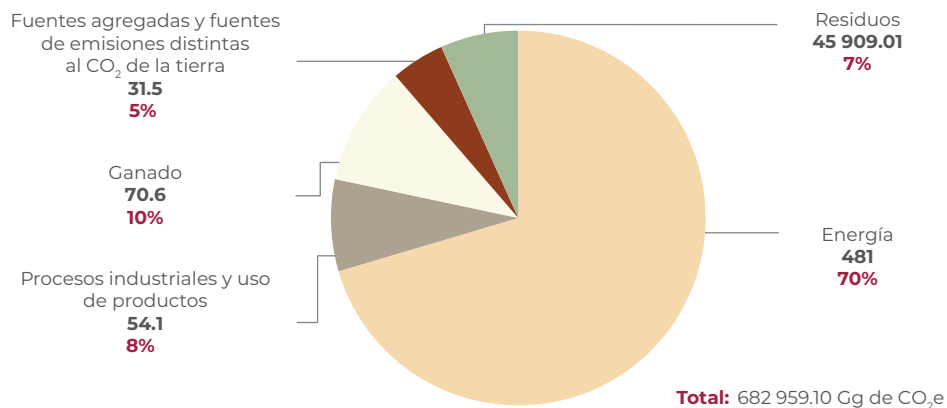
No se incluyen las absorciones de la categoría "Tierra". Las emisiones se muestran en megatoneladas.

**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México, 2018.

En la Figura 5.33 se muestra con mayor detalle la contribución de las distintas fuentes, dentro de sus respectivos sectores, a las emisiones nacionales de GyCEI en 2015. Las fuentes móviles, principalmente el autotransporte (23.4%) y las industrias de la energía (24.1%) fueron las fuentes que más contribuyeron al total de las emisiones, con alrededor del 47%. Le siguieron en importancia el sector pecuario (10.3%) y el de las industrias de manufactura y construcción (9.3%); en el caso del sector pecuario debe resaltarse su contribución como el más importante generador de metano en el país.

**Figura 5.32** Emisión de GEI según sector en México, 2015



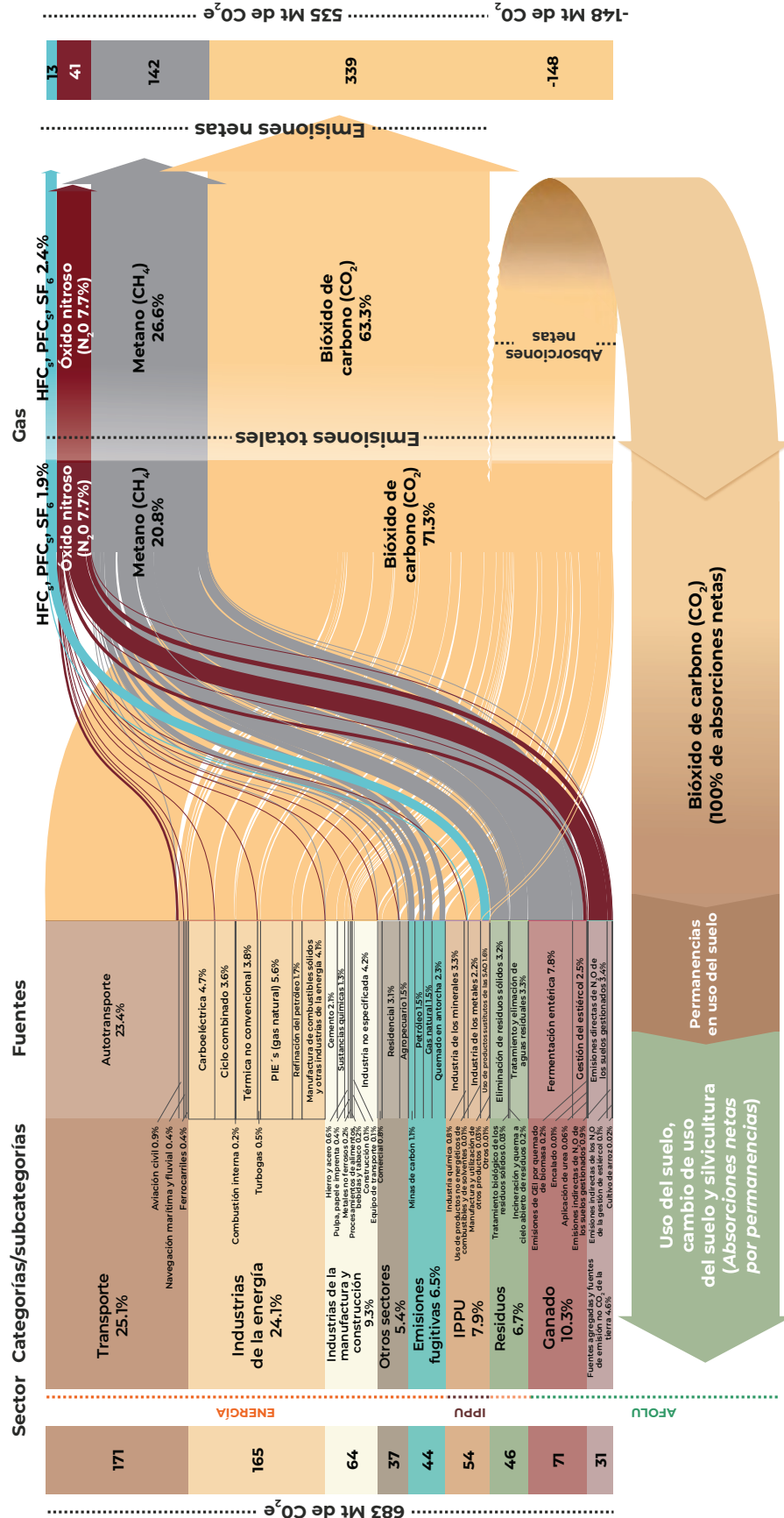
**Nota:**

No se incluyen las absorciones de la categoría "Tierra".

**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México, 2018.

**Figura 5.33** Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 2015



Fuente: INEEC y Semarnat. Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INEEC y Semarnat. México. 2018.



El carbono negro (CN) tiene un papel importante y único en el sistema climático de la Tierra debido a que absorbe la radiación solar, influye en los procesos de formación y en la dinámica de las nubes y altera significativamente el proceso de derretimiento de la nieve y las cubiertas de hielo. Está formado generalmente por agregados de partículas microscópicas de carbón rodeadas por compuestos orgánicos y pequeñas cantidades de sulfatos y nitratos. Se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles como el diésel y el combustóleo, así como por la quema de leña y otra biomasa

El CN forma parte de los llamados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC),<sup>1</sup> los cuales tienen un importante potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) y un tiempo de vida en la atmósfera más corto que el bióxido de carbono. Recientemente se ha incrementado el conocimiento de los efectos del carbono negro en la atmósfera y sus contribuciones al forzamiento radiativo planetario (ver IPCC, 2013) dado por sus diferentes componentes, que son: la absorción de radiación, su reflexión (el denominado “albedo”) y sus complejas interacciones con otros aerosoles y la formación de nubes (Bond *et al.*, 2013; Tabla a). La Tabla 5.4.a muestra la gran incertidumbre en la estimación de sus efectos a corto (20 años) y a largo (100 años) plazos, reflejando los grandes retos para entender y cuantificar sus efectos.

**Tabla 5.4.a** Estimaciones del potencial de calentamiento global (PCG) del carbono negro (CN) y el carbono orgánico (CO) a 20 y 100 años

	PCG	
	20 años	100 años
CN <sup>1</sup> total, global <sup>c</sup>	3 200 (270 a 6 200)	900 (100 a 1 700)
CN <sup>1</sup> (cuatro regiones) <sup>d</sup>	1 200 + 720	345 + 207
CN <sup>1</sup> global <sup>a</sup>	1 600	460
CN <sup>1</sup> interacción aerosol-radiación-albedo global <sup>b</sup>	2 900 + 1 500	830 + 440
CO <sup>2</sup> global <sup>a</sup>	-240	-69
CO <sup>2</sup> global <sup>b</sup>	-160 (-60 a -320)	-46 (-18 a -19)
CO <sup>2</sup> (cuatro regiones) <sup>d</sup>	-160 + 68	-46 + 20

**Notas:**

<sup>1</sup> CN: Carbono negro

<sup>2</sup> CO: Carbono orgánico

a Fuglestad *et al.* (2010).

b Bond *et al.* (2011). Uncertainties for OC are asymmetric and are presented as ranges.

c Bond *et al.* (2013). Metric values are given for total effect.

d Collins *et al.* (2013). The four regions are East Asia, EU + North Africa, North America and South Asia (como también se indica en Fry *et al.*, 2012).

**Fuente:**

IPCC. *Fifth Assessment Report (AR5)*. IPCC. 2013, 2014.

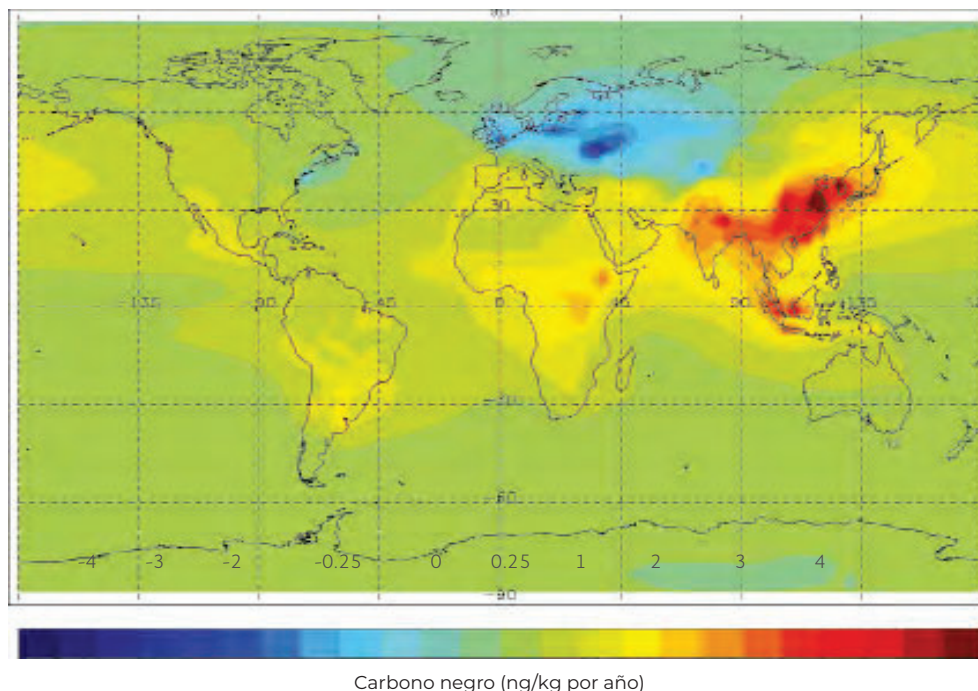
<sup>1</sup> Otros contaminantes climáticos de vida corta, junto con el carbono negro son el metano, los HFC y HCFC.



Aun cuando existe en la actualidad una importante incertidumbre en la comunidad científica acerca del potencial de calentamiento real de este contaminante (Figura 5.4.a), se reconoce que ha sido, después del bióxido de carbono, uno de los contaminantes que puede haber contribuido más al cambio climático, estimándose que su impacto podría rondar incluso el 15% del efecto de calentamiento.<sup>2</sup>

La concentración de carbono negro en la atmósfera varía regionalmente. Entre los años de 1970 y 2009, en los llamados países en desarrollo su concentración fue mayor que en otras regiones del planeta, observándose valores particularmente altos en ciertas zonas del centro y norte de la India y el noreste de China (Mapa a). Aunque no con la misma intensidad, los efectos de calentamiento de estos contaminantes también se aprecian en algunas zonas de Sudamérica y gran parte del territorio mexicano.

**Mapa 5.4.a** Tendencias en la concentración troposférica media anual de carbono negro, 1970 - 2009



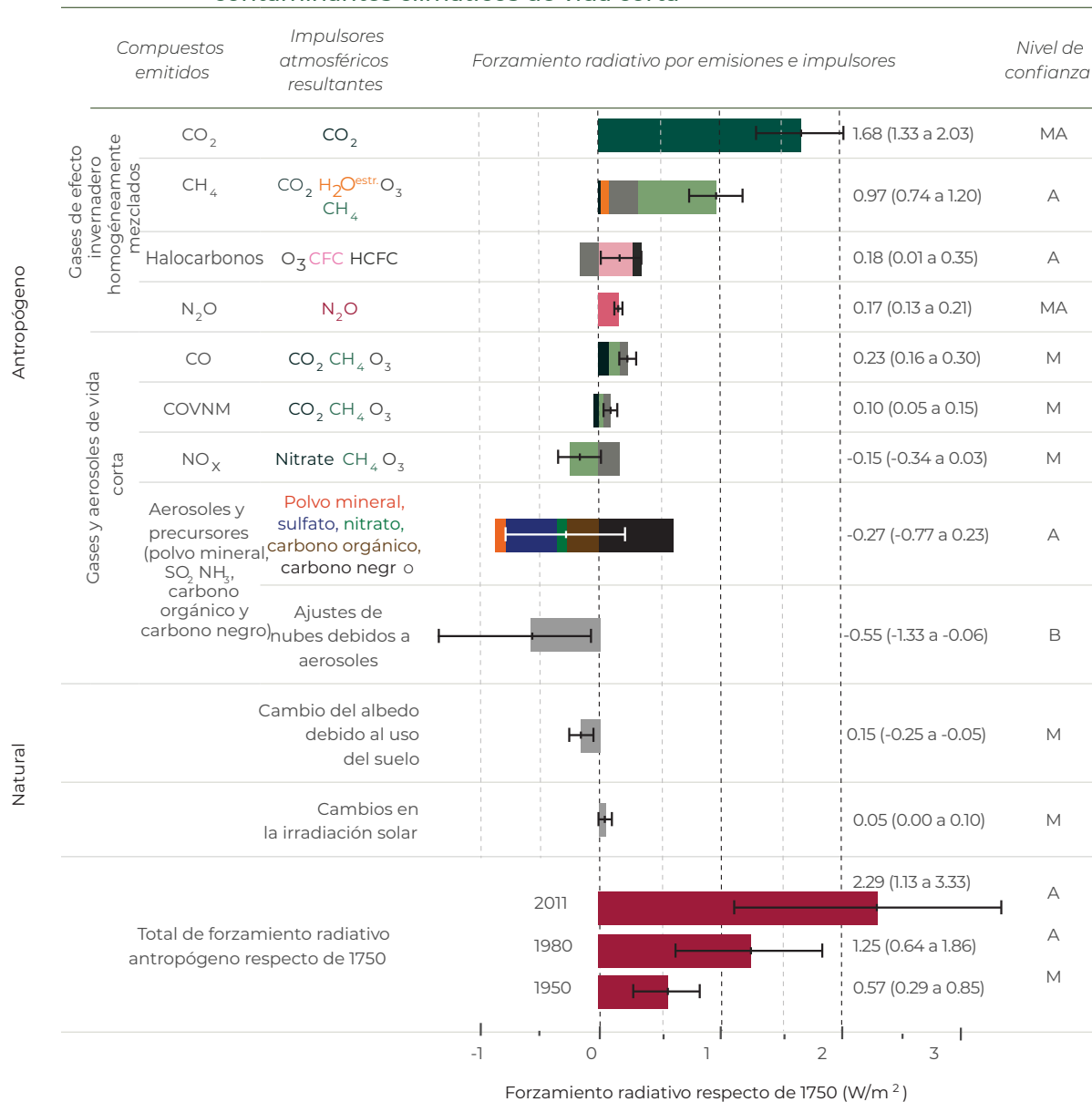
**Fuente:**

Chung, C.E., V. Ramanathan, D. Kim et al. Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research* 110. 2015.

<sup>2</sup> Ver: Jacobson, M.Z. Testimony for the hearing on black carbon and global warming. House Committee on Oversight and Government Reform United States House of Representatives, The Honorable Henry A. Waxman, Chair. 2007.



**Figura 5.4.a** Forzamiento radiativo de algunos gases de efecto invernadero y contaminantes climáticos de vida corta



**Nota:**

Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático. Los valores son el forzamiento radiativo medio global 14, dividido de acuerdo con los compuestos emitidos o procesos que resultan en una combinación de impulsores. Los valores numéricos del forzamiento radiativo se indican a la derecha de la figura, junto con el nivel de confianza en el forzamiento neto (MA: muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo, MB: muy bajo). El forzamiento por albedo, debido al carbono negro sobre la nieve y el hielo, se incluye en la barra de aerosoles de carbono negro. No se muestran los forzamientos pequeños por estelas de condensación (0,05 W/m<sup>2</sup>, incluidos los cirrus originados por estelas de condensación) y los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (total de 0,03 W/m<sup>2</sup>). Los forzamientos radiativos correspondientes a las distintas concentraciones de gases se pueden obtener sumando las barras del mismo color. El forzamiento volcánico no se incluye, ya que su carácter episódico hace difícil la comparación con otros mecanismos de forzamiento. Se proporciona el forzamiento radiativo antropógeno total para tres años diferentes, en relación con 1750.

**Fuente:**

IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner et al. (eds.). Cambridge University Press. Reino Unido y Nueva York.





El efecto del carbono negro en el ambiente no sólo produce el calentamiento de la atmósfera; también deteriora la calidad del aire y se le ha asociado con efectos negativos sobre la salud humana, básicamente por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, por sus vínculos a ciertos tipos de cáncer, a efectos mutagénicos y a muerte prematura, entre los más importantes.

Las acciones orientadas hacia el abatimiento de las emisiones de los CCVC podrían tener múltiples beneficios adicionales además de contribuir a la mitigación del cambio climático en el corto plazo; entre ellos destacan también el mejoramiento inmediato de la calidad del aire y por tanto de la salud de la población, así como la reducción de la pérdida de masas forestales por la deforestación.

### Referencia:

Modificado de:

Semarnat. *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Semarnat. México. 2015.

Adicionalmente a la estimación de las emisiones de los GEI antes mencionados, el INEGyCEI 1990-2015 también calculó las emisiones de carbono negro (CN),<sup>27</sup> un compuesto climático de vida corta (CCVC) particularmente importante tanto por sus efectos en la salud como por su contribución al aumento en la temperatura atmosférica. Para más detalles sobre este contaminante consultar el recuadro [La importancia del carbono negro en el calentamiento global](#).

El CN se produce principalmente por la combustión incompleta de combustibles fósiles como el diésel y el combustóleo, así como por la quema de leña y otra biomasa. Debido a su gran capacidad para captar la radiación solar, se considera que este compuesto de vida corta es el que más ha contribuido al calentamiento global después del CO<sub>2</sub>.

Según las estimaciones del INEGyCEI 1990-2015, en el año 2015 las emisiones de este contaminante alcanzaron 112.25 megatoneladas, las cuales fueron 22.8% mayores a las calculadas por el inventario para 1990, en el que ascendieron a 91.4 megatoneladas (Figura 5.34). En 2015, el sector que mayormente contribuyó a la emisión de carbono negro fue el de energía (95%), seguido por el de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (4%) y el de residuos (1%).

<sup>27</sup> El carbono negro es un agregado de partículas microscópicas (un porcentaje de las PM<sub>2.5</sub>) con un núcleo de carbono que puede estar rodeado de otros compuestos orgánicos, sulfatos y nitratos.

**Figura 5.34** Emisión de carbono negro en México por sector, 1990 - 2015

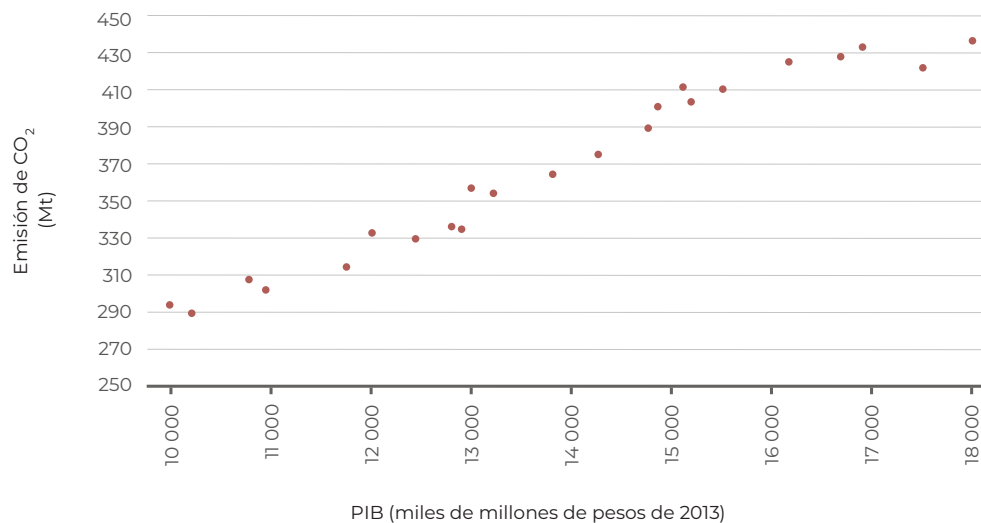


**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México, 2018.

Las emisiones totales de GyCEI también pueden analizarse considerando el crecimiento económico del país medido a través del PIB. En la medida en que las emisiones de GEI y el PIB desacoplan su ritmo de crecimiento se considera que la economía mejora su eficiencia al tener menos emisiones asociadas. En la Figura 5.35 se muestra la relación entre el PIB y la emisión de dióxido de carbono en el país por la quema de combustibles fósiles entre 1990 y 2015. Las emisiones totales de GyCEI también pueden analizarse considerando el crecimiento económico del país medido a través del PIB.

**Figura 5.35** Intensidad de carbono por la quema de combustible fósiles en México, 1993 - 2015

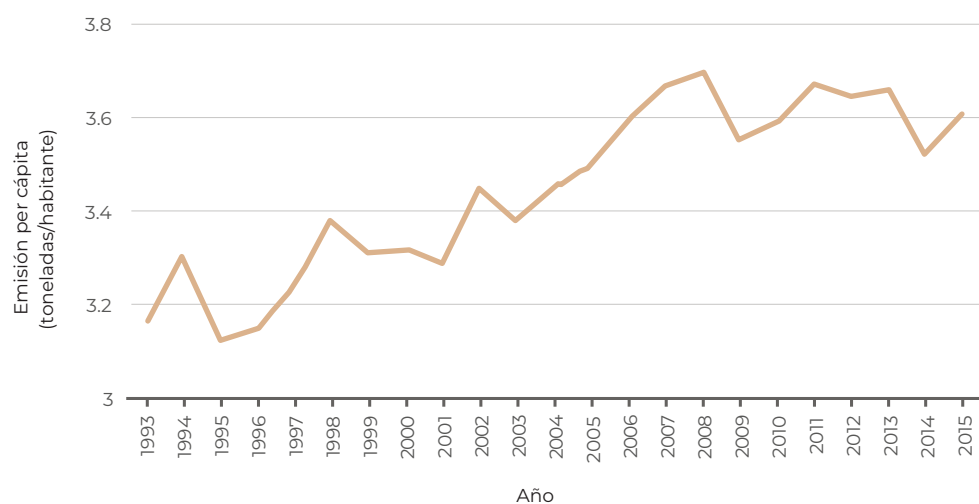


**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México, 2018.

Otro indicador comúnmente empleado a nivel internacional para comparar las emisiones entre países es el volumen de las emisiones per cápita. En México, la emisión per cápita muestra una tendencia creciente, con oscilaciones importantes, entre 1990 y 2015 (Figura 5.36). Entre esos años pasó de 3.16 a 3.61 toneladas por habitante. El valor máximo dentro del periodo se registró en 2008, cuando el indicador alcanzó las 3.7 toneladas por habitante. El valor nacional en 2015 se encuentra por debajo del valor global reportado por la Agencia de Energía para 2015 (4.4 ton/hab) y muy por debajo del valor de la OCDE (9.2 ton/hab). Dentro de la región latinoamericana, se encuentra por debajo de países como Curasao (30.7 ton/hab), Trinidad y Tobago (16.8 ton/hab), Argentina (4.41 ton/hab), Venezuela (4.4 ton/hab) y Surinam (3.8 ton/hab).

**Figura 5.36** Emisión de CO<sub>2</sub> per cápita en México, 1993 - 2015



**Fuente:**

INECC y Semarnat. *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC y Semarnat. México. 2018.

### Los gases de efecto invernadero en la atmósfera

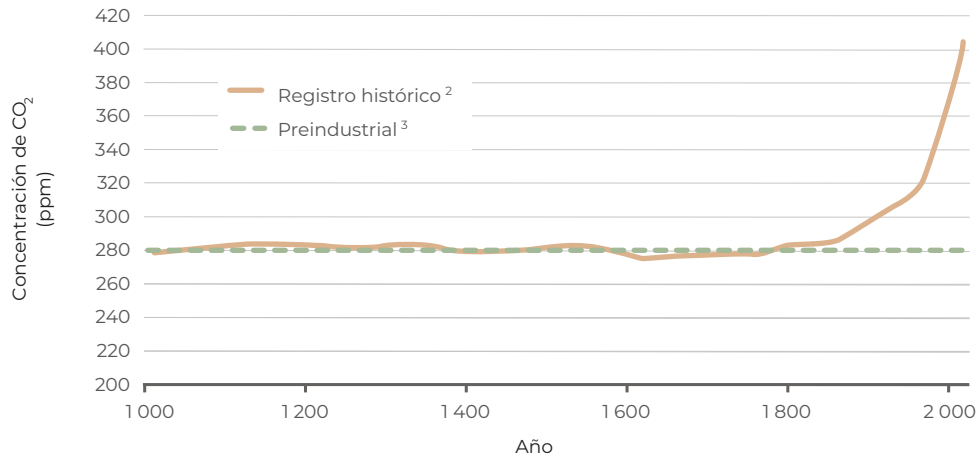
La ruptura del balance de los GEI en la atmósfera, que comenzó a partir de la revolución industrial y continúa hasta la fecha, es resultado de la imposibilidad de los sumideros naturales de estos gases, como la vegetación y los cuerpos de agua, para capturar la totalidad de las emisiones antropogénicas. Los registros históricos, que incluyen mediciones directas<sup>28</sup> y otras a partir de muestras conocidas como “testigos de hielo”,<sup>29</sup> indican que la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> se mantuvo relativamente constante durante la época preindustrial, aumentó significativamente a partir de la segunda mitad del siglo XIX y se aceleró marcadamente durante la segunda mitad del siglo XX (Figura 5.37; IB 1.2-4).

<sup>28</sup> Debido a que el CO<sub>2</sub> se dispersa fácilmente, las mediciones hechas en cualquier parte del planeta son representativas de la situación global. No obstante, el registro histórico más largo y confiable corresponde a la zona del Mauna Loa, en Hawái, por lo que los datos recogidos en este lugar se consideran representativos de la dinámica temporal de la concentración global (Keeling y Whorf, 2005).

<sup>29</sup> Se refiere a muestras de hielo obtenidas por paleoclimatólogos con las que es posible describir el clima del pasado, ya que contienen burbujas con una fracción de la atmósfera de la época en la que se formaron. A partir de estas muestras se puede estimar la temperatura y concentración de gases, entre otras variables.

Mientras que la concentración preindustrial de CO<sub>2</sub> fue de alrededor de 280 partes por millón (ppm), en 2015 rebasó el umbral de las 400 ppm y en 2018<sup>30</sup> alcanzó las 408.6 ppm.

**Figura 5.37** Concentración global atmosférica de bióxido de carbono, 1010 - 2018<sup>1</sup>



**Notas:**

<sup>1</sup> Los datos de 2018 corresponden al promedio de enero a octubre.

<sup>2</sup> La concentración histórica de bióxido de carbono proviene de registros de muestras de hielo (1010-1955) y de mediciones directas de la atmósfera (1959- 2018). Estas mediciones directas corresponden a los promedios mensuales del año dado.

<sup>3</sup> La concentración preindustrial fue de alrededor de 280 ppm de acuerdo con el IPCC.

**Fuentes:**

Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds et al. Historical CO<sub>2</sub> records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. 1998. En: *Carbon Dioxide Information Analysis Center. Trends: A Compendium of Data on Global Change*. U.S.A. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/lawdome.html>. Fecha de consulta: marzo de 2012.

Keeling, C.D., S.C. Piper, R. B. Bacastow et al. *Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and 13CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. Global aspects*, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego. 2001. Disponible en: [http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric\\_co2/mlo](http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2/mlo). Fecha de consulta: agosto de 2017.

Otros gases, como el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el metano (CH<sub>4</sub>) también han aumentado significativamente su concentración en la atmósfera en los últimos años. Sus concentraciones preindustriales fueron, respectivamente, de 270 y 715 partes por mil millones (ppmm). Entre 1999 y 2018, la concentración de óxido nitroso creció 5.1%, mientras que en el caso del metano lo hizo en 13.3% entre 1983 y 2017 (Figura 5.38). Las concentraciones de metano y óxido nitroso fueron, para 2017 y 2018, respectivamente, cerca de 2.6 y 1.2 veces mayores a las estimadas para la época preindustrial (que fueron de 270 y 715 partes por mil millones, respectivamente; Figura 5.38).

El aumento de la concentración de GEI causa un incremento en la retención de calor en la atmósfera. Se ha estimado que el CO<sub>2</sub> es responsable de cerca del 60% del efecto invernadero acumulado desde el siglo XVIII, el CH<sub>4</sub> del 20%, el N<sub>2</sub>O del 6% y los halocarbonos del 14% (PNUMA, 2002; IPCC, 2007a). El forzamiento radiativo del CO<sub>2</sub> se incrementó 20% de 1995 a 2005, lo que representa el mayor cambio por década en los últimos 200 años (IPCC, 2007a). De acuerdo con la quinta evaluación del IPCC, el forzamiento radiativo combinado, debido al incremento de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y halocarbonos es de 2.83 Wm<sup>-2</sup> y su tasa de incremento a lo largo de la era industrial es muy probable que no tenga precedente en los últimos 10 000 años.

<sup>30</sup> Corresponde al promedio de los meses de enero a octubre.

**Figura 5.38** Concentración global atmosférica de óxido nitroso y metano, 1983 - 2018



**Fuente:**

CDIAC. Atmospheric Trace Gas Measurements. CDIAC. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

## IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

### Escenarios globales y en México

Desarrollar posibles escenarios del clima en el futuro es fundamental para diseñar las políticas públicas de mitigación y adaptación al cambio climático. A través de ellos es posible prever, y con ello desarrollar, estrategias y acciones que permitan reducir la vulnerabilidad ante las probables condiciones venideras. Las proyecciones del clima se desarrollan empleando modelos climáticos, de muy diversa complejidad, que simulan cambios basados en diversos escenarios de concentración, emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos, así como de los cambios en el uso del suelo.

Los escenarios globales que se presentan en los siguientes párrafos corresponden a los que generó el IPCC para su Quinto Informe (ver IPCC, 2014). De entre ellos, se eligieron dos que difieren básicamente en la magnitud de las emisiones de GEI que consideran en sus análisis (y por ello también difieren en su impacto en el sistema climático): el RCP2.6,<sup>31</sup> llamado de “mitigación estricta”, y bajo el cual se considera probable mantener el calentamiento global a menos de 2 °C por encima de las temperaturas preindustriales;<sup>32</sup> y el RCP8.5,<sup>33</sup> un escenario cuya trayectoria correspondería a la ausencia de esfuerzos adicionales para limitar las emisiones de GEI.<sup>34</sup>

<sup>31</sup> Los escenarios utilizados en el Quinto Informe del IPCC reciben el nombre de “trayectorias de concentración representativas” (RCP, por sus siglas en inglés). El RCP2.6 corresponde a un forzamiento radiativo para el año 2100 de 2.6 Wm<sup>-2</sup> con respecto al valor de forzamiento de 1750 (considerado arbitrariamente como 0). Los escenarios con forzamientos cercanos a RCP2.6 se caracterizan por emisiones negativas netas para 2100, es decir, escenarios en los que se secuestran más GEI que los que se liberan en la atmósfera. Este escenario involucraría un menor calentamiento debido una menor emisión y concentración de GEI en la atmósfera en comparación con el escenario RCP8.5.

<sup>32</sup> Lo cual está acorde con los compromisos del Acuerdo de París.

<sup>33</sup> Corresponde a un forzamiento radiativo para el año 2100 de 8.5 Wm<sup>-2</sup> con respecto al valor de forzamiento de 1750.

<sup>34</sup> Ninguno de los dos escenarios considera cambios en el forzamiento debidos a factores naturales, como es el caso por ejemplo, del causado por erupciones volcánicas, entre otros fenómenos.

En el caso de la temperatura superficial, según las proyecciones es probable que para finales de este siglo (2081-2100) aumente 2 °C respecto a la media del periodo 1850-1900 para el escenario RCP8.5, pero sería improbable bajo el escenario de mitigación estricta (RCP2.6; Figura 5.39a; IPCC, 2014). Según el IPCC (2014), el calentamiento continuará más allá del siglo XXI, mostrando variabilidad interanual, decenal y regional; el Ártico se calentará más rápido que el resto del planeta y los continentes se calentarán más rápido que los océanos. Es muy probable también que las ondas de calor sean más frecuentes y largas.

Los cambios también se reflejarán en los patrones de precipitación global, los cuales además no serán uniformes en el planeta. Se acentuará el contraste en los niveles de precipitación entre las regiones y estaciones húmedas y secas. Es probable que para finales de siglo aumenten las lluvias en las latitudes altas, regiones húmedas de latitud media y en el océano Pacífico ecuatorial, y que disminuyan en muchas regiones secas de latitudes medias y subtropicales (escenario RCP8.5). Además, es muy probable;<sup>35</sup> que las lluvias extremas sean más intensas y frecuentes en un gran número de zonas continentales de latitud media y en las regiones tropicales húmedas y es probable que se intensifique la variabilidad de las precipitaciones relacionadas con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) a escala regional (IPCC, 2014).

Respecto al hielo marino, para ambos escenarios considerados, las proyecciones muestran que en el Ártico se reducirá durante todo el año (Figura 5.39b). En el caso de los glaciares, para finales de este siglo, su volumen global, excluidos los de la periferia de Antártica, se reduciría entre 15 y 85% para el escenario RCP2.6 y entre el 35 y el 85% en el caso del escenario RCP8.5 (IPCC, 2014).

El calentamiento de los océanos, el deshielo de los glaciares y de los mantos de hielo continuarán provocando el incremento del nivel del mar durante el siglo XXI bajo los dos escenarios considerados. Es muy probable que para el periodo 2081-2100 el nivel del mar aumente con respecto al periodo 1986-2005 en más del 95% de la superficie oceánica, y que el 70% de las costas del mundo experimenten un cambio de nivel del mar (ya sea ascendente o descendente) de hasta un 20% del valor medio mundial. La elevación media mundial del nivel del mar proyectada para el periodo 2081-2100 varía dependiendo del escenario de concentración de GEI que se emplee, y va desde los 0.26 a los 0.98 metros; la tasa de elevación del nivel del mar durante el mismo periodo se espera que sea, bajo el escenario RCP8.5, mayor que la observada entre 1971 y 2010, alcanzando entre 8 y 16 milímetros anuales (Figura 5.40).

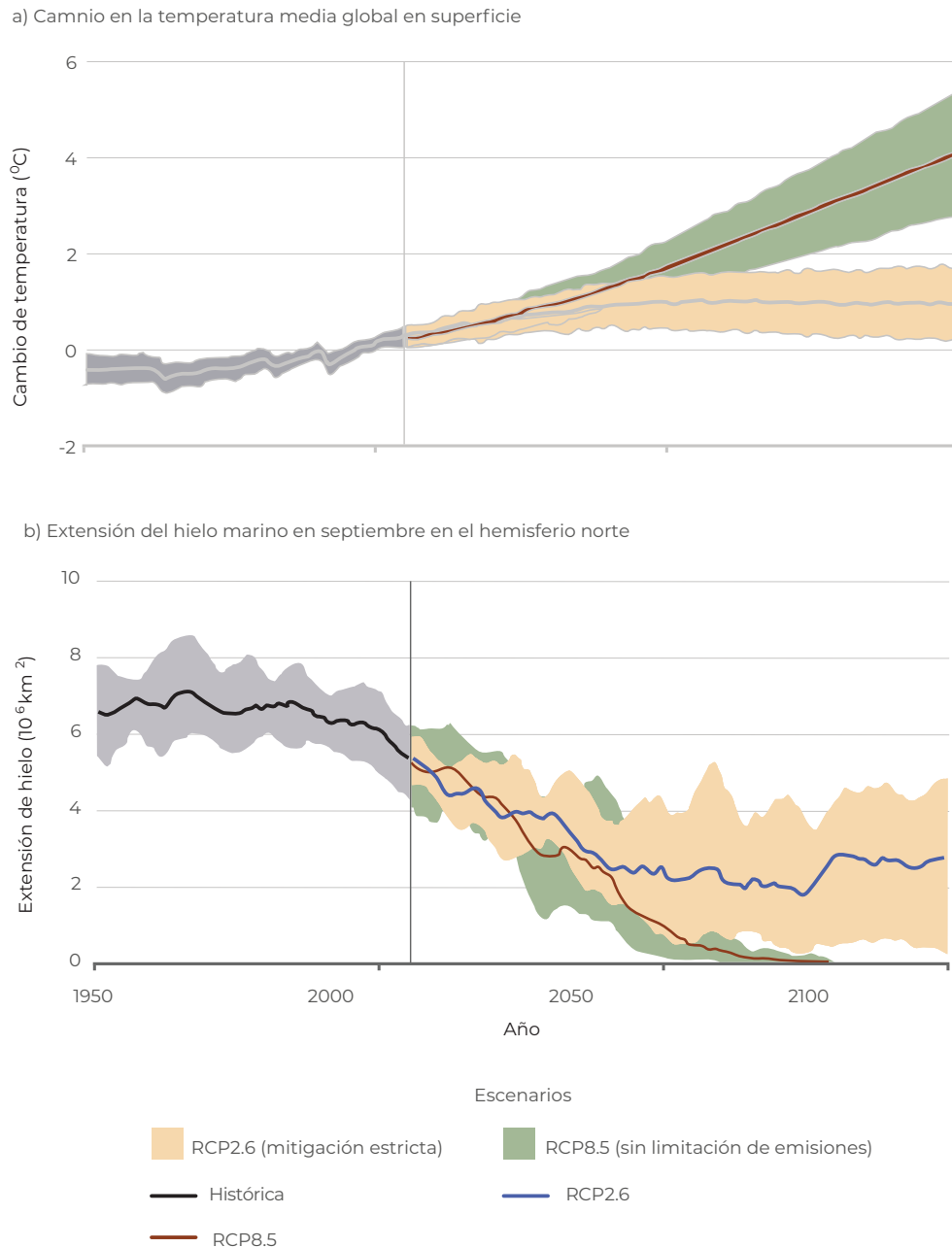
El cambio climático afectará también el ciclo del carbono, con lo que se intensificará el incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y en los océanos. Ambos escenarios apuntan a que, como resultado, los mares y océanos se acidificarán<sup>36</sup> globalmente para finales del siglo XXI, sin embargo, bajo el escenario RCP2.5 podría presentarse una recuperación lenta a partir del año 2050.

---

<sup>35</sup> Representa una probabilidad entre el 90 y 100%.

<sup>36</sup> Para mayor detalle sobre los cambios en el clima y ciclos biogeoquímicos, se recomienda revisar el último informe de evaluación del IPCC (2015).

**Figura 5.39** Cambios proyectados en la temperatura media global y el hielo marino en el hemisferio norte, 1950 - 2100



**Nota:**

<sup>1</sup> Las series temporales de las proyecciones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP2.6 (morado) y RCP8.5 (naranja). El color negro (sombreado gris) representa la evolución histórica en los modelos, utilizando forzamientos históricos reconstruidos.

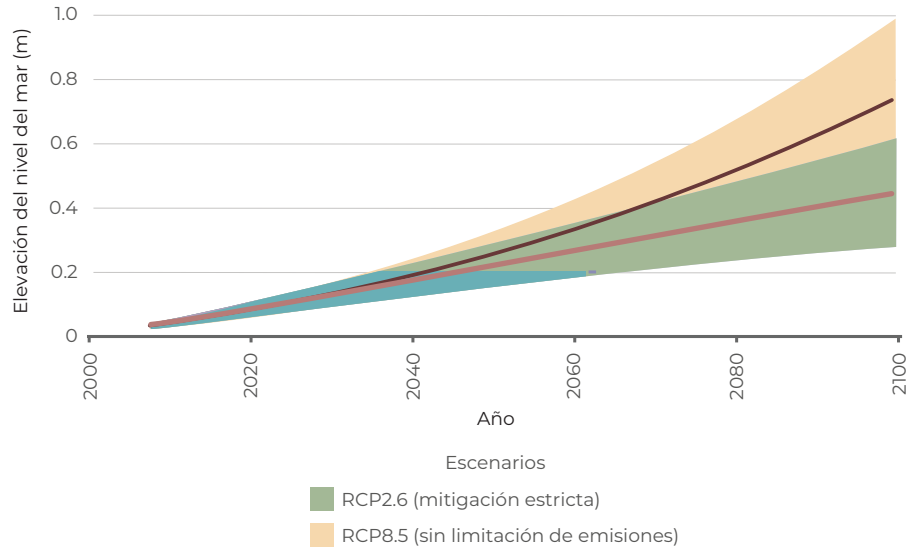
**Fuente:**

IPCC. *Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Reino Unido y EE. UU. 2013.

En el caso de México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), actualizaron los escenarios de cambio climático para el futuro cercano (2015-2039), futuro intermedio (2045-2069)

y el futuro lejano (2075-2099), todo ello con el fin de aportar información útil para realizar estudios sobre impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático (Fernández Eguiarte *et al.*, 2016). La actualización consideró los escenarios de cambio climático RCP4.5 (de bajas emisiones) y RCP8.5 (de altas emisiones) propuestos por el IPCC.

**Figura 5.40** Elevación media mundial del nivel del mar<sup>1</sup> durante el siglo XXI, 2000 - 2100



**Nota:**

<sup>1</sup> La elevación está calculada con respecto al promedio del período 1986-2005.

**Fuente:**

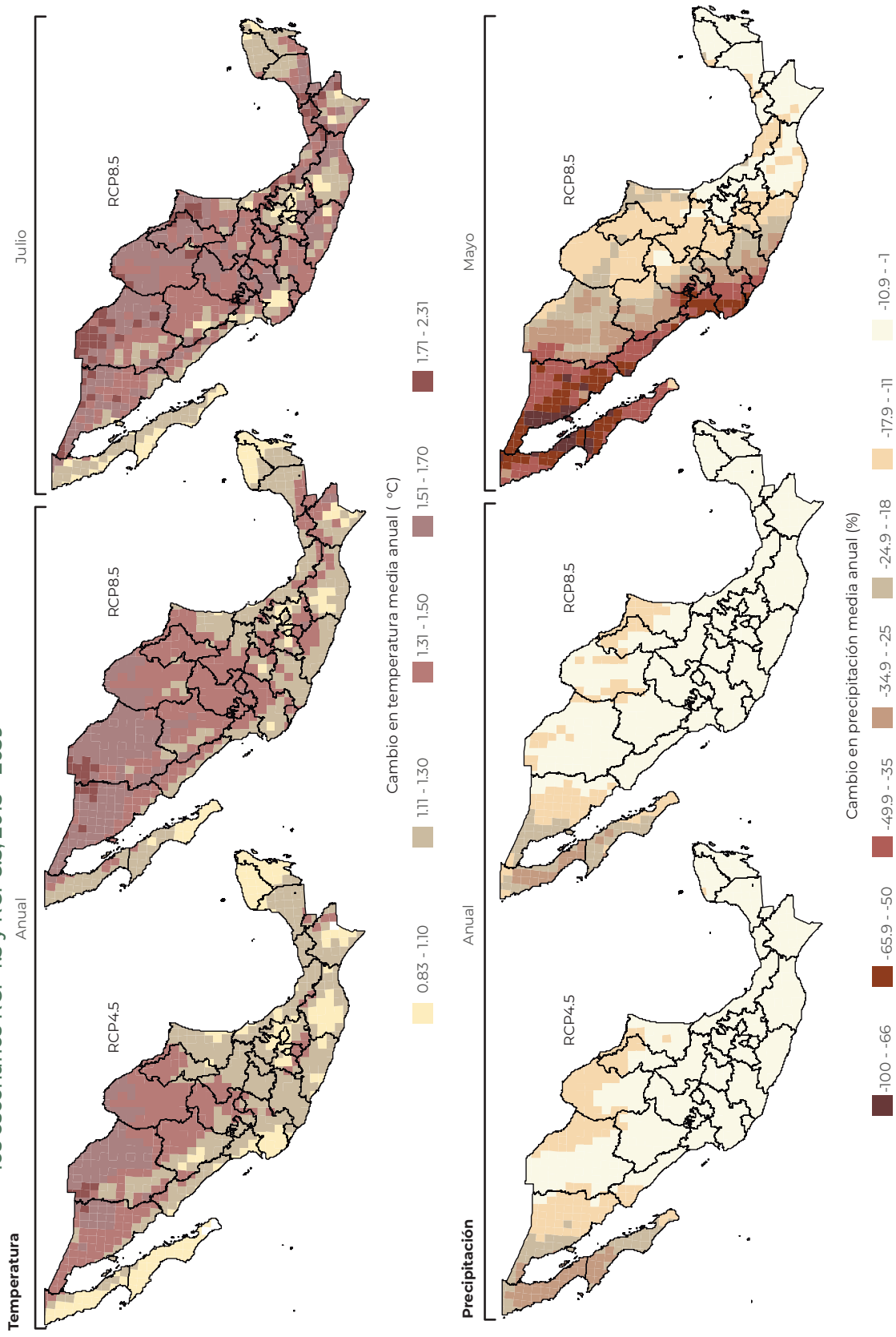
IPCC. *Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC. Reino Unido y EE. UU. 2013.

En cuanto a la temperatura promedio anual, ambos escenarios proyectan incrementos para el periodo 2015-2039 con referencia al periodo 1961-2000 para todo el país (Figura 5.41). Sin embargo, en el escenario de bajas emisiones (RCP4.5) se pronostica que la mayor parte del país registraría incrementos entre 1.1 y 1.3 °C, mientras que en el escenario de altas emisiones (RCP8.5) dominan en el territorio aumentos de entre 1.3 y 1.5 °C. En ambos casos, Chihuahua, Sonora y Coahuila serían los estados con los mayores aumentos de temperatura. Cuando se observa por separado el caso del mes típicamente más caliente del año (julio) bajo el escenario RCP8.5, alrededor de dos terceras partes de la superficie nacional registraría temperaturas entre 1.3 y 1.7 °C mayores que el promedio (Figura 5.41). En este último caso, algunas zonas del país podrían incrementar su temperatura en un intervalo entre 1.7 y 2.3 °C.

Con respecto a la precipitación (Figura 5.41), los dos escenarios pronostican una reducción en su valor promedio anual (respecto al periodo 1961-2000) sobre todo el territorio nacional para el periodo 2015-2039. La mayor parte del territorio reduciría su precipitación, bajo los dos escenarios, entre el uno y 11% de su valor promedio anual.



**Figura 5.41** Proyecciones de la temperatura y precipitación anuales promedios y para meses seleccionados en México bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, 2015 - 2039



**Fuente:** Fernández Equiarte, A., J. Zavala Hidalgo, R. Romero Centeno et al. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNAM, INECC. México, 2016. Los datos se encuentran disponibles en: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

Baja California, Baja California Sur y Sonora serían los estados más afectados bajo los dos escenarios con la reducción de entre el 25 y 35% de su precipitación anual. En el mes de mayo (generalmente el menos lluvioso del año), gran parte de zona occidente y noroeste del país podría reducir significativamente su precipitación. En algunas zonas de Sonora y Baja California, la magnitud de la reducción podría alcanzar entre el 66 y 100% de su promedio mensual histórico.

### Cambios previstos a nivel global

A pesar de que actualmente ya se enfrentan los impactos del cambio climático, las proyecciones indican que con los cambios en el clima los impactos observados podrían intensificarse. Aunque la incertidumbre asociada a las proyecciones varía de acuerdo con el sector de que se trate, muchas de ellas tienen niveles de confianza significativos (ver IPCC, 2014).

### Recursos hídricos

Las proyecciones sobre el cambio climático revelan cambios en el ciclo hidrológico que seguramente tendrán impactos en la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos. Uno de los impactos que el IPCC ha identificado como consecuencia de lo anterior, junto a la inseguridad alimentaria y la pérdida de medios de subsistencia, es la inseguridad hídrica, principalmente en zonas rurales y en comunidades de escasos recursos (IPCC, 2014). Los estudios señalan que cuanto mayor sea el nivel de calentamiento que experimente el planeta durante el siglo XXI mayor será la proporción de la población con escasez de agua. El derretimiento de los glaciares que acelerará el incremento de la temperatura también representaría una amenaza a la seguridad hídrica en muchas regiones (Moon, 2017).

Estos impactos no serán uniformes globalmente, principalmente debido a que los cambios que se proyectan en el ciclo hidrológico diferirán muy probablemente entre regiones (ver sección anterior). Las proyecciones señalan que se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y subterráneas en la mayoría de las regiones secas subtropicales, con lo que podría intensificarse la competencia por el agua entre los sectores consumidores. Un escenario opuesto, con el aumento de los recursos hídricos, se pronostica para las latitudes altas del planeta (IPCC, 2014).

Con respecto a la calidad, se espera que la calidad del agua bruta y agua potable se reduzca como resultado de la interacción entre el aumento de la temperatura, el incremento de la concentración de sedimentos, nutrientes y contaminantes debido a las lluvias; la mayor concentración de contaminantes durante las sequías, y la interrupción del funcionamiento de las instalaciones de tratamiento durante las crecidas (IPCC, 2014).

## Biodiversidad

Existe una cantidad importante de estudios que demuestran los efectos del cambio climático global sobre la biodiversidad y los ecosistemas (ver los informes del IPCC). La última evaluación del IPCC indica que un gran número de especies terrestres y dulceacuícolas enfrentan un riesgo creciente de extinción con las condiciones climáticas proyectadas para este siglo. En todos los escenarios considerados en el último reporte del IPCC, el riesgo de extinción de las especies terrestres, dulceacuícolas y marinas es superior respecto a los registrados en los periodos preindustrial y actual debido a la magnitud y la tasa de cambio climático (IPCC, 2014).

La Figura 5.42 muestra la velocidad a la que pueden cambiar su distribución algunos grupos biológicos en comparación con la velocidad a la que se proyecta que avancen las temperaturas a través de las regiones. Ante el cambio que podría resultar de los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, es probable que un gran número de especies sean incapaces de encontrar climas adecuados para su sobrevivencia durante este siglo, por lo que es posible que sus poblaciones se extingan. Los árboles y las plantas herbáceas podrían ser de los grupos más afectados por el incremento de la temperatura bajo el escenario RCP8.5. No obstante, los cambios que proyecta el escenario RCP2.6 podrían no resultar tan adversos para muchas de las especies de estos grupos (Figura 5.42). Algunos de los grupos que podrían resultar menos afectados por el cambio climático, aún bajo el escenario más adverso (RCP8.5), es del de los ungulados,<sup>37</sup> cuya velocidad mínima estimada de desplazamiento está por arriba de la velocidad climática media obtenida para dicho escenario.

Respecto a las especies marinas, se prevé que sus desplazamientos debidos al incremento de temperatura provocarán invasiones en latitudes altas y con ello elevadas tasas de extinción en los trópicos y los mares semicerrados. Este tipo de migraciones ya han sido observadas en latitudes norteñas altas: en un estudio en el mar del Norte (que se ha calentado alrededor de 0.65 °C entre 1962 y 2001), 15 de 35 especies de peces ampliaron sus rangos de distribución hacia zonas más frías al norte de sus áreas originales (Figura 5.43; Perry *et al.*, 2005).

## Impactos sobre las poblaciones humanas

Las poblaciones humanas estarían expuestas a los impactos del cambio climático de manera directa en aspectos como la salud, seguridad, bienestar, seguridad alimentaria y pobreza, además de los daños derivados de la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos. En los siguientes párrafos se presentan algunas de las afectaciones más relevantes.<sup>38</sup>

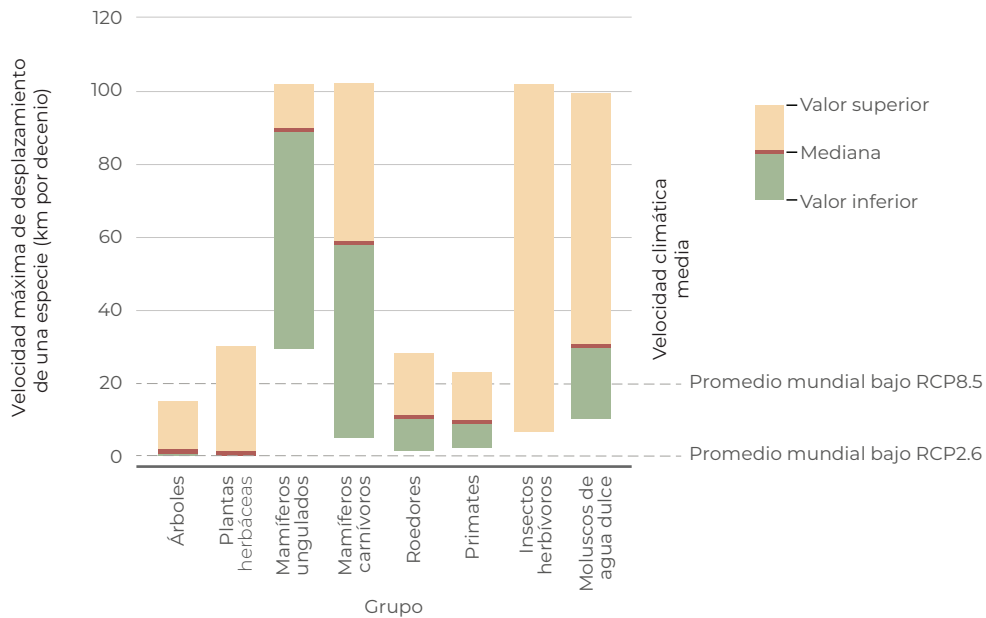
---

<sup>37</sup> Mamíferos que se apoyan y caminan con el extremo de los dedos, típicamente revestidos con una pezuña, como en el caso de ciervos, cabras, antílopes, etc.

<sup>38</sup> Para profundizar en el tema se recomienda revisar el último informe de evaluación del IPCC (2015).

**Figura 5.42**

**Velocidades de desplazamiento de algunos grupos de especies ante cambios de temperatura**



**Nota:**

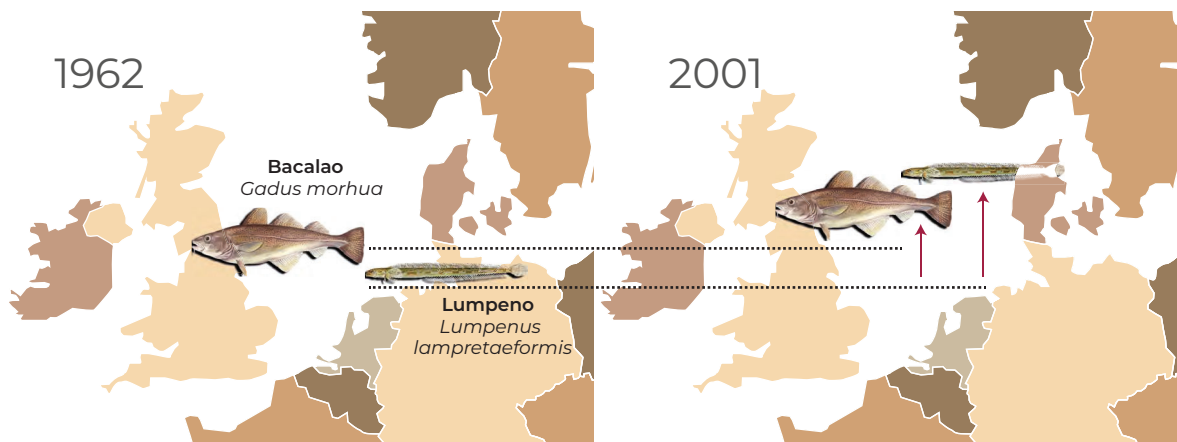
La figura muestra las velocidades máximas a las que pueden desplazarse los grupos de especies a través del paisaje en comparación a la velocidad a la que se proyecta que avancen las temperaturas. Cuando la velocidad de desplazamiento de los grupos es menor que las líneas de los promedios mundiales bajo los RCP2.6 y 8.5 indica que sus especies no serán capaces de seguir el ritmo del calentamiento y podrían extinguirse sin intervención humana.

**Fuente:**

IPCC. Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. 2014.

**Figura 5.43**

**Desplazamiento de dos especies marinas por el calentamiento del mar del Norte, 1962 y 2001**

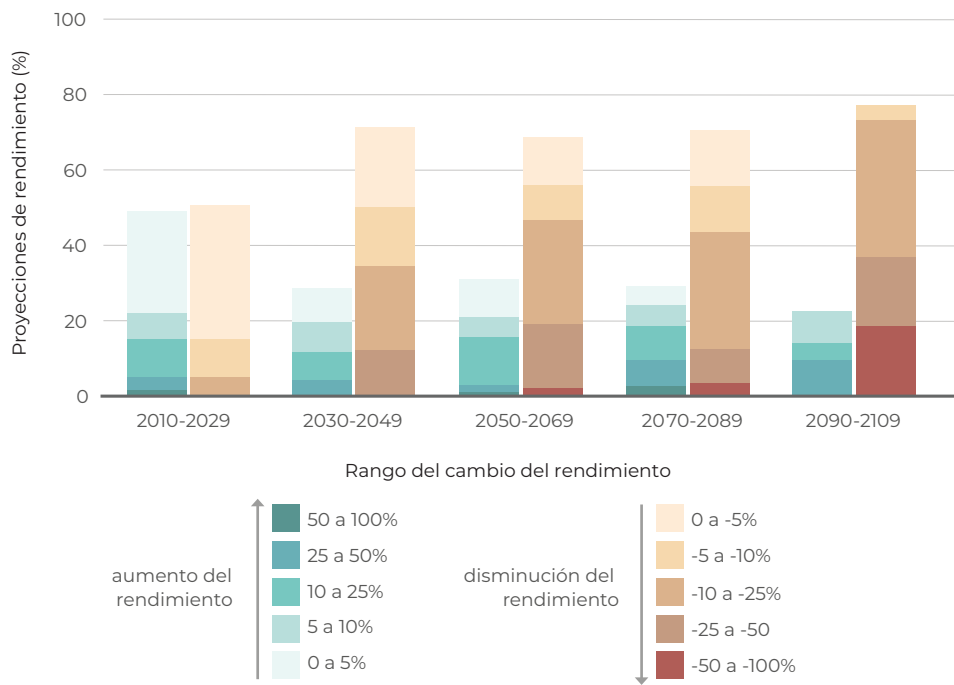


**Fuente:**

Perry, A.L., P.J. Low, J.R. Ellis et al. Climate change and distribution shifts in marine fishes. Science 308: 1912-1915. 2005.

En el caso de la producción de alimentos en el futuro, el rendimiento de los cultivos será afectado por el cambio climático. De acuerdo con las proyecciones desarrolladas para cultivos como el trigo, arroz y maíz, los impactos en la producción serán negativos en las regiones tropicales y templadas cuando los incrementos de la temperatura alcancen los 2 °C o más respecto a la temperatura promedio de finales del siglo XX. El IPCC plantea que ocurrirá una variación en los impactos dependiendo de las regiones y los escenarios de adaptación. En el periodo 2030-2049, 10% de las proyecciones revelan daños superiores al 25% sobre los rendimientos y 10% de las proyecciones muestran ganancias en rendimientos superiores al 10% en comparación con las obtenidas a finales del siglo XX (Figura 5.44). Posterior al año 2050, el riego aumenta y depende del nivel de incremento de temperatura (IPCC, 2014).

**Figura 5.44** Cambios en el rendimiento de los principales cultivos, 2010 - 2109



**Nota:**

La figura incluye proyecciones para diferentes escenarios de emisiones, para regiones tropicales y templadas y para casos de adaptación e inadaptación combinados. Hay relativamente pocos estudios que consideren los impactos en los sistemas de cultivo para escenarios que contemplen un aumento de la temperatura media global de 4 oC o más. En relación con cinco periodos a corto y largo plazo, los datos (n= 1 090) se indican en el periodo de 20 años en el eje horizontal que incluye el punto medio de cada periodo futuro de las proyecciones. Los cambios en el rendimiento de los cultivos son relativos a los niveles del final del siglo XX. Los datos para cada periodo suman el 100%.

**Fuente:**

IPCC. *Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC. 2014.

Los impactos sobre los cultivos, así como aquellos sobre otros sectores productores de alimentos (por ejemplo, la pesca o la ganadería), generarán efectos en la seguridad alimentaria. Los efectos se mostrarán tanto en el acceso a los alimentos como en la estabilidad de los precios. A nivel mundial, la creciente demanda de

alimentos combinada con un incremento de la temperatura de 4 °C por arriba del promedio de finales del siglo pasado, produciría grandes riesgos para la seguridad alimentaria, aunque serían más severos en las zonas de latitudes bajas.<sup>39</sup>

La salud de las poblaciones humanas también podría ser afectada. Durante el presente siglo, aumentará la probabilidad de enfermedades, lesiones y muerte por olas de calor e incendios; la disminución en la producción de alimentos en las regiones pobres provocaría una mayor probabilidad de desnutrición; también serán mayores los riesgos a contraer enfermedades transmitidas por agua, alimentos y vectores.

Los riesgos de desplazamiento de las poblaciones se incrementan cuando carecen de recursos para enfrentar situaciones adversas, por lo que muchas poblaciones quedarían expuestas a mayores riesgos ante fenómenos meteorológicos extremos. Se ha proyectado que aumente el número de personas desplazadas y que los países en desarrollo serían los más afectados.

Los asentamientos costeros también podrían sufrir las consecuencias de la elevación del nivel del mar. Según algunos estudios, el derretimiento de Antártica en un escenario en el cual no se consigan abatir las emisiones de GEI podría elevar el nivel del mar en un metro en 2100 (De Conto y Pollard, 2016), lo cual dejaría prácticamente bajo el agua a muchas ciudades costeras en todo el globo, afectando la vida de millones de personas.

La estimación de los costos económicos es compleja y tiene muchas limitaciones. Sin embargo, reconociendo estas limitaciones, se prevé que un incremento promedio global de temperatura de alrededor de 2.5 °C por arriba de los niveles preindustriales costaría entre el 0.2 y el 2% de los ingresos<sup>40</sup> (IPCC, 2014). Los costos de adaptación para las zonas costeras durante este siglo variarán significativamente a nivel regional, de país y localmente. La adaptación para países en desarrollo con baja altitud será muy costosa, en virtud que los daños y acciones preventivas podrían implicar la inversión de varios puntos porcentuales de su producto interno bruto (PIB).

## Posibles impactos del cambio climático en México

A pesar de que nuestro país no es un gran emisor de GEI a nivel mundial, los efectos del cambio climático ya se resienten y se proyecta que podrían intensificarse más en el futuro. De acuerdo a los resultados de distintas evaluaciones realizadas sobre la vulnerabilidad de diversos sectores bajo escenarios de cambio climático, existe

---

<sup>39</sup> Considerando las limitaciones de los modelos con los cuales se calcularon dichas estimaciones, el IPCC anota "...que es más probable que improbable que las pérdidas sean mayores, y no menores, que las correspondientes al rango mencionado" (IPCC, 2014).

<sup>40</sup> Incluye carreteras y calles.

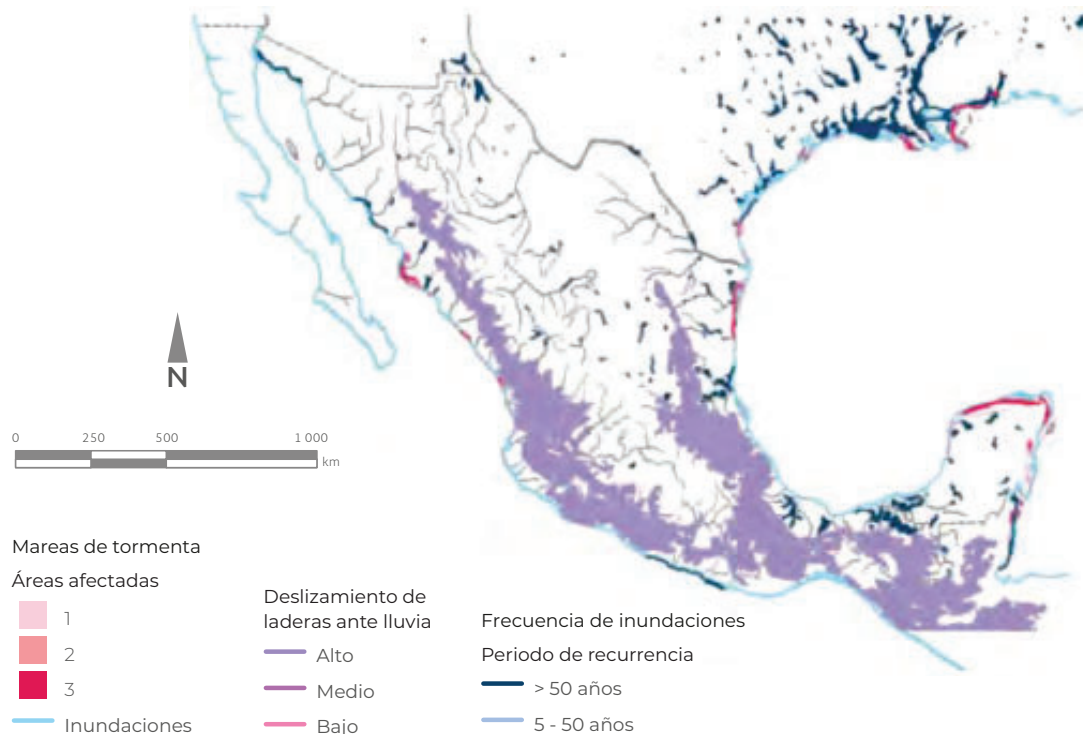
evidencia de que sus efectos, en combinación con otros factores de presión, podrían tener consecuencias ecológicas, económicas y sociales muy negativas, algunas de las cuales ya son visibles en la actualidad (Semarnat, 2014).

A continuación se presentan algunos de los principales impactos que los cambios en el clima podrían tener en el país, así como las afectaciones en diversos sectores. Si se desea profundizar en esta información, se sugiere revisar la Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC y Semarnat, 2018).

### Recursos hídricos

A pesar de que en promedio se calcula que las lluvias puedan disminuir hacia el 2100, en algunas zonas de la región centro-sur del país podría aumentar la frecuencia de eventos intensos. Este tipo de precipitaciones incrementa el riesgo de desastres como inundaciones y deslizamientos. Las inundaciones y la inestabilidad de laderas se presentan en forma recurrente y severa en estados de la costa del Golfo de México, como Veracruz y Tamaulipas, sobre todo cuando los ciclones tropicales tocan tierra o los nortes se combinan con sistemas tropicales sobre la costa del Golfo de México (Figura 5.45).

**Figura 5.45** Impactos potenciales por inundación (azul), deslizamiento por lluvias intensas (rosa) y marea de tormenta (rojo)



**Fuente:** INECC, Semarnat. *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC, Semarnat. México, 2012.

La infraestructura también está expuesta al efecto del cambio climático. En los 319 municipios (13% de los existentes en el país) que el INECC (2013) identificó como más vulnerables al cambio climático, la infraestructura de comunicaciones, energética, escolar y de salud podría estar amenazada por sus efectos (Figura 5.46). En esos municipios, existían en 2018 alrededor de 60 634 kilómetros de vías pavimentadas, lo que equivale a cerca del 25.03% de la infraestructura nacional. En algunos casos la longitud carretera de los municipios más vulnerables es una proporción significativa de los totales estatales, como por ejemplo en los casos de Campeche (85.9%), Baja California (84.9%), Tabasco (81.5%), Baja California Sur (76.9%) y Sinaloa (65.6%).

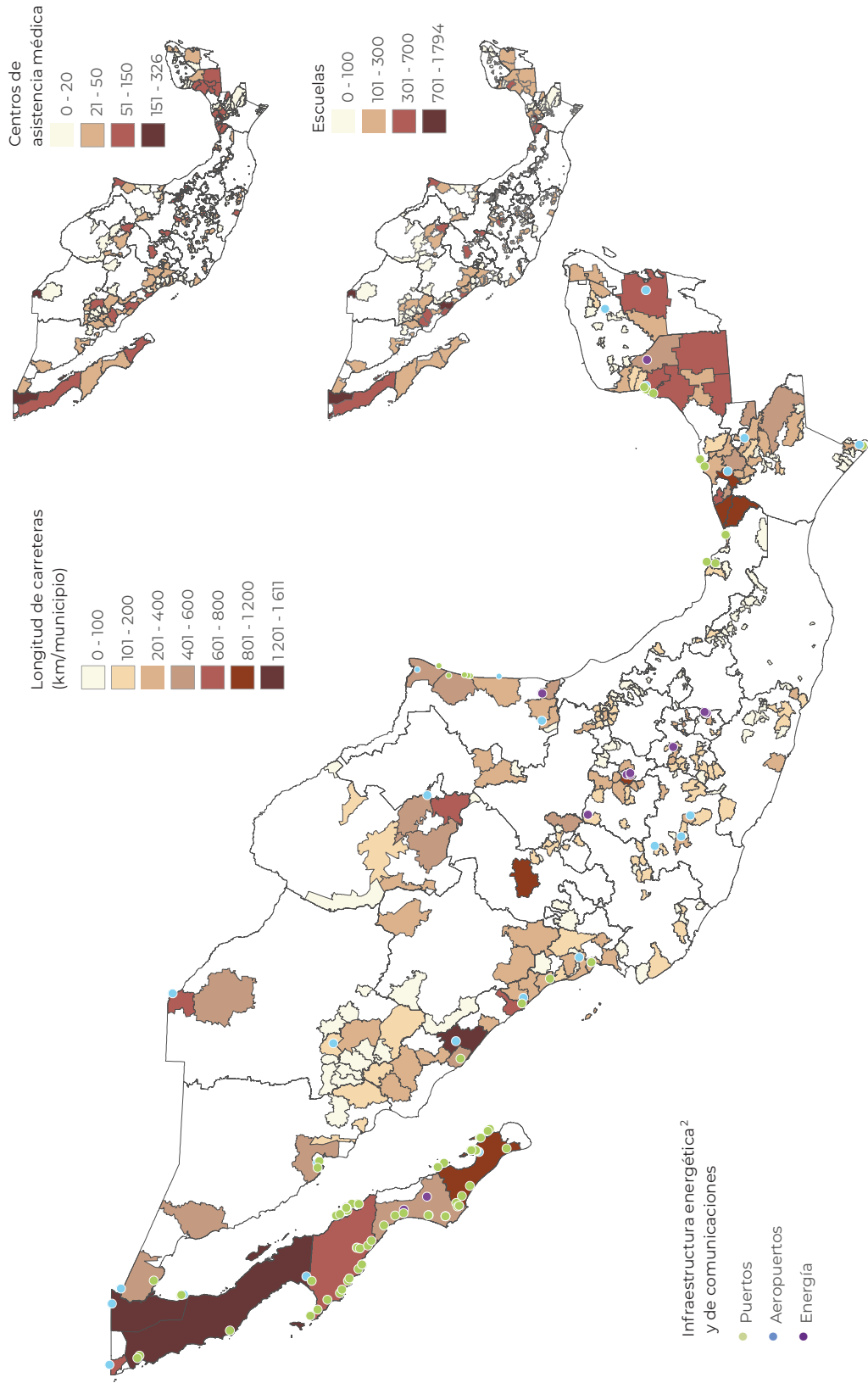
En el caso de los aeropuertos, en 2018 un total de 27 se encuentran dentro de los municipios más vulnerables, esto es, el 18% del total nacional, y de los cuales ocho son para tráfico nacional y los restantes 19 tanto para tráfico nacional como internacional (Figura 5.46). En el caso de los puertos, siete instalaciones importantes de la Administración Portuaria Integral (Federal-SCT) también están en las costas de los municipios más vulnerables: Ensenada, en Baja California; Mazatlán, en Sinaloa; Puerto Vallarta, en Jalisco; Altamira y Tampico, en Tamaulipas; y Coatzacoalcos, en Veracruz. En el caso de escuelas y centros de asistencia médica, en estos municipios se registraban hasta 2018 un total de 37 670 y 7 787 unidades, respectivamente. Finalmente, con respecto a la infraestructura energética, en los municipios más vulnerables existen 45 centrales de generación de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y siete refinerías y trece centrales de procesamiento de gas, ambas de Petróleos Mexicanos (PEMEX), entre otras instalaciones (Figura 5.46).

El incremento del nivel del mar podría afectar los ambientes costeros causando inundaciones, pérdida de humedales, erosión, intrusión de agua salada en los acuíferos y aumento en los niveles freáticos. Un estudio sobre la vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el incremento del nivel del mar, realizó proyecciones de las afectaciones en México bajo tres escenarios de incremento del nivel: 0.6, 1 y 2 metros (INE, Semarnat y UNAM, 2008). En caso de un incremento de 2 metros, la superficie nacional afectada podría alcanzar 29 623 kilómetros cuadrados, siendo Campeche, Sinaloa y Quintana Roo los estados más afectados en términos absolutos (Mapa 5.5). En términos relativos, Tabasco sería el más afectado (14% de su superficie sería cubierta por el mar), seguido por Quintana Roo (11.9%), Campeche (9.5%) y Sinaloa (8.9%). En el caso del menor incremento del nivel del mar (0.6 m), los estados más afectados serían Tabasco (21.2% de su superficie), Campeche (13.3%) y Sinaloa (9.5%).

Los recursos hídricos del país también podrían ser fuertemente impactados por el cambio climático. Un estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) evaluó la variación de la disponibilidad de agua en el país, concluyendo que dado que la cantidad y la calidad del agua actualmente son vulnerables, en condiciones de cambio climático la vulnerabilidad crecerá, siendo las regiones hidrológico-administrativas más afectadas la Noroeste y Río Bravo, seguidas de Cuencas Centrales del Norte, Baja California y Valle de México (Leal Ascencio *et al.*, 2008).



**Figura 5.46** Infraestructura vulnerable al cambio climático, 2018<sup>1</sup>



**Notas:**

<sup>1</sup> Datos hasta agosto de 2018.

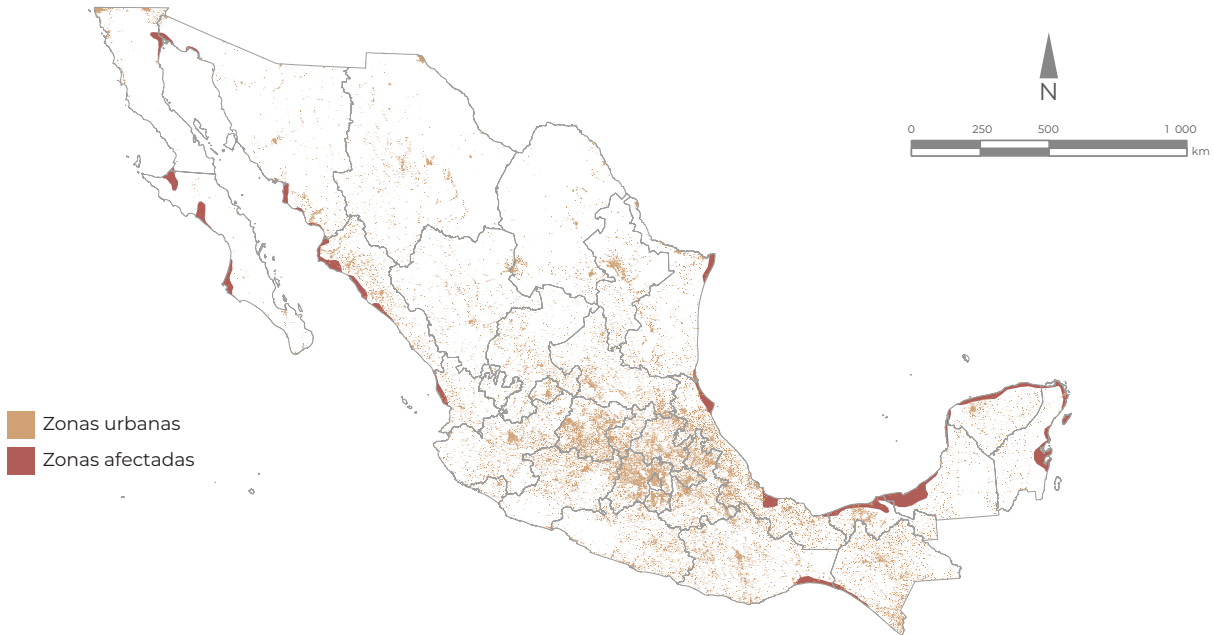
<sup>2</sup> Energía incluye: terminales marítimas de PEMEX, refinerías, complejos procesadores de gas PEMEX, terminales de distribución de gas licuado PEMEX, terminales de almacenamiento y reparto, y centrales de generación de electricidad de CFE.

**Fuentes:**

Dirección General de Políticas de Cambio Climático, INECC, México, Julio de 2016.  
 INEGI, SCT e IMT, *Red Nacional de Carreteras (RED)*, escala 1:50 000, INEGI, SCT e IMT, México, 2018.  
 INEGI, *Marco Geostatístico Nacional 2018*, INEGI, México, 2018.

Los posibles impactos del cambio climático sobre los sistemas y sectores productivos en México son diversos y se basan en escenarios futuros contruidos en un contexto de incertidumbre. La Tabla 5.2 presenta un análisis con ejemplos de los impactos de este fenómeno global en algunos sectores en México.

### Mapa 5.5 Escenario de incremento del nivel del mar de dos metros para México



**Fuente:**

The University of Arizona, Geosciences, Earth Climate and Ecosystems. *Sea level: Mapping Areas Potentially Impacted by Sea Level Rise*. Disponible en: [www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate\\_change\\_and\\_sea\\_level/mapping\\_slr/mapping\\_slr.htm](http://www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate_change_and_sea_level/mapping_slr/mapping_slr.htm). Fecha de consulta: junio de 2016.

## ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

En la medida en que las políticas y estrategias globales y nacionales sean adecuadas y exitosas, la mitigación de las emisiones podría redundar en cambios menos severos en el clima y en una mayor y mejor capacidad para enfrentar los efectos del cambio climático. Por ello, este problema se ha convertido en uno de los desafíos más importantes y urgentes para atender por la comunidad internacional.

En 1992, en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, se adoptó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida las interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. México firmó y ratificó este acuerdo en 1992 y 1993, respectivamente (UNEP, 2002; PEF, 2009). Hoy en día 197 países forman partes de la Convención.

**Tabla 5.2** Posibles impactos del cambio climático en sistemas y sectores estratégicos en México

<i>Sistema o sectores</i>	<i>Impactos proyectados<sup>1</sup></i>	<i>Grado de impacto<sup>2</sup></i>	<i>Nivel de Confianza<sup>3</sup></i>
Agricultura	Disminución de la productividad del maíz para la década de 2050, lo que se suma al problema actual del 25% de las unidades de producción con pérdida en la fertilidad de suelos. Existe cierta evidencia de que la mayoría de los cultivos resultarán menos adecuados para la producción en México hacia 2030, empeorando esta situación para finales del presente siglo.	Bajo	1
	La mayor parte del país se volverá más seca y las sequías más frecuentes, con el consecuente aumento de demanda de agua particularmente en el norte del país y en zonas urbanas.	Medio	2
Hídrico	En algunas regiones la precipitación podría ser más intensa y frecuente incrementando el riesgo de inundaciones para alrededor de 2 millones de personas que actualmente se encuentran en situación de moderada a alta vulnerabilidad, ante las inundaciones, y quienes residen en localidades menores a 5 mil habitantes, ubicadas principalmente en la parte baja de las cuencas, sumado al riesgo de deslizamiento de laderas por lluvia.	Medio	3
Costero	El aumento del nivel del mar constituye un peligro para los sectores residencial y de infraestructura asentados en zonas costeras. Por otro lado, los sectores hídrico y agrícola podrían verse afectados por efecto de la intrusión salina.	Bajo	2
Tormentas y clima severo	"Hay consenso sobre la intensidad de los ciclones en el noroeste del Pacífico y en el Atlántico norte. Sin embargo, las incertidumbres en cuanto a los cambios y la intensidad complican estimar sus impactos en el país. Se prevé que a mayor número e intensidad de tormentas, los impactos podrían tener mayores consecuencias sociales y económicas".	Alto	2
Ecosistemas y biodiversidad	En ecosistemas terrestres un ejemplo del impacto del cambio climático es la posible reducción del área cubierta por bosques de coníferas, especies de zonas áridas, semiáridas y especies forestales de zonas templadas. En el caso de los océanos, un aumento en la temperatura puede ocasionar un colapso demográfico en las poblaciones marinas, ocasionando baja productividad para las pesquerías. Para el caso de mamíferos terrestres y voladores se proyecta al 2050, una reducción de cerca de la mitad de las especies estudiadas perdiendo más del 80% de su rango de distribución histórica.	Medio	2
Infraestructura estratégica	Es importante fortalecer la investigación sobre el impacto del cambio climático en infraestructura turística, portuaria, de energía y de comunicaciones y transportes, la cual puede verse afectada por el aumento en el número e intensidad de ciclones tropicales y mareas de tormenta más intensas.		

**Notas:**

<sup>1</sup> Los impactos proyectados se estimaron considerando un escenario de incremento de temperatura entre 2.5 y 4.5 °C y una disminución en la precipitación de entre -5 y 10%.

<sup>2</sup> El grado de impacto es una medida subjetiva basada en el juicio de expertos. Considera la magnitud del impacto proyectado, la vulnerabilidad y la capacidad para hacerle frente.

<sup>3</sup> El nivel de confianza tiene una escala del 1 al 5, siendo 1 el nivel más bajo y 5 el de mayor confiabilidad. También es una medida subjetiva basada en el juicio de expertos. Se considera que los trabajos arbitrados más actuales tienen un nivel de confianza mayor. Los factores que se consideran son el acuerdo entre los modelos climáticos, la calidad de datos e información utilizada para la investigación y el consenso entre los estudios sólidos disponibles para esta región.

**Fuente:**

Semarnat. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC). Semarnat. México. 2014.

Como instrumento de la Convención surgió en 1997 el Protocolo de Kioto, que estableció como obligación para los países desarrollados y las economías en transición (países Anexo I) la reducción del 5% de sus emisiones para el periodo 2008-2012 tomando como base sus emisiones de 1990. Para los países en desarrollo (países No Anexo I), el Protocolo no estableció metas cuantificables de reducción de emisiones, pero sí compromisos como la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, comunicaciones nacionales, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático. México firmó este Protocolo en 1997 y lo ratificó en 2000 como país No Anexo I (CICC, 2007).

Dado que el Protocolo contemplaba compromisos de reducción para el periodo 2008-2012, se realizaron negociaciones para darle continuidad, habiéndose aceptado en la COP17 de Durban, en Sudáfrica, en 2011, un nuevo proceso de negociación para que a partir de 2012 los países Partes comenzaran a elaborar un nuevo protocolo o acuerdo con fuerza legal que incluyera a todas las Partes. En 2012 en la COP18 celebrada en Doha, Qatar, se aprobó una Enmienda al Protocolo de Kioto, que formaliza la entrada en vigor del segundo periodo de compromisos desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020. Los países o Partes incluidas en el Anexo I del Protocolo y que adquirieron compromisos para el segundo período acordaron reducir sus emisiones globales al menos un 18% por debajo de los niveles de 1990 durante dicho periodo.

En noviembre de 2015 se realizó en París, Francia, la vigésimo primera Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21/CMP11). Su objetivo principal fue lograr un acuerdo universal y vinculante sobre el clima que permita mantener el calentamiento global por debajo de los 2 °C e impulse la transición de los países hacia sociedades y economías más resilientes y bajas en carbono. El 22 de abril de 2016, en la celebración del Día de la Tierra, 175 líderes mundiales firmaron el Acuerdo de París en la sede de las Naciones Unidas en Nueva York, el cual entró en vigor el 4 de noviembre de ese mismo año. Hoy día 184 países forman parte de este Acuerdo.

Uno de los elementos más importantes del Acuerdo de París son las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), las cuales incluyen los esfuerzos de los países para reducir sus emisiones y adaptarse a los efectos del cambio climático. El cumplimiento de los NDC será determinante para lograr las metas del Acuerdo de París de alcanzar el nivel máximo de emisiones lo más pronto posible y empezar entonces un rápido descenso que permita lograr el balance entre las emisiones antropogénicas y la captura en los sumideros durante la segunda mitad del presente siglo (UNCFCC, 2018).

Sin embargo, a dos años de la entrada en vigor del Acuerdo de París, y con base en la evidencia que muestra el incremento de las emisiones de GEI globales en 2017, parece claro que los compromisos nacionales adquiridos a través de los NDC

podrían ser insuficientes para cumplir la meta de los 2 °C (UN-Environment, 2018). Uno de los mensajes más importantes del Emissions Gap Report 2018 es que aunque es “...técnicamente posible asegurar que el calentamiento global permanezca por debajo de los 2 °C y 1.5 °C, si los países no escalan sus ambiciones antes de 2030 no será posible evitar exceder la meta de los 1.5 °C” (UN-Environment, 2018).

### **Esfuerzos nacionales contra el cambio climático**

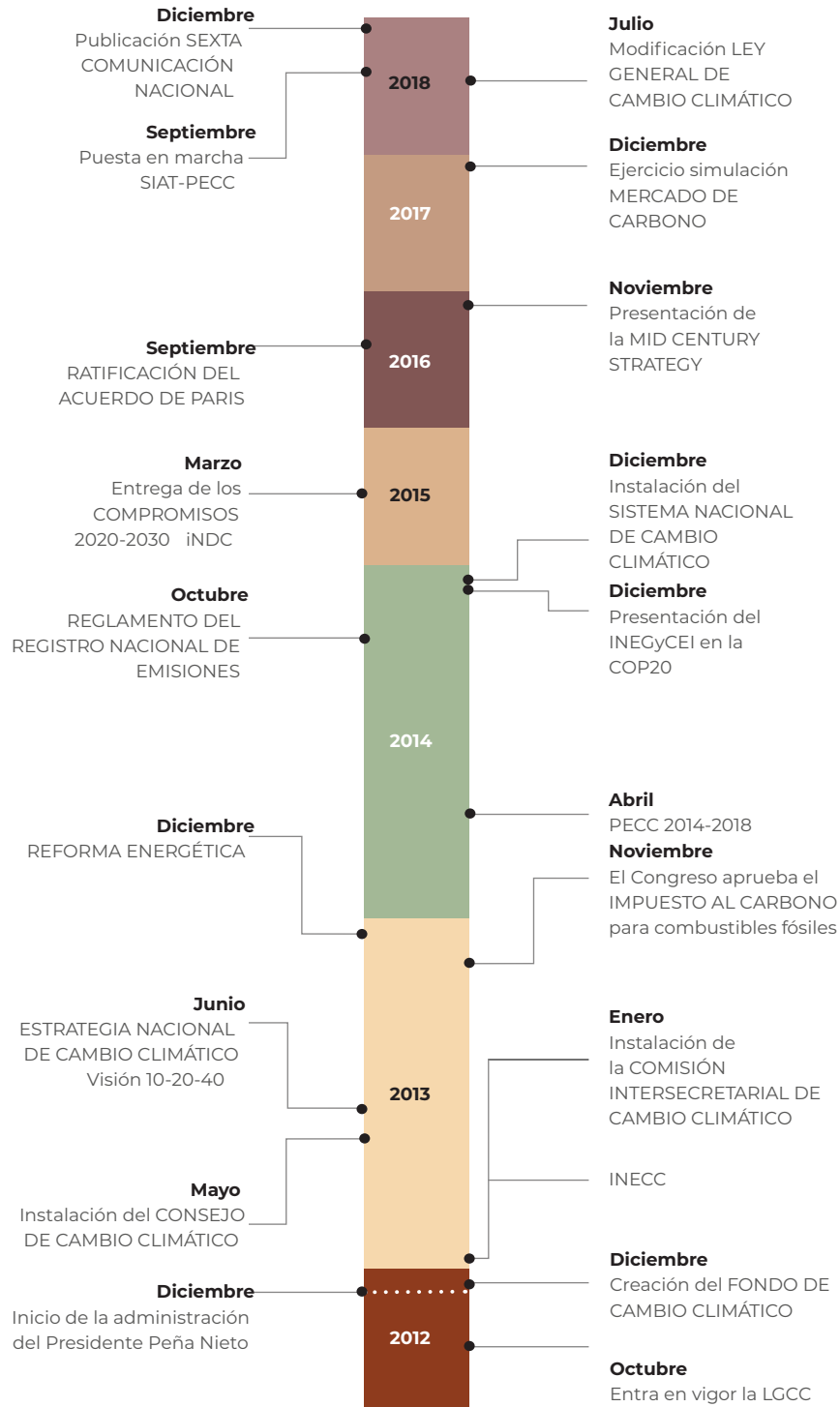
México considera el cambio climático como un asunto de seguridad nacional y por ello se ha preocupado desde hace varios años por impulsar medidas de mitigación y adaptación a este fenómeno global. En diciembre de 2016, el Senado mexicano ratificó el Acuerdo de París, con lo que México se ha comprometido a descarbonizar su economía durante la segunda mitad del siglo y a aumentar su resiliencia al cambio climático.

Algunos de los hitos en años recientes al respecto se muestran en la Figura 5.47. Como parte de estas acciones y en materia de instrumentos de política pública sobre el tema, destaca la publicación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que coloca a nuestro país como uno de los primeros, junto con el Reino Unido, en contar con una legislación a nivel nacional sobre el tema. La LGCC tiene como objetivo establecer un marco jurídico que regule las políticas públicas de adaptación y mitigación al cambio climático, así como impulsar la transición hacia una economía competitiva de bajas emisiones de carbono (DOF, 2012a).

Como parte de la instrumentación de la LGCC, en el año 2013 se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 (ENCC; Semarnat, 2013a), la cual es el instrumento rector y orientador de la política nacional en la materia, además de que define una ruta a largo plazo y establece las prioridades nacionales de atención para combatir el cambio climático en materia de adaptación y mitigación. La ENCC está integrada por tres ejes estratégicos en materia de adaptación y cinco en materia de mitigación. La Estrategia planteó como reto para el país reducir 30% las emisiones en 2020 y 50% en 2050 con respecto a las emisiones del año 2000.

Las estrategias, líneas de acción y reducciones de emisiones específicas por sector, así como las acciones de adaptación que ha realizado la administración pública federal están incluidas dentro del Programa Especial de Cambio Climático (PECC), cuya elaboración emana directamente del mandato de la LGCC. El PECC 2014-2018 se compone de cinco objetivos que incluyen 77 líneas de acción en materia de adaptación, 81 de mitigación y 41 líneas para la construcción de política en la materia. Dichas líneas están alineadas al Programa Nacional de Desarrollo, a los programas transversales del Gobierno Federal y a los programas sectoriales de las Secretarías de Estado que conforman la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). En lo que respecta a la mitigación de las emisiones nacionales, el PECC se planteó como meta al 2020 reducir las emisiones de GEI en 30% en referencia al año base. Con respecto a la adaptación, su intención principal ha sido reducir la vulnerabilidad de la población y sectores productivos, así como

**Figura 5.47** Hitos recientes de la estrategia nacional ára el combate al cambio climático, 2012 - 2018.



**Fuente:**  
 Modificado de:  
 Semarnat. *Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030*. Semarnat, México, 2015.  
 Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat, México, 2018.

incrementar la resiliencia y resistencia de la infraestructura estratégica, así como conservar, restaurar y manejar sustentablemente los ecosistemas garantizando sus servicios ambientales (Gobierno de la República, 2014).

En materia internacional, en marzo de 2015 México presentó su Contribución Prevista y Determinada a nivel Nacional para el periodo 2020-2030 (NDC), siendo el primer país en vías de desarrollo en presentarla ante la CMNUCC y el cuarto a nivel global, después de la Unión Europea, Suiza y Noruega. Los compromisos que asume México, tanto de mitigación como de adaptación, contemplan dos tipos de medidas: no condicionadas y condicionadas. Las primeras se refieren a las que el país solventa con recursos propios, mientras que las condicionadas son aquellas que pueden realizarse si el país obtiene recursos adicionales y la transferencia de tecnología disponibles mediante cooperación internacional. La meta de mitigación a 2030 pretende la reducción del 22% de las emisiones de GEI y 51% de carbono negro. Se prevé que al 2024 se genere el 35% de energía limpia<sup>41</sup> y al 2030 el 43%.

En lo referente a adaptación, algunas de las metas más importantes planteadas son: reducir en 50% el número de municipios vulnerables (160 municipios); alcanzar en el 2030 una tasa cero de deforestación e instalar sistemas de alerta temprana y gestión de riesgo en los tres niveles de gobierno (Gobierno de la República, 2015). En la Tabla 5.3 se describen en general algunas de las estrategias implementadas por México más relevantes en materia de cambio climático.

A nivel local, hasta junio de 2017, 19 estados habían concluido su Programa Estatal de Cambio Climático, 21 contaban con su Ley Estatal de Cambio Climático y 25 tenían su Inventario Estatal de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Mapas 5.6 a 5.8; INECC-Semarnat, 2018). En el caso de los Programas Estatales de Cambio Climático, en su elaboración se consideran las características socioeconómicas y ambientales, las metas de los planes de desarrollo estatal; el inventario estatal de emisiones de GEI; los escenarios de emisiones y potenciales de mitigación; así como el diagnóstico de vulnerabilidad actual y futura con un enfoque regional, considerando tanto las condiciones actuales como las condiciones futuras resultado del análisis de los escenarios de cambio climático. Estos programas son instrumentos de apoyo para el diseño de políticas públicas y acciones en materia de cambio climático y plantean acciones y medidas para reducir las emisiones de GEI y la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de adaptación de los sectores o sistemas que los estados identifiquen como prioritarios.

A la fecha no se cuenta con un estudio actualizado sobre los costos económicos del cambio climático en México. Sin embargo, un estudio publicado en 2009 indicó que los "...costos económicos de los impactos climáticos al 2100 serán al menos tres veces superiores que los costos de mitigación de 50% de nuestras emisiones. Por ejemplo, en uno de los escenarios considerados, con tasa de descuento del 4% anual, se estimó que los impactos climáticos alcanzan, en promedio, el 6.22% del PIB actual

---

<sup>41</sup> Incluye energía renovable, cogeneración con gas natural y termoeléctricas con captura de CO<sub>2</sub>.

mientras que los costos de mitigación del 50% de las emisiones representarían el 0.7 y 2.21% del PIB, a 10 y 30 dólares la tonelada de carbono, respectivamente” (Semarnat y SHCP, 2009). Lo que si no hay duda es que los costos de la inacción ante este problema a escala nacional y posiblemente también a escala planetaria serán más elevados que los que se requerirían para la mitigación de las emisiones.

**Tabla 5.3** Estrategias y políticas adoptadas por México en materia de cambio climático

Estrategia/Política	Observaciones
Contribución Prevista y Determinada a nivel Nacional para el periodo 2020-2030 (iNDC; Intended Nationally Determined Contribution)	En marzo de 2015 México presentó su iNDC, donde establece compromisos voluntarios y no condicionados apegados a los objetivos, instrucciones y prioridades establecidas en la Ley General de Cambio Climático, así como con los acuerdos asumidos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. La meta de mitigación a 2030 consiste en la reducción del 22% de las emisiones de GEI. En lo referente a adaptación, se plantearon como metas: reducir en 50% el número de municipios vulnerables (160 municipios); alcanzar en el 2030 una tasa 0% de deforestación e instalar sistemas de alerta temprana y gestión de riesgo en los tres niveles de gobierno.
Ley General de Cambio Climático	En junio de 2012 se publicó el decreto de esta ley que busca entre otras cosas regular las emisiones de gases de efecto invernadero; regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático; reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas y promover una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.
Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) Visión 10-20-40	Publicada en 2013, "...es el instrumento rector de la política nacional en el mediano y largo plazos para enfrentar los efectos del cambio climático y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono".
Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC)	Se instaló en diciembre de 2015 para lograr la coordinación efectiva de los distintos órdenes de gobierno y la concertación entre los sectores público, privado y social. La LGCC prevé la integración del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC).
Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC)	El PECC incluye medidas que reducirán la emisión de gases de efecto invernadero y mejorarán nuestra capacidad de respuesta ante fenómenos ambientales.
La Economía del Cambio Climático en México	Publicado en el 2009, este estudio estima los costos económicos que el cambio climático antropogénico podría generar para nuestro país.
Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	México ha asumido el compromiso internacional de presentar Comunicaciones Nacionales y es el único país en desarrollo que ha presentado su Quinta Comunicación Nacional (2012). Actualmente se prepara la Sexta Comunicación Nacional, la cual se publicará en junio de 2017.
Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	El último inventario (2013) incluye las emisiones antropogénicas por fuente y sumidero de todos los gases de efecto invernadero.
Programa GEI México	Es un programa nacional voluntario de contabilidad y reporte de GEI y de proyectos de reducción de emisiones.
Comisión Intersecretarial de Cambio Climático	La Comisión se creó en 2005 y tiene como atribución principal coordinar la planeación e integración sectorial de las políticas nacionales en materia de cambio climático.



## Tabla 5.3 Continuación...

Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero	Se creó en 2004 y funciona como Grupo de Trabajo de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático con la atribución de identificar oportunidades, así como facilitar y aprobar la realización de proyectos de reducción de emisiones y captura de gases de efecto invernadero en México.
Impulso a la eficiencia y tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica	Para reducir las emisiones de GEI, combatir los efectos del cambio climático y contribuir a disminuir sus posibles efectos en el mediano y largo plazos, el Gobierno Federal ha puesto en práctica acciones orientadas a fomentar el uso de las energías renovables, disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, y generar ahorros y un óptimo aprovechamiento de la energía para el país.
Promoción al uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte	Eficiencia Energética en la Administración Pública Federal. Promueve el aprovechamiento sustentable de la energía y establece un proceso de mejora continua para fomentar la eficiencia energética en dependencias y entidades del Gobierno Federal. Desarrollo de vivienda sustentable. La Comisión Nacional de Vivienda otorga hipotecas verdes a viviendas de interés social equipadas con ecotecnologías para reducir sus emisiones bióxido de carbono.
Programas de adaptación al cambio climático	Existe una gran cantidad de programas, estudios e iniciativas para una adecuada adaptación al cambio climático a nivel nacional, sectorial, estatal, local y regional. A continuación y sólo con el fin de ejemplificar se enlistan algunos de ellos: Escenarios de cambio climático para México, Programa de modelación del clima: vulnerabilidad y adaptación en el sector agua; Vulnerabilidad del sector energía; Atlas Nacional de Vulnerabilidad y, Programas Estatales de Acción frente al Cambio Climático.
Programas de comunicación y difusión del cambio climático	Programas de difusión y participación en actividades internacionales e integración del tema en políticas nacionales. Por ejemplo: Centro Nacional de Observación Climática de Gran Altitud; Participación en el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático, entre otros. Existen también diversas publicaciones, tanto técnicas como de difusión al público en general, disponibles en las páginas electrónicas de la Semarnat e INECC.

### Nota:

Para ampliar la información sobre las medidas, programas e iniciativas aquí mencionadas se recomienda visitar la página electrónica de la Semarnat y otras dependencias involucradas. En particular se recomienda visitar la página del INECC, disponible en : [www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)

### Fuente:

Dirección de Modelos Sectoriales de Desarrollo Bajo en Carbono. INECC, Semarnat. México. 2015.  
 Dirección General Adjunta para Proyectos de Cambio Climático. Semarnat. México. 2012.  
 Gobierno de la República. *Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40*. Gobierno de la República. México. 2013.  
 Semarnat. *Acciones de México*. Semarnat. México. 2010. Disponible en: [www.cambioclimatico.gob.mx](http://www.cambioclimatico.gob.mx). Fecha de consulta: marzo de 2012.  
 Semarnat, CCE, CESPEDS, WRI y WBCSD. *Programa GEI México*. Semarnat. México. Disponible en: [www.geimexico.org](http://www.geimexico.org). Fecha de consulta: septiembre de 2013.

## OZONO

Desde mediados de los años setenta<sup>42</sup> se descubrió que ciertas sustancias producidas por el hombre, empleadas comúnmente en los sistemas de aire acondicionado, refrigeración y en la fabricación de solventes y aerosoles, entre otros usos, destruían las moléculas de ozono. Estas sustancias, conocidas como sustancias que agotan la capa de ozono (SAO),<sup>43</sup> además de ser emitidas por las

<sup>42</sup> Sherwood Rowland y Mario Molina postularon en 1974 que cuando los clorofluorocarbonos llegan a la estratosfera, la radiación ultravioleta del Sol provoca que estas sustancias se descompongan, liberando átomos de cloro. Una vez liberados, estos átomos inician una cadena de reacciones que destruyen cantidades importantes de ozono en la estratosfera: un átomo de cloro o bromo puede destruir hasta cien mil moléculas de ozono (WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012).

<sup>43</sup> Además de las SAO, existen otros factores que influyen en la destrucción del ozono: la temperatura en la estratosfera, la actividad solar y la concentración atmosférica de gases como el metano, vapor de agua y el óxido nítrico (Weatherhead y Andersen, 2006).

**Mapa 5.6** Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático publicados, 2018



**Fuente:**  
Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat. México, 2018.

**Mapa 5.7** Inventarios Estatales de Emisiones de Gases de efecto Invernadero elaborados, 2015



**Fuente:**  
Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat. México, 2018.

actividades humanas existen de manera natural en la atmósfera. Entre las más conocidas están los clorofluorocarbonos (CFC), aunque también destacan los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), halones, bromuro de metilo (BM), tetracloruro de carbono (TET) y metilcloroformo (MCF).

**Mapa 5.8** Leyes de Cambio Climático publicadas, 2015



**Fuente:**  
Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat, México, 2018.

En la década de los ochenta se comprobó<sup>44</sup> que, como resultado de la prolongada emisión de las SAO a la atmósfera, se había formado el llamado “agujero de ozono” sobre Antártica (UNEP, 2012b; Laube *et al.*, 2014). La importancia de la existencia de este fenómeno radica en que la disminución del nivel de ozono estratosférico reduce la protección que brinda la capa de ozono de los rayos ultravioleta<sup>45</sup> provenientes del Sol.

La preocupación respecto al adelgazamiento de la capa de ozono y el conocimiento que se tenía sobre el efecto de las SAO impulsaron a la comunidad internacional a tomar medidas para controlar el problema. En 1987 se adoptó a nivel internacional el Protocolo de Montreal sobre Sustancias que Degradan la Capa de Ozono, el cual constituye uno de los mejores ejemplos de acuerdos multilaterales exitosos debido a la amplia respuesta y compromiso internacional (ver en este capítulo la sección Acuerdos y acciones para la protección de la capa de ozono).

<sup>44</sup> Con base en registros de concentración de ozono en Antártica, los científicos Joseph Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin descubrieron que en esa zona ocurre un adelgazamiento importante de la capa de ozono, fenómeno conocido actualmente como “agujero de ozono” (The Ozone Hole, 2015).

<sup>45</sup> Los rayos UV-A son los menos nocivos y llegan en menor cantidad a la superficie terrestre. Los UV-C son altamente energéticos y los más dañinos; sin embargo, la capa de ozono impide su paso. Por último, la radiación UV-B es también muy dañina, pero es retenida en gran parte por la capa de ozono; no obstante, de esta última radiación, una pequeña proporción alcanza la superficie y puede causar daños a células y tejidos.

Esta sección recopila datos importantes sobre los avances en la reducción del consumo global y nacional de las SAO, así como detalles respecto a los compromisos y acciones que se han encaminado para la protección y recuperación de la capa de ozono.

## EL AGUJERO DE OZONO

Aun cuando el consumo y la emisión de las SAO ocurren a nivel global, el agujero en la capa de ozono se ha registrado tan solo en Antártica durante el mes de octubre de cada año.<sup>46</sup> Su localización se debe a que gran parte de las SAO generadas se transporta hacia los polos por las corrientes atmosféricas. En particular, en el Polo Sur existen condiciones atmosféricas que desencadenan las reacciones químicas en las que las SAO se descomponen químicamente en gases reactivos que destruyen las moléculas del ozono estratosférico (PNUMA, 2002, PNUMA y GEO-ALC, 2003; WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012b; Manney *et al.*, 2011).

La existencia del agujero de ozono no implica la ausencia total de este gas en una región de la atmósfera en particular, sino que en realidad se refiere a una disminución importante en su concentración. Se considera que se ha formado el agujero cuando la concentración de ozono es menor a 220 unidades Dobson (UD)<sup>47</sup> la cual es menor al promedio global, que se ha estimado en alrededor de 300 UD.

Los registros históricos de concentración de ozono indican que la extensión del agujero ha variado desde unos cuantos millones de kilómetros cuadrados a finales de los años 70, hasta su tamaño récord en el año 2000, cuando alcanzó los 29.9 millones de kilómetros cuadrados. En 2017, el tamaño máximo fue de 28.2 millones de kilómetros cuadrados, lo que equivale a 1.3 veces la superficie de Antártica (Figura 5.48; NASA, 2015); esta superficie es 34% menor a la observada en el año 2000.

## CONCENTRACIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO

La Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América (NASA, por sus siglas en inglés) monitorea las concentraciones de ozono estratosférico a nivel global. Para el caso de México, existe información para zonas urbanas importantes como Guadalajara y la Ciudad de México, en las cuales no se observan variaciones relevantes en la concentración de ozono estratosférico entre los años 1979 y 2015 (Figura 5.49). Los valores registrados a nivel global y en México contrastan con los encontrados desde principios de los años ochenta en Antártica (IB 1.3-3). En esa región del hemisferio sur se mantuvo una tendencia decreciente

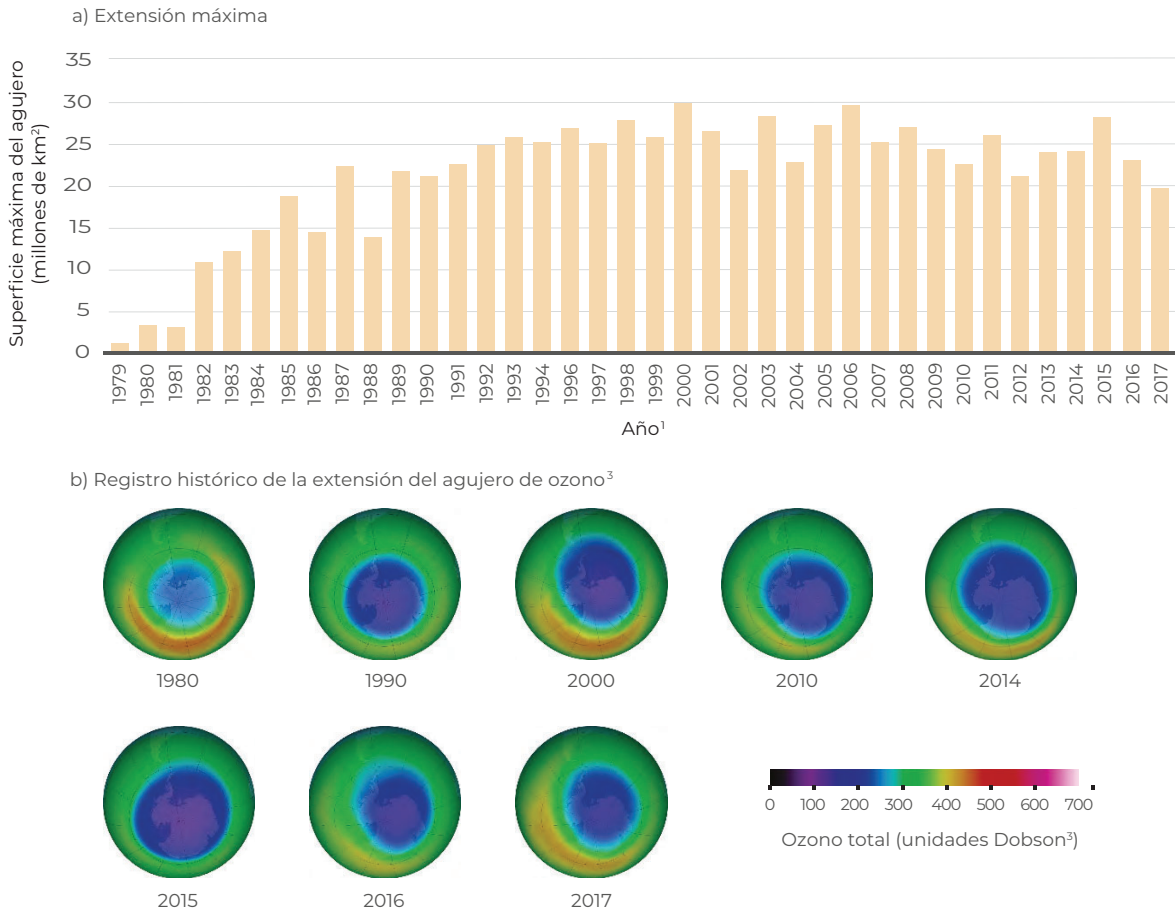
---

<sup>46</sup> Generalmente, el agujero de ozono se ha observado exclusivamente en la Antártica, pero en 2011 se registró por primera vez una reducción importante de la concentración de ozono en el Ártico. Las bajas temperaturas registradas entre septiembre del 2010 y marzo del 2011 provocaron la destrucción del 70% de las moléculas de ozono entre los 18 y 20 kilómetros de altitud (Manney *et al.*, 2011). No obstante, debido a que la concentración de ozono se mantuvo por arriba de las 220 UD, no se consideró como un agujero propiamente (NASA, 2014).

<sup>47</sup> Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a un milímetro de grosor de la capa de ozono, a nivel del mar y a 0 °C, y es la medida para expresar el grosor de la capa (PNUMA, 2003; UNEP, 2012).

en la concentración hasta 1999, a partir del cual ha oscilado alrededor de las 150 y 200 UD, pero siempre por debajo de la concentración global. Esta diferencia en las concentraciones apoya el planteamiento de que la destrucción de la capa de ozono es un problema global pero con claros impactos regionales.

**Figura 5.48** Extensión del agujero de ozono



**Notas:**

<sup>1</sup> Superficie máxima del agujero registrada anualmente entre el 7 de septiembre y el 16 de octubre. septiembre y octubre son considerados los meses en los que se abre el agujero de ozono.

<sup>2</sup> No hay datos disponibles para el año 1995.

<sup>3</sup> Corresponden a las concentraciones de ozono registradas en octubre.

<sup>4</sup> Una unidad Dobson es una medida empleada para estimar el grosor de la capa de ozono a 0 °C y a una presión de 1 013 hectopascales (nivel del mar).

**Fuente:**

NASA. *Ozone Hole Watch. Annual Records. 2017*. NASA. Disponible en: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annualdata.html>. Fecha de consulta: mayo de 2018.

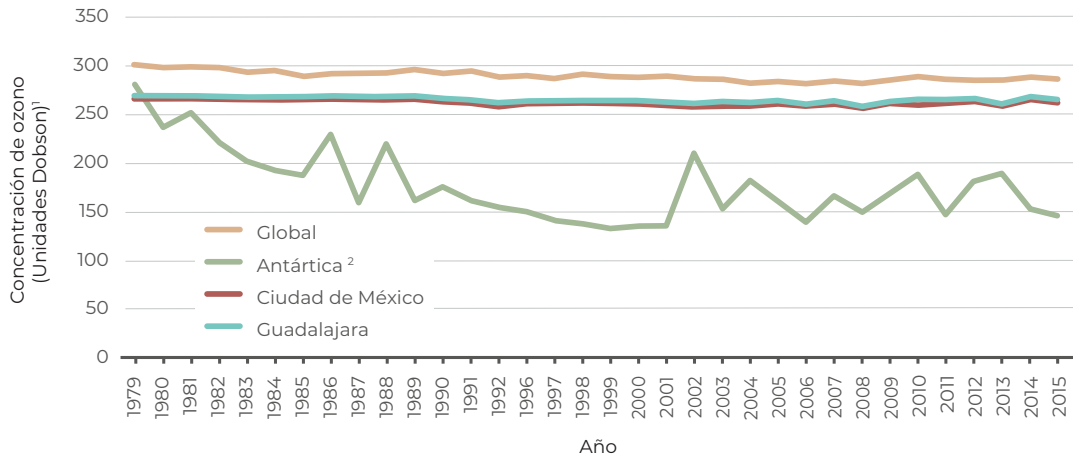
## CONSUMO Y CONCENTRACIÓN DE SUSTANCIAS AGOTADORAS DEL OZONO (SAO)

Cada una de las SAO impacta de distinta forma la capa de ozono, esto debido al poder de cada una para destruir las moléculas de ozono, a dicha capacidad se le llama potencial de agotamiento del ozono.<sup>48</sup> Por tal motivo, los valores de consumo

<sup>48</sup> El potencial de agotamiento del ozono (PAO) de cada sustancia se asigna usando como referencia al CFC-11 que tiene un valor igual a 1.

de estas sustancias deben ajustarse ponderándolos por dicho potencial; en su cálculo se consideran tanto la producción nacional como las importaciones y las exportaciones (WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012b).

**Figura 5.49** Concentración de ozono estratosférico: global, sobre Antártica y sobre dos ciudades mexicanas, 1979 - 2015



**Notas:**

- <sup>1</sup> Una unidad Dobson es una medida empleada para estimar el grosor de la capa de ozono. Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a 1 milímetro de grosor de la capa de ozono a 0 °C y a una presión de 1 013 hectopascales (nivel del mar).
- <sup>2</sup> Para Antártica, los promedios anuales corresponden a las concentraciones de ozono registradas en octubre. Octubre es considerado el mes en el que se abre el agujero de ozono.
- <sup>3</sup> Datos no disponibles para el periodo 1993-1995.

**Fuentes:**

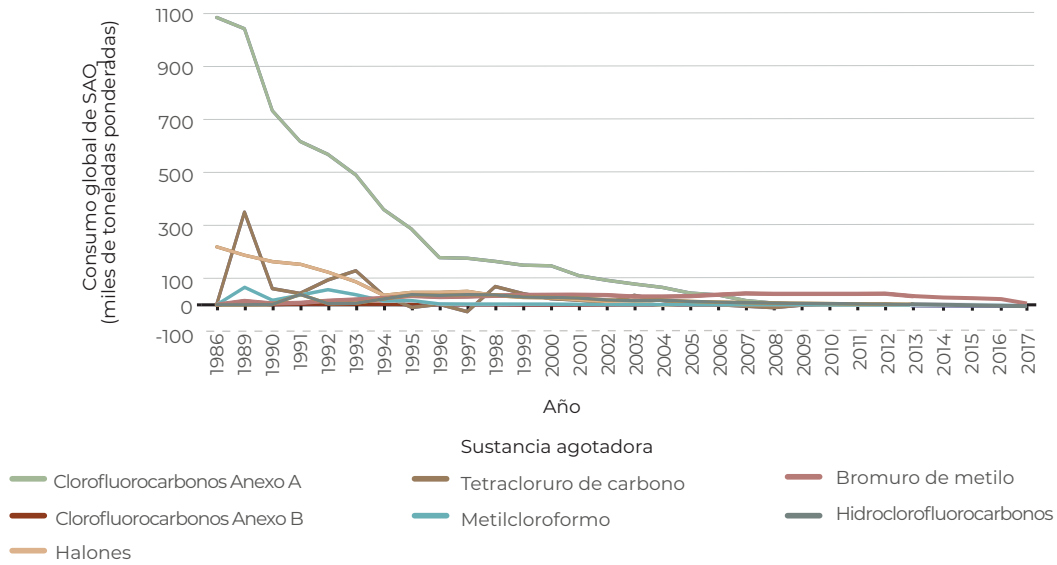
NASA. *Total Ozone Mapping Spectrometer*. NASA, 2003.  
 NASA. *Aura Validation Data Center*. NASA. Disponible en: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=677741240>. Fecha de consulta: agosto de 2016.  
 NASA. *Ozone Monitoring Instrument (OMI)*. NASA, 2014. Disponible en: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov>. Fecha de consulta: agosto de 2016.

El consumo global de SAO se redujo 99.8% entre 1986 y 2017 (Figura 5.50; IB 1.3-1). No obstante, aunque la concentración estratosférica de dichas sustancias muestra indicios de disminución, si se compara con los valores máximos registrados en la década de los noventa, la concentración no disminuye a la misma velocidad que se redujo el consumo (Figura 5.51; IB 1.3-4). Esto se debe a que las SAO tienen tiempos de vida atmosférica que van desde los cinco hasta los 100 años (WMO y UNEP, 2003).

La última evaluación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) sobre los logros obtenidos por el Protocolo de Montreal, afirma el decaimiento en la concentración atmosférica de las principales SAO. Dicha evaluación estima que el cumplimiento de las disposiciones del Protocolo permitirá que la capa de ozono recupere sus niveles anteriores a 1980 a mediados de este siglo y, en el caso de la superficie sobre Antártica, es posible que se refleje unos 15 años más tarde (PNUMA, 2014).

En nuestro país, el consumo de SAO es consistente con la tendencia global. El consumo total ponderado nacional de SAO disminuyó 98.6% entre 1989 y 2017 (pasó de 29 000 a 415 toneladas; Figura 5.52; IB 1.3-2; IC 8). Esta disminución se debe

**Figura 5.50** Consumo global ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1986 - 2017



**Nota:**

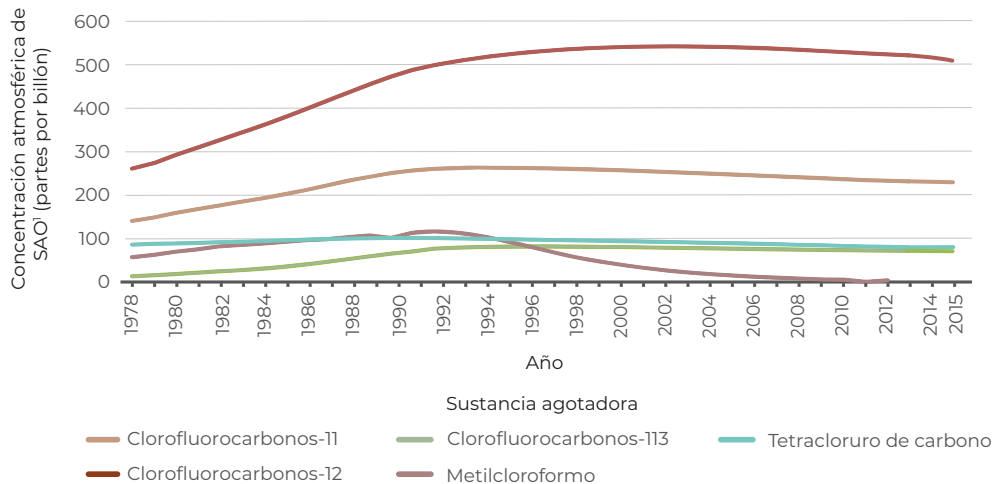
<sup>1</sup> El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor que la producción. El consumo neto es ponderado por el potencial de agotamiento de la capa de ozono que posee cada sustancia.

**Fuente:**

UNEP. Ozone Secretariat. Data Access Centre. UNEP. Disponible en: <http://ozone.unep.org/reporting/#notes>. Fecha de consulta: mayo de 2018.

principalmente a la eliminación del consumo de los CFC con mayor potencial de agotamiento y al incremento en el uso de sustancias alternativas como los HCFC con bajos potenciales de agotamiento.

**Figura 5.51** Concentración atmosférica de sustancias agotadoras del ozono, 1978 - 2015



**Nota:**

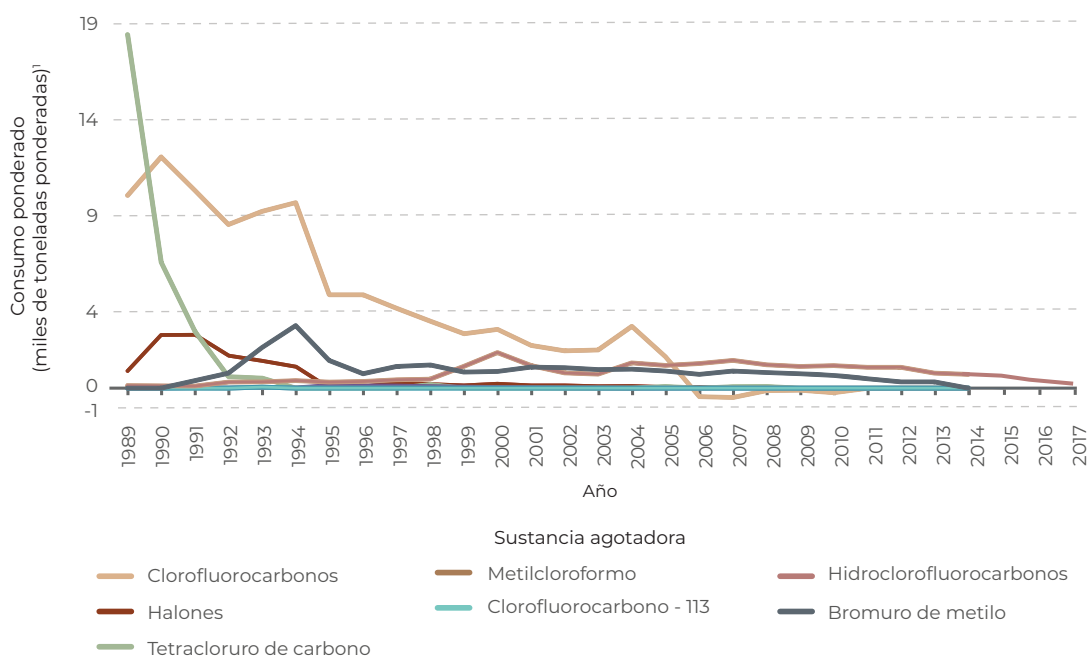
<sup>1</sup> Los datos de concentración corresponden a registros en el hemisferio sur.

**Fuentes:**

WRI. Earth Trends. Climate and Atmosphere Searchable Database. WRI. 2011.

CDIAC. Atmospheric Trace Gas Measurements. CDIAC. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/>. Fecha de consulta: agosto de 2016.

**Figura 5.52** Consumo nacional ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1989 - 2017



**Nota:**

<sup>1</sup> El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor a la producción. El consumo neto es ponderado por el potencial de agotamiento de la capa de ozono que posee cada sustancia.

**Fuente:**

Unidad de Protección a la Capa de Ozono, Semarnat. México. Abril de 2017.

## ACUERDOS Y ACCIONES PARA LA PROTECCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

El Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono es uno de los tratados más exitosos asumidos a nivel internacional. El Protocolo, adoptado en 1987 junto con su antecesora, la Convención de Viena sobre la Protección de la Capa de Ozono (1985) definieron estrategias para revertir el problema del adelgazamiento de la capa de ozono. El Protocolo establece compromisos para reducir el consumo y la producción de SAO con el fin de disminuir su concentración en la atmósfera (Tabla 5.4; UNEP, 2014).

La Convención de Viena y el Protocolo de Montreal se convirtieron en el año 2009 en los primeros tratados en la historia de las Naciones Unidas en lograr la ratificación universal (UNEP, 2014). México firmó estos tratados y adoptó las enmiendas de Londres (1991), Copenhague (1994), Montreal (2006) y Pekín (2007; UNEP, 2014). Se calcula que si el Protocolo no se hubiese implementado, la destrucción del ozono estratosférico podría haber aumentado entre 50 y 70% en el hemisferio norte y en las latitudes medias del sur, respectivamente, en el año 2050. Esta situación habría incrementado la incidencia de radiación UVB en la superficie terrestre: el doble en las latitudes del norte y cuatro veces más en el sur. Con la adopción de las medidas



**Tabla 5.4** Compromisos de reducción de SAO ante el Protocolo de Montreal

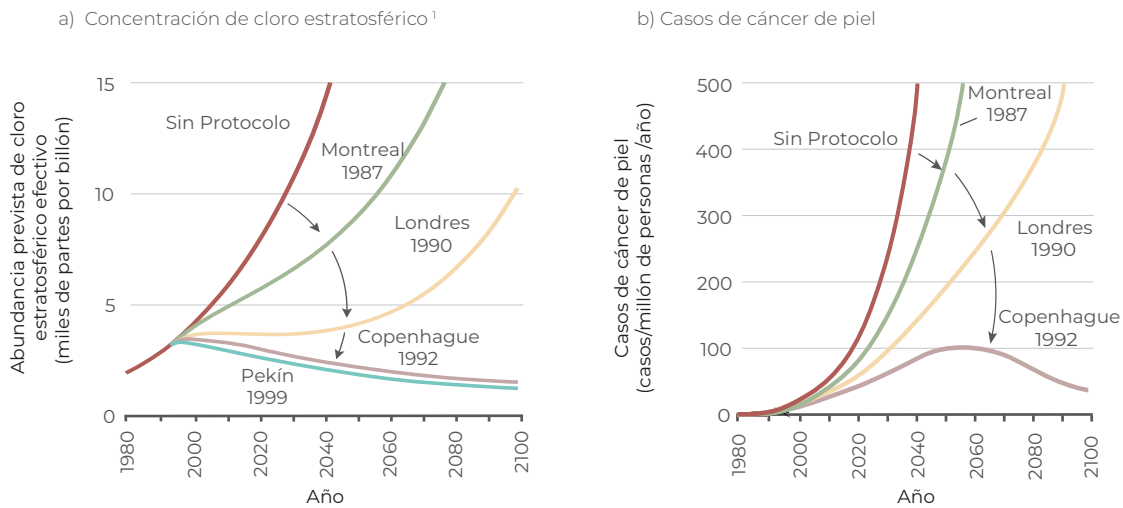
Sustancia	Reducción en países industrializados	Reducción en países en desarrollo
Clorofluorocarbonos	100% en 1996	0% en 1999
		50% en 2005
		85% en 2007
		100% en 2010
Halones	100% en 1994	0% en 2002
		50% en 2005
		100% en 2010
Tetracloruro de carbono	100% en 1996	85% en 2005
		100% en 2010
Metilcloroformo	100% en 1996	0% en 2003
		30% en 2005
		70% en 2010
		100% en 2015
Bromuro de metilo	0% en 1995	0% en 2002
	25% en 1999	20% en 2005
	50% en 2001	
	70% en 2003	100% en 2015
	100% en 2005	
Hidrocloruros	0% en 1996	10% en 2015
	35% en 2004	35% en 2020
	65% en 2010	67.5% en 2025
	90% en 2015	97.5% en 2030
	99.5% en 2020	100% en 2040
	100% en 2030	
Hidrobromofluorocarbonos	100% en 1996	100% en 1996

**Fuente:**

Unidad de Protección a la Capa de Ozono, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Semarnat. México. 2016.

para proteger la capa de ozono los riesgos a la salud se redujeron drásticamente: por ejemplo, a nivel mundial se calcula que se evitaron 1.5 millones de casos de cáncer de piel de tipo melanoma, 19 millones de casos de cáncer de tipo no melanoma y 130 millones de casos de cataratas (UNEP, 2012b). En la Figura 5.53a se muestra la magnitud de los efectos calculados del Protocolo de Montreal y sus enmiendas en las concentraciones estratosféricas de cloro, así como los efectos que hubieran podido registrarse en la salud (específicamente en cuestión de cáncer de piel) en caso de no haber sido adoptado (Figura 5.53b).

**Figura 5.53** Efectos del Protocolo de Montreal y sus enmiendas



**Nota:**

<sup>1</sup> El cloro efectivo es una manera de medir el potencial destructivo en la estratosfera de todas las SAO emitidas.

**Fuente:**

Tomado de:

UNEP. *Vital Ozone Graphics*. 3a. edición. UNEP. 2012. Disponible en: [https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s\\_document/146/original/Vital-Ozone-Graphics-3-FINAL.pdf?1483646705](https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/146/original/Vital-Ozone-Graphics-3-FINAL.pdf?1483646705). Fecha de consulta: octubre de 2018.

Como fruto del Protocolo, a partir de 1995 la mayoría de las SAO incluidas en el Protocolo, excepto los CFC, dejaron de producirse en los países industrializados. A partir de 2005, se eliminó más del 95% la producción y el consumo global de más del 95% de todas las sustancias controladas por el Protocolo. En el caso de los países en desarrollo, el Protocolo especificó además, un periodo de gracia para su eliminación, así como apoyos financieros que les permitieran enfrentar los costos necesarios para su eliminación.

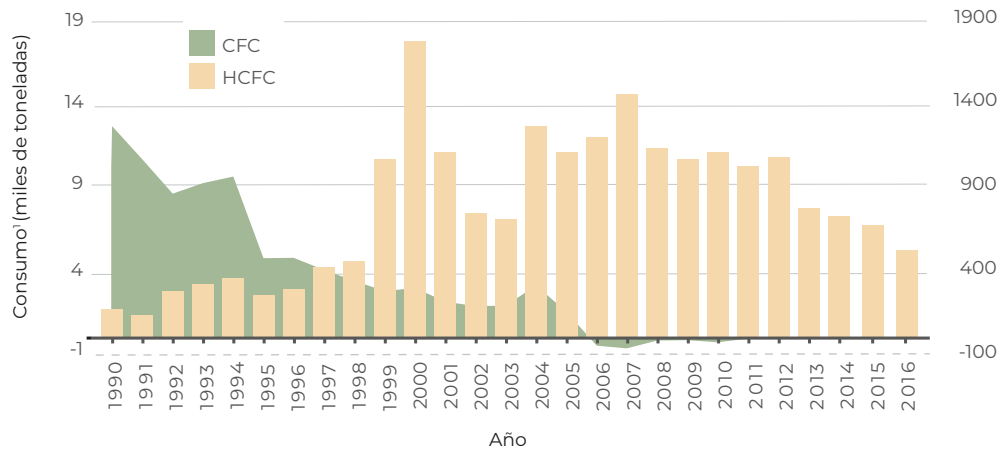
## MÉXICO Y EL PROTOCOLO DE MONTREAL

Nuestro país se comprometió a cumplir las metas de reducción de las SAO establecidas por el Protocolo. Las acciones de mitigación se han orientado principalmente a eliminar los clorofluorocarbonos, a usar sustancias alternativas que minimicen el impacto en la capa de ozono, al control en el consumo y producción de otras SAO, así como a financiar tecnologías limpias que empleen sustancias y prácticas alternativas a las SAO.

Las metas de reducir el consumo de algunas sustancias en México fueron alcanzadas con anticipación: específicamente en CFC, tetracloruro de carbono, metilcloroformo, halones y bromuro de metilo. En el año 2005 se cerró la única planta productora de CFC en México, con esto se redujo 60% la producción en Latinoamérica y 12% a nivel mundial. Esta acción se adelantó cuatro años el cumplimiento del compromiso con el Protocolo. Actualmente en el país, todos los productos en aerosol, refrigeradores y aires acondicionados, así como la producción de espumas de poliuretano, están libres de CFC (Semarnat, 2005 y 2012).

En el caso de los CFC, la nula producción nacional de estas sustancias y la exportación de las reservas generó un consumo negativo a partir del año 2006. El impulso de usar sustancias alternativas para sustituir aquellas con mayores potenciales de agotamiento, incrementó en un 88% el consumo de HCFC<sup>49</sup> desde finales de los años noventa hasta el año 2012. Sin embargo, debido a que su consumo también está regulado por el Protocolo, éste ha disminuido desde entonces (Figura 5.54; IB 1.3-5). Las metas de reducción progresiva de los HCFC lograron disminuir la meta del consumo de un 10% en 2015 y se busca alcanzar el 100% en 2040. Para información más detallada sobre producción, importación, exportación y consumo de SAO en México se recomienda consultar los cuadros D3\_AIRE03\_01, D3\_AIRE03\_02, D3\_AIRE03\_03, D3\_AIRE03\_04 y D3\_AIRE03\_05.

**Figura 5.54** Consumo nacional de HCFC como sustancias alternativas a los CFC, 1990 - 2016



**Notas:**

<sup>1</sup> El consumo ponderado se obtiene multiplicando el consumo de cada HCFC o CFC por su respectivo potencial de agotamiento de ozono. Para obtener el consumo nacional ponderado se suman los consumos ponderados de los diferentes HCFC o CFC por año.

<sup>2</sup> La fuente original actualizó la información, por lo que hay ajustes en las cifras para los años 2013, 2014 y 2015.

**Fuente:**

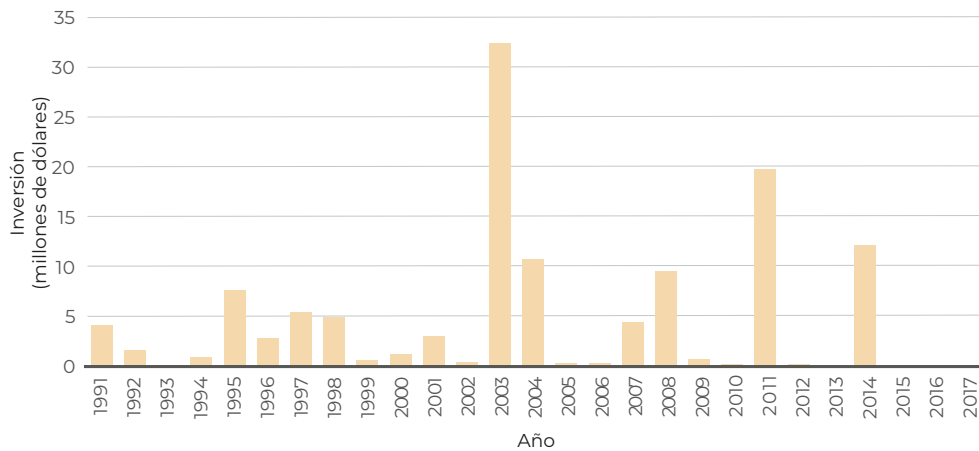
Unidad de Protección a la Capa de Ozono, Semarnat. México. Abril de 2017.

En 1991 se estableció el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal como una estrategia de cooperación internacional, cuyo objetivo es apoyar a los países en desarrollo a cumplir con las medidas de control adoptadas

<sup>49</sup> Los HCFC poseen un menor potencial de agotamiento: los que se emplean en México poseen potenciales de entre 0.04 y 0.07, en contraste con los reportados para los CFC, que van de 0.6 a 1.0.

ante el Protocolo de Montreal. Sus recursos se dirigen a impulsar la introducción de tecnologías limpias y a capacitar a los usuarios de las SAO en esos países. A 2017, el Fondo destinó a nivel mundial alrededor de 3 200 millones de dólares y busca que con la implementación todos los proyectos apoyados se alcance reducir el consumo y producción de aproximadamente 463 000 toneladas ponderadas de SAO. A diciembre de 2012 ya se había llegado al 97% de esta cifra (UNEP, 2014). México recibió del Fondo en el periodo 1991-2017 un total de 124.1 millones de dólares, con los que apoyó 147 proyectos en los sectores de refrigeración, aerosoles técnicos y medicinales, espuma de poliuretano, solventes y agentes de proceso, fumigantes, agricultura, almacenaje de productos, así como proyectos de fortalecimiento institucional, de eliminación de sustancias agotadoras de la capa de ozono, de capacitación y asistencia técnica, entre otros. En los años 2013, 2015 y 2016 no se registraron proyectos nuevos, pero en el 2017 se recibieron 0.03 millones de dólares para continuar con los avances del Protocolo (Figura 5.55).

**Figura 5.55** Fondos otorgados a México por el fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal, 1991 - 2017



**Fuente:** Unidad de Protección a la Capa de Ozono, Semarnat. México. Abril de 2017.

Para hacer uso eficiente de los recursos obtenidos por el fondo multilateral e implementar las medidas necesarias para cumplir los compromisos de México ante el Protocolo de Montreal, se creó hace más de veinte años la Unidad de Protección a la Capa de Ozono, dependiente de la Semarnat. También se desarrolló el Sistema de Información y Seguimiento de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SISSAO) para vigilar la importación, exportación y contar con un registro estadístico del movimiento de estas sustancias (Semarnat, 2013b).

Hasta ahora, los logros a nivel global son importantes, sin embargo, el problema aún sigue sin resolverse. A principios del 2014 se publicó un estudio con la identificación y cuantificación de nuevas sustancias que destruyen el ozono: tres CFC y un HCFC. A pesar de que se estima una emisión de 74 000 toneladas, debajo del millón estimado para otros CFC en los años ochenta, es muestra de lo importante que resulta el monitoreo de su presencia en la atmósfera.

## REFERENCIAS

- Aufdenkampe, A.K., E. Mayorga, P.A. Raymond *et al.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. *Frontiers in Ecology and Environment* 9(1): 53-60. 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.1890/100014>.
- Barriopedro, D., E. Fischer, J. Luterbacher *et al.* The Hot Summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science* 332(220): 220-224. 2011.
- Bender, M.A., T.R. Knutson, R.E. Tuleya *et al.* Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science* 327: 454-458. 2010.
- Brown, J., T.J. Valone y C.G. Curtin. Reorganization of an arid ecosystem in response to recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 94: 9729-9733. 1997.
- Cenapred. Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2000. Cenapred. México. 2001.
- Cenapred. Tormentas severas. Serie Fascículos. México. 2014. Disponible en: <https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/189-FASCCULOTORMENTASSEVERAS.PDF>.
- Challenger, A. y R. Dirzo. Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En: Dirzo, R., R. González e I.J. March (comps.). *Capital Natural de México, volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Conabio. México. 2008.
- CICC. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Semarnat. México. 2007.
- Clean Air Institute. La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica. Edición 2012. EE. UU. 2013.
- Conagua. Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2015. Conagua. México. 2015a.
- Conagua. Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2015. Conagua. 2015b. Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2015.pdf>. Fecha de consulta: octubre de 2018.
- Conagua. Reporte del clima en México 2017. Conagua. México. 2017.
- Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC. México. 2018.
- DeConto, R.M. y D. Pollard. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531: 591-597. 2016.
- Delgado, G.H. Volcano-ice interactions in Mexico: Extinction of glaciers at Popocatepetl and the fate of the glaciers of Iztaccíhuatl and Citlaltépetl volcanoes. *American Geophysical Union. Spring Meeting. Acapulco, México. 22-25 May. México. 2007.*
- Delgado, G.H., J. Miranda, C. Huggel *et al.* Chronicle of a death foretold: Extinction of the smallsize tropical glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico). *Global and Planetary Change* 56: 13-22. 2007.

Delworth T.L. y R.J. Greatbatch. Multidecadal Thermohaline Circulation Variability Driven by Atmospheric Surface Flux Forcing. *American Meteorological Society* 13: 1481-1495. 2000.

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, Semarnat. México. 2018.

DOF. Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. México. 2012a (6 de junio).

DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012. Diario Oficial de la Federación. México. 2012b (16 de julio).

Fernández Eguiarte, A., J. Zavala Hidalgo, R. Romero Centeno *et al.* Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. UNAM, INECC. México. 2016. Datos disponibles en: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

Gobierno de la República. Compromisos de Mitigación y Adaptación Ante el Cambio Climático para el periodo 2020-2030. Gobierno de la República. México. 2015.

Gruber, N. y J.N. Galloway. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. 2008. *Nature* 451(17): 293-296, DOI: [10.1038/nature06592](https://doi.org/10.1038/nature06592)

Holland, G.J. y P.J. Webster. Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: Natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365: 2695–2716. 2007. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2083>.

IEA. Global Energy & CO<sub>2</sub> Status Report. The latest trends in energy and emissions in 2017. IEA. 2018. Disponible en: <https://www.iea.org/geco/emissions/>. Fecha de consulta: diciembre de 2018.

INE, Semarnat y UNAM. Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al calentamiento global y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe Final. NE/A1-051/2008. INE, Semarnat y UNAM. México. 2008.

INECC. Vulnerabilidad al cambio climático en los municipios de México. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, INECC. México. 2013.

INECC. Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM2.5 en tres zonas metropolitanas mexicanas. INECC. México. 2014.

INECC, Semarnat. Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México. INECC, Semarnat. México. 2017.

INECC, Semarnat. México Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, Semarnat. México. 2018.

IPCC. Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. 2002.

IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers.

Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Francia. 2007a.

IPCC. The AR4 Synthesis Report. IPCC. Francia. 2007b.

IPCC. Climate change and water. IPCC Technical Paper VI. IPCC. Suiza. 2008.

IPCC. Summary for Policymakers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Reino Unido y EE. UU. 2013.

IPCC. Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. 2014.

Keeling, C.D. y T.P. Whorf. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network, 2005. En: Trends: A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center. EE. UU. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/>. Fecha de consulta: agosto de 2015.

Khazendar, A., C.P. Borstada, B. Scheuchlb *et al.* The evolving instability of the remnant Larsen B Ice Shelf and its tributary glaciers. *Earth and Planetary Science Letter* 419: 199-210. 2015.

Knutson, T.R., J.L. McBride, J. Chan *et al.* Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience* 3: 157– 63. 2010.

Laube, J., M.J. Newland, C. Hogan *et al.* Newly detected ozone-depleting substances in the atmosphere. *Nature* 7: 266-269. 2014.

Leal Ascencio, M.T., D.V. Millán Gómez, C.G. Méndez Jaime *et al.* Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria. INE, IMTA y Semarnat. México, 2008.

Lezama, J.L. La contaminación del aire. En: Lezama, J.L. y B. Graizbord. Los grandes problemas de México. Colmex. México. 2010.

MacDougall, A., C. Avis y J. Weaver. Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback. *Nature Geoscience* 5: 719–721. 2012.

Macías Medrano, J.M. y A. Avendaño García. Climatología de tornados en México. *Investigaciones Geográficas* 83. 2014. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n83/n83a6.pdf>. Fecha de consulta: julio de 2016.

Manney, G., M. Santee, M. Rex *et al.* Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478: 469-475. 2011.

Moon, T. Saying goodbye to glaciers. *Science* 356(6338): 580-581. 2017.

NASA. Arctic sea ice continues decline, hits 2nd-lowest level. NASA. 2011. Disponible en: <https://phys.org/news/2011-10-arctic-sea-ice-decline-2nd-lowest.html>. Fecha de consulta: agosto de 2015.

NASA. NASA Pinpoints Causes of 2011 Arctic Ozone Hole. NASA. 2014. Disponible en: <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/2011-ozone-hole.html>. Fecha de consulta: abril de 2015.

NASA. Ozone Hole Watch. Annual Records. NASA. 2015b. Disponible en: [http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual\\_data.html](http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.html). Fecha de consulta: abril de 2015.

NASA. Greenland Ice Sheet Today. NASA. 2018. Disponible en: <http://nsidc.org/>. Fecha de consulta: septiembre de 2018.

Nicholls, R.J. y A. Cazenave. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 328: 1517-1520. 2010.

NOAA. Greenland Ice Sheet. NOAA. 2015. Disponible en: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/219/Greenland-Ice-Sheet>. Fecha de consulta: mayo de 2015.

NSIDC. Arctic Sea Ice News and Analysis. Disponible en: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

Pecl, G.T., M.B. Araujo, J. Bell *et al.* Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355 (6332): 1-9. 2017.

PEF. Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. México. 2009.

Perry, A.L., P.J. Low, J.R. Ellis *et al.* Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308: 1912-1915. 2005.

PNUMA. Perspectivas del medio ambiente mundial GEO-3. Grupo Mundi-Prensa. España. 2002.

PNUMA y GEO-ALC. Perspectivas del Medio Ambiente 2003. PNUMA. Costa Rica. 2003.

PNUMA. Protocolo de Montreal. Logros alcanzados hasta la fecha y desafíos futuros. Secretaría del Ozono. PNUMA. 2014. Disponible en: [http://42functions.net/sp/MP\\_achievements\\_challenges.php](http://42functions.net/sp/MP_achievements_challenges.php). Fecha de consulta: mayo de 2015.

Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco *et al.* Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7: 81-102. 2013.

Ragone, F., J. Wouters, y F. Bouchet. Computation of extreme heat waves in climate models using a large deviation algorithm. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115: 24-9. 2018.

Semarnat. Sistema de Información y Seguimiento de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono. Unidad de Protección de la Capa de Ozono. Semarnat. México. 2005. Disponible en: <http://sissao.semarnat.gob.mx/>. Fecha de consulta: abril de 2015.

Semarnat. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Unidad Protectora de la Capa de Ozono. Semarnat. México. 2012.

Semarnat. Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40. Semarnat. México. 2013a.



Semarnat. Protección a la capa de ozono. Semarnat. México. 2013b. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/proteccion-a-la-capade-ozono>. Fecha de consulta: abril de 2015.

Semarnat. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. Gobierno de la República. México. 2014. Disponible en: [http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/transparencia/programa\\_especial\\_de\\_cambio\\_climatico\\_2014-2018.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/transparencia/programa_especial_de_cambio_climatico_2014-2018.pdf).

Semarnat. Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire). Semarnat. México. 2018. Disponible en: <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire?idiom=es>. Fecha de consulta: agosto de 2018.

Semarnat y SHCP. La economía del cambio climático en México. Síntesis. Semarnat, SHCP. México. 2009.

The Ozone Hole. Ozone Hole History. 2015. Disponible en: [www.theozonehole.com/ozoneholehistory.htm](http://www.theozonehole.com/ozoneholehistory.htm). Fecha de consulta: abril de 2015.

UNCCD. Convención de las Naciones Unidas para la lucha contra la desertificación. Entrada en vigor 1996. UNCCD. Disponible en: <http://www.onu.cl/es/unccd/>. Fecha de consulta: agosto de 2015.

UN-Environment. Emissions Gap Report 2018. Disponible en: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2018>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

UNCFCC. Nationally Determined Contributions (NDCs). UNCFCC. 2018. Disponible en: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions/ndc-registry>. Fecha de consulta: noviembre de 2018.

UNEP. UNFCCC Convention on Climate Change. Climate Change Secretariat. UNEP. Francia. 2002.

UNEP. Policy Implications of Warming Permafrost. UNEP. Kenia. 2012a.

UNEP. Vital Ozone Graphics. UNEP. 2012b. Disponible en: [www.grida.no/publications/vg/ozone3/](http://www.grida.no/publications/vg/ozone3/). Fecha de consulta: abril 2016.

UNEP, Ozone Secretariat. Status of Ratification. UNEP. 2014.

UNEP y WGMS. Global glacier changes: facts and figures. UNEP. Kenia. 2008.

Vittoz, P., D. Cherix, Y. Gonshe *et al.* Climate change impacts on biodiversity in Switzerland. A review. *Journal for Nature Conservation* 21: 154–162. 2013.

Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry *et al.* Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309: 1844-1846. 2005.

Weatherhead, E.C. y S.B. Andersen. The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature* 441: 39-45. 2006.

Wernberg, T., S. Bennet, R.C. Babcock *et al.* Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem. *Science* 353(6295): 169-172. 2016.

WHO. Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012. WHO. Suiza. 2014a.

WMO. Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes 1970-2012. WMO. Suiza. 2014b.

WMO y UNEP. Scientific assessment of ozone depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47. WMO y UNEP. Suiza. 2003.