# Atmósfera

La atmósfera que envuelve a nuestro planeta cumple funciones esenciales para el mantenimiento de la vida: además de que aloja a la capa de ozono que filtra la dañina radiación ultravioleta (UV) proveniente del sol, también participa en la regulación del clima, esto 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 después se vierte en forma de precipitación en los continentes (Delworth y Greatbatch, 2000; UNEP, 2012b). Sumado a lo anterior, la atmósfera actúa también como reservorio de algunos elementos químicos vitales para los seres vivos, los cuales circulan en la biosfera a través de los llamados "ciclos biogeoquímicos" y que necesariamente pasan por una fase gaseosa en la atmósfera, como son los casos del carbono y del nitrógeno (Gruber y Galloway, 2008; Aufdenkampe et al. 2011).

A la atmósfera se liberan una enorme cantidad de sustancias producidas por las actividades humanas, las cuales pueden permanecer suspendidas desde unos pocos días (como en el caso de las partículas y el carbono negro), décadas (como los clorofluorocarbonos) o incluso siglos, tal como ocurre con algunos gases de efecto invernadero (el bióxido de carbono, por ejemplo). Aunque algunas de ellas pueden degradarse en la atmósfera, deponerse en tierra 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 son, sin duda, los más importantes.

En este sentido, resulta fundamental contar con información actualizada y confiable sobre los temas más relevantes relacionados con la atmósfera, la cual sea útil para tomar acciones efectivas a los niveles local y global. En este contexto, en la primera sección de este capítulo se describen las emisiones de contaminantes atmosféricos y su relación con la calidad del aire en algunas de las zonas urbanas con monitoreo. También se describe la situación y las tendencias de la calidad del aire en las ciudades que cuentan con estaciones de monitoreo e información

confiable. 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 de ellas se hace una descripción de las causas, las consecuencias y las medidas tomadas para enfrentarlos. En el caso del cambio climático, se describen los acuerdos a los que llegó la comunidad internacional en la reciente COP21 y los compromisos específicos que México ha hecho para enfrentar este problema.

## **CALIDAD DEL AIRE**

El crecimiento de la población en zonas urbanas trajo consigo la concentración de las actividades económicas y productivas en zonas relativamente pequeñas, lo que agudizó problemas como el adecuado suministro de agua y la mala calidad del aire.

La calidad deficiente del aire tiene implicaciones sociales y económicas importantes, siendo quizá una de las más relevantes el de poder convertirse en 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% de cáncer de pulmón; 40% por enfermedad isquémica del corazón, 40% por accidente cerebrovascular y alrededor de 3% por infección respiratoria aguda). La mayor parte, cerca del 70%, ocurrió en los países de la región Pacífico occidental y el sureste de Asia (1.67 millones y 936 mil muertes, respectivamente), sin embargo, en el continente americano se registraron cerca de 58 mil decesos (WHO, 2014).

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

En el ámbito nacional, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) evaluó el impacto económico y sobre la salud en 2010 en las zonas metropolitanas del Valle de México (ZMVM), Guadalajara (ZMG) y Monterrey (AMM), encontrando que si se cumplieran los límites establecidos en la concentración de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) recomendados por la Organización Mundial de la Salud², se evitarían pérdidas económicas por 45 mil millones de pesos y 2 170 muertes prematuras. Considerando la normatividad mexicana que establece un límite más alto para las PM<sub>2.5</sub>³, si su concentración se mantuviera por debajo de este límite se evitaría un gasto

<sup>&</sup>lt;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  $\mu g/m^3$  en 24 horas.

 $<sup>^3</sup>$  El límite en México indica que no deben excederse los 45  $\mu g/m^3$  en 24 horas.

de 27 mil millones de pesos y alrededor de 1 317 muertes prematuras (para mayor información sobre Salud ambiental se recomienda ver el capítulo de Población y medio ambiente).

Además de los efectos documentados sobre la salud de las personas, por la contaminación atmosférica también se han registrado afectaciones en los bosques y ecosistemas acuáticos debido a otros contaminantes importantes (como los óxidos de nitrógeno y de azufre) que se producen por la quema de combustibles fósiles y que provocan el fenómeno conocido como "lluvia ácida".

Los impactos ambientales, sociales y económicos de la contaminación atmosférica hacen necesario conocer no sólo las concentraciones de los principales contaminantes en el aire, sino también sus fuentes de origen y sus volúmenes de emisión. Todo ello permite 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 características de los contaminantes emitidos, tanto local como regionalmente a la atmósfera, 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) cuenta con datos para el año 2008. Incluye la estimación de las emisiones de contaminantes por fuente, entidad federativa y municipio para ese año y su información se concentra en el Subsistema del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera de México (SINEA). Es importante mencionar que los datos publicados en el INEM 2008 no son comparables con aquellos publicados en inventarios anteriores<sup>4</sup>, 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.

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. 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 2012 (recuadro de Emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México).

<sup>&</sup>lt;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).

# **Recuadro** | Emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México

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 (SO<sub>2</sub>) 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 aumentó, y ya 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 del Medio Ambiente, 2002).

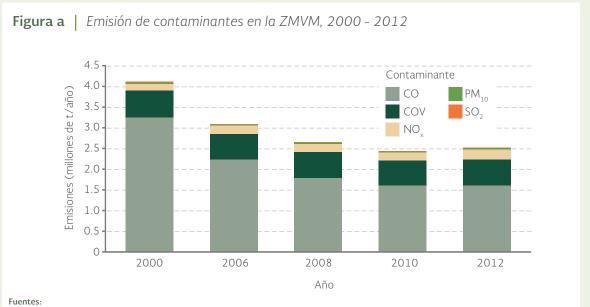
Sin embargo, la información recopilada no siempre se publicó de forma sistemática, y es hasta 1986 que se propuso la realización de un inventario de emisiones periódico que permitiera estudiar la producción de contaminantes atmosféricos y la implementación de medidas adecuadas para salvaguardar la salud 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 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 (Secretaría del Medio Ambiente, 2002).

La red de monitoreo de la ZMVM ha crecido significativamente: 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 y 18 municipios del estado de México, después de esa fecha se consideran también 58 municipios del estado de México y uno más que corresponde al estado de Hidalgo (Secretaría del Medio Ambiente, 2008).

A lo largo del tiempo también se han incrementado los contaminantes criterio que se monitorean. Antes de 1998 se generaba información sobre partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), hidrocarburos totales (HC) y bióxido de azufre ( $SO_2$ ), y desde ese año se reportan también las emisiones de bióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ). A partir del año 2000 se agregó también el monitoreo de las partículas menores a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ), y en vez de reportar los hidrocarburos totales (HCT) se empezaron a reportar los compuestos orgánicos totales (COT), separando el  $CH_4$  y los compuestos orgánicos volátiles (COV; Secretaría del Medio Ambiente, 2000).

**Emisiones** 

En la ZMVM en el año 2012 se emitieron 2.52 millones de toneladas contaminantes: 1.6 millones de toneladas de CO (es decir, 63.8% del total de contaminantes), 632 748 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV; 25.13%), 239 132 toneladas de NOx



Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010. Contaminantes criterio. Secretaría del Medio Ambiente. GDF. México. 2012.

Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México 2012. Secretaría del Medio Ambiente, GDF. México. 2013.

(9.5%), 34 677 toneladas de partículas  $PM_{10}$  (1.38%) y 4 867 toneladas de  $SO_2$  (0.19%). Si se compara el volumen total de las emisiones de 2012 con las generadas en 2000 se aprecia una reducción del 39%, sin embargo, entre 2010 y 2012 ocurrió un incremento del 3% en la emisión total de contaminantes (Figura a; Secretaría del Medio Ambiente, 2012, 2013).

Del total de los contaminantes analizados, el CO ha sido, consistentemente, el que más se ha emitido en la zona metropolitana, con valores que han oscilado entre el 79.2 y el 63.8% del total de emisiones generadas (Figura a). No obstante, la emisión de este gas se ha reducido en un 51% en el lapso de 13 años, al pasar de cerca de 3.3 millones de toneladas en 2000 a 1.6 millones en 2012, lo cual ha sido resultado, principalmente, de la incorporación de nuevas tecnologías en los vehículos. A pesar de esta tendencia, entre 2010 y 2012 las emisiones de este gas prácticamente no registraron cambios: su emisión se redujo en 0.06% (990 t; Secretaría del Medio Ambiente, 2012, 2013).

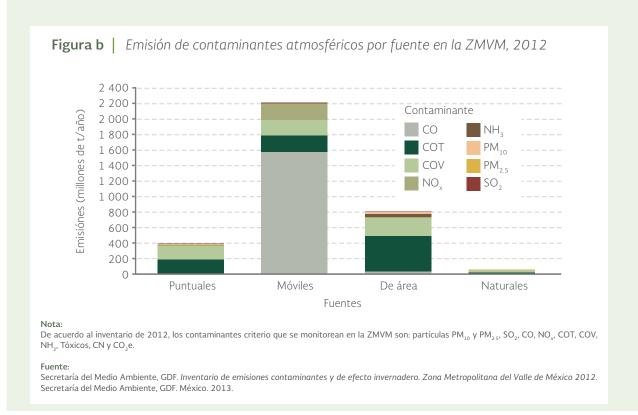
Otro contaminante que ha reducido sus volúmenes de emisión en la ZMVM es el  $SO_2$ : pasó de 12 792 a 4 867 toneladas entre 2000 y 2012, lo que significa un decremento del 62%. Esta disminución se debe principalmente a la reducción de azufre en los combustibles y al uso de tecnologías menos contaminantes (Figura a; Secretaría del Medio Ambiente, 2012, 2013).

Los COV mostraron un decremento del 2% en su volumen de emisión entre 2000 y 2012, esto es, alrededor de 9 844 toneladas. Sin embargo, en el período comprendido entre 2010 y 2012 sus volúmenes de emisión aumentaron 5% (Figura a). Las partículas  $PM_{10}$  tuvieron un comportamiento

similar: se redujeron entre 2000 y 2012 en alrededor del 1% (alrededor de 279 toneladas) con un incremento en los dos últimos años con medición (2010 y 2012) de 23%, es decir, 6 476 toneladas (Figura a; Secretaría del Medio Ambiente, 2012, 2013).

En lo que se refiere al origen de los contaminantes, en 2012 el 63.8% de las emisiones provino de las fuentes móviles (2.2 millones de toneladas), siendo el CO el contaminante que representó la mayor proporción de las emisiones de este tipo (1.6 millones de toneladas; 46% del total Figura 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 (p. ej., en el año 2010, todavía el 11% de los vehículos a gasolina no contaban con sistemas de control de emisiones). En el año 2012, los autos particulares representaban el 58.5% de los vehículos que circulaban en la ZMVM, y también los que producían la mayor cantidad de contaminantes emitidos por fuentes móviles; no obstante, los tractocamiones, aunque menos abundantes (1.5%), contribuyen en gran proporción con las emisiones de partículas PM<sub>10</sub>, debido a su consumo de diésel (Secretaría del Medio Ambiente, 2013).

A las fuentes móviles le siguieron en importancia las fuentes de área (que emitieron 23.2% del total de los contaminantes de la ZMVM; con 804 548 t), las fuentes puntuales (11.3%; 392 195 t), mientras que las fuentes naturales, las cuales corresponden a la vegetación y suelos, contribuyen con un porcentaje muy reducido de emisiones (1.7% del total, con 59 175 t; Figura b; Secretaría del Medio Ambiente, 2013).



#### Referencias:

Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones. Zona Metropolitana del Valle de México 1998. Secretaría del Medio Ambiente, GDF. México. 2000.

Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones a la atmósfera. Zona Metropolitana del Valle de México 2000. Secretaría del Medio Ambiente, GDF. México. 2002.

Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2006. Secretaría del Medio Ambiente, GDF. México. 2008.

Secretaría del Medio Ambiente, GDF. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2012. Contaminantes criterio. Secretaría del Medio Ambiente, GDF. México. 2013.

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.

Considerando los resultados del INEM 2008, a nivel nacional se emitieron en ese año alrededor de 59 millones de toneladas de contaminantes, de los cuales, las fuentes naturales<sup>5</sup> emitieron 21% y las antropogénicas el 79% restante. En el caso de las emisiones de las fuentes naturales, el 86% correspondió a compuestos orgánicos volátiles provenientes de la vegetación y el restante 14% a óxidos de nitrógeno generados por la actividad microbiana del suelo.

En el caso de las fuentes antropogénicas, puesto que las emisiones se generan en o cerca de ciudades o poblados donde se concentra la población, su análisis cobra mayor relevancia. El mayor volumen emitido provino de las fuentes móviles carreteras<sup>6</sup> (58%), seguidas por las fuentes de área<sup>7</sup> (13%), las fuentes fijas<sup>8</sup> (7%) y las fuentes móviles no carreteras<sup>9</sup> (1%; Figura 5.1; **IB 1.1-2**; Cuadro D3\_AIRE01\_01\_D).



Los contaminantes emitidos en mayor proporción por fuentes antropogénicas fueron el monóxido de carbono (CO; 33 millones de toneladas; 70% del total), los compuestos orgánicos volátiles (COV; 6.03 millones de toneladas; 13%), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>3</sub>; 3.2 millones de toneladas; 7%) y el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>; 2.2 millones de toneladas; 5%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje igual o menor al 2% en todos los casos (Figura 5.2; IB 1.1-2).



Los vehículos automotores (clasificados dentro de las fuentes móviles carreteras) generaron, en 2008, la mayor parte de las emisiones antropogénicas (73.3% del total). Este tipo de

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Incluyen fuentes biogénicas como la vegetación y la actividad microbiana del suelo. En 2008 no se reportaron emisiones por actividad volcánica (otra fuente importante de emisiones, aunque intermitente).

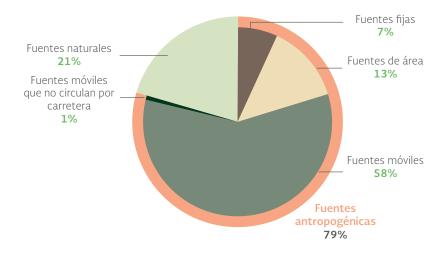
<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Incluyen autos particulares (tipo sedán), camionetas Pick-up, vehículos privados y comerciales, autobuses de transporte urbano, tractocamiones, taxis, camionetas de transporte público de pasajeros y motocicletas

<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 amoniaco, labranza, aguas residuales, incendios de construcciones, incendios forestales, emisiones domésticas de amoniaco, esterilización de material hospitalario, cruces fronterizos, terminales de autobuses y quemas agrícolas.

<sup>&</sup>lt;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,

<sup>9</sup> Incluyen aviación, equipo básico en aeropuertos, embarcaciones marinas, locomotoras de arrastre, locomotoras de patio, maquinaria de uso agropecuario y para construcción.

Figura 5.1 | Emisión nacional de contaminantes por fuente, 2008

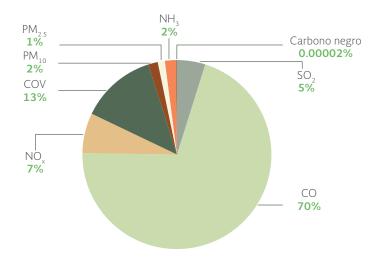


Fuente:

Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013.

fuentes móviles carreteras emitió principalmente CO (89.6% del CO total emitido por todas las fuentes),  $NO_x$  (62.5%) y COV (43.1%; Figura 5.3). Las fuentes de área (17.1% del total de contaminantes de las fuentes antropogénicas) produjeron principalmente CO y COV resultado principalmente de la combustión doméstica. Les siguieron las fuentes fijas (8.6% del total de contaminantes emitidos por fuentes antropogénicas), quienes produjeron la mayor parte del  $SO_2$  en el país (96.9%), principalmente por la generación de energía eléctrica y la industria del petróleo y petroquímica.

**Figura 5.2** | Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante, 2008



Fuente-

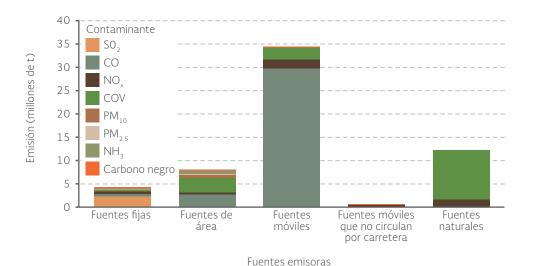
A nivel estatal y considerando el total de emisiones (naturales y antropogénicas), las cinco entidades federativas que emitieron una mayor cantidad de contaminantes fueron Jalisco, Michoacán, Veracruz, Baja California y el estado de México (Figura 5.4). Sus contribuciones oscilaron entre 7.3 y 9.8% del total nacional. En contraste, Tlaxcala, Aguascalientes, Baja California Sur y Querétaro emitieron, cada una, menos del 1%.

Por otro lado, la emisión nacional de contaminantes per cápita<sup>10</sup> en 2008 fue de alrededor de 0.52 toneladas. Si sólo se consideran las emisiones antropogénicas, la cifra se reduce a 0.41 toneladas por habitante. El Mapa 5.1 muestra las emisiones per cápita a nivel municipal.

A nivel municipal, considerando exclusivamente las emisiones antropogénicas, se observa que 72% de los municipios emitieron entre 5 y 10 mil toneladas de contaminantes en 2008, lo que en conjunto significa alrededor de 5 millones de toneladas (11% del total emitido a nivel nacional; Mapa 5.2). Los cinco municipios que generaron mayores cantidades de contaminantes fueron Tijuana (Baja California), Morelia (Michoacán), Mexicali (Baja California), Guadalajara (Jalisco) y Monterrey (Nuevo León) que en total emitieron el 15% nacional.

Con respecto a las emisiones totales por municipio y contaminante, el CO fue generado en mayor cantidad por las fuentes móviles en municipios pertenecientes a ciudades donde el

**Figura 5.3** Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico, por fuente y contaminante. 2008



<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> La emisión per cápita se calculó con base en los datos del INEM 2008 y la población por municipio del año 2010.

Baja California Sur Aguascalientes -Tlaxcala Quintana Roo Querétaro <sup>\*</sup> Yucatán Tabasco Fuentes antropogénicas Sonora Fuentes naturales Colima San Luis Potosí Chihuahua <sup>1</sup> Sinaloa Entidad federativa Tamaulipas ' Durango Morelos Hidalgo Navarit Campeche Chiapas Oaxaca Zacatecas Guerrero Distrito Federal Puebla

Figura 5.4 | Emisión de contaminantes por entidad federativa, 2008

Fuente:

Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013.

Guanajuato Coahuila Veracruz Nuevo León Baja California México Michoacán Jalisco

número de vehículos es elevado. Los municipios que emitieron más CO fueron Tijuana (Baja California), Morelia (Michoacán), Mexicali (Baja California), Guadalajara (Jalisco), Monterrey (Nuevo León) y Toluca (México; Mapa 5.3).

2000

3000

Emisión (miles de t)

4000

5000

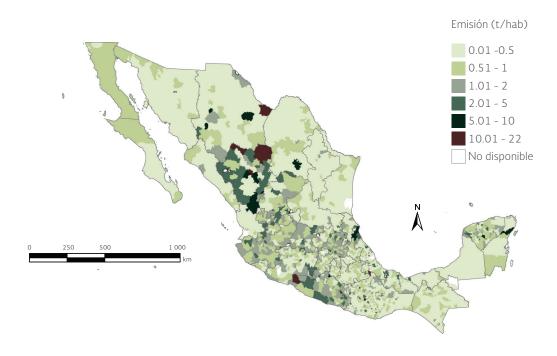
6000

En el caso de los compuestos orgánicos volátiles (COV), 44% de los municipios generaron cantidades entre las 19 y las 2 mil toneladas, 41% emitió entre 2 mil y 10 mil toneladas, 12.2% entre 10 mil y 40 mil toneladas y 2.1% entre 40 mil y 500 mil toneladas (Mapa 5.4). Los seis municipios que emitieron más COV fueron Calakmul (Campeche), Felipe Carrillo Puerto y Othón P. Blanco (ambos en Quintana Roo), Ocosingo (Chiapas) y Hopelchén y Champotón (ambos en Campeche), los cuales produjeron poco más de 2.48 millones de toneladas de COV (equivalentes a 10.9% del total emitido), provenientes principalmente de fuentes naturales<sup>11</sup>.

1000

<sup>11</sup> Los COV naturales son isoprenos y monoterpenos y pueden ocasionar reacciones de tipo alérgico e incluso lesiones neurológicas graves.

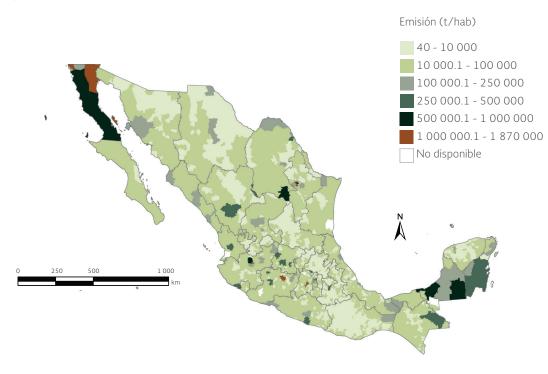
Mapa 5.1 | Emisión per cápita de contaminantes por municipio, 2008



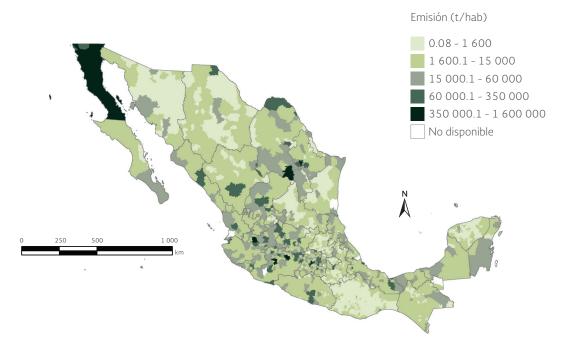
Fuente:

Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013.

Mapa 5.2 | Emisiones antropogénicas totales por municipio, 2008

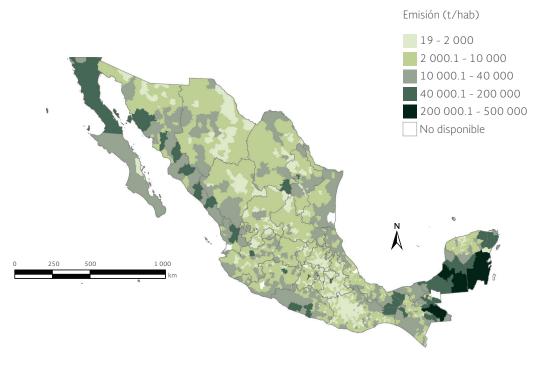


Mapa 5.3 | Emisión de monóxido de carbono (CO) por municipio, 2008



Fuente: Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013.

Mapa 5.4 | Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) por municipio, 2008

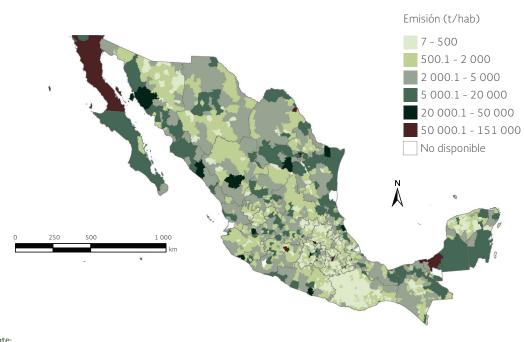


Fuente:

En los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) se observa que en 2008 alrededor del 63% de los municipios del país emitieron entre 7 y 1 000 toneladas, acumulando poco más de 503.9 mil toneladas, las que representaron el 10.3% del total nacional de ese contaminante (Mapa 5.5). Si a estos municipios se suman los que emitieron hasta 10 mil toneladas, se alcanza 56% de las emisiones totales nacionales y el 96% de los municipios del país. De esta manera, el restante 44% de las emisiones de estos óxidos fueron generadas por tan sólo 4% de los municipios. Entre estos últimos destacan los de Nava (Coahuila), Monterrey (Nuevo León), Tijuana y Mexicali (ambos en Baja California) y Puebla (Puebla) con emisiones de entre 60 y 150.2 mil toneladas.

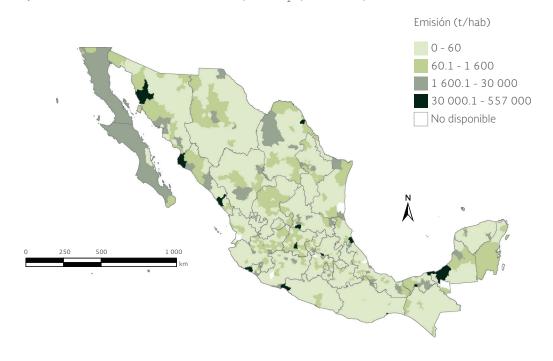
La emisión del 58.4% del bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se concentró en seis municipios: Carmen (Campeche), Tula de Allende (Hidalgo), Nava (Coahuila), Manzanillo (Colima), La Unión Isidoro Montes de Oca (Guerrero) y Salina Cruz (Oaxaca; Mapa 5.6). En todos ellos, la mayor parte de las emisiones las generaron fuentes fijas, en particular las plantas de generación de electricidad y las refinerías de petróleo. La mayoría de los municipios del país (87%) emitió entre 0.02 y 60 toneladas de SO<sub>2</sub>, lo que representa el 0.9% del total.

En lo que se refiere a las partículas menores a 10 micras ( $PM_{10}$ ), el 96% de los municipios del país emitieron entre 0.14 y 1 600 toneladas, lo que representa en conjunto el 62% de la emisión total del contaminante (Mapa 5.7). Los cinco municipios con mayores emisiones de PM<sub>10</sub> fueron Nava (Coahuila), Tula de Allende (Hidalgo), La Unión de Isidoro Montes de Oca (Guerrero), Ciudad Valles (San Luis Potosí) y Tuxpan (Veracruz). Respecto a la emisión de PM<sub>25</sub>, el 98% de los municipios emitieron entre una y 1 600 toneladas, contabilizando el



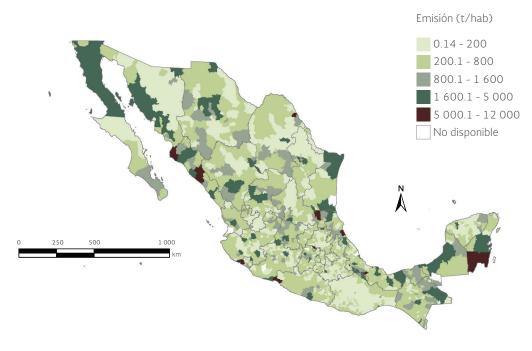
Mapa 5.5 | Emisión de óxidos de nitrógeno (NO) por municipio, 2008

Mapa 5.6 | Emisión de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) por municipio, 2008



Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013

**Mapa 5.7** | Emisión de partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) por municipio, 2008



74% del total emitido (Mapa 5.8). Los cinco municipios que emitieron el mayor volumen de este contaminante fueron Nava (Coahuila), La Unión de Isidoro Montes de Oca (Guerrero), Tula de Allende (Hidalgo), Tuxpan (Veracruz) y Othón P. Blanco (Quintana Roo). Ambos tipos de partículas fueron generados principalmente por las fuentes fijas y de área, destacando por su influencia los municipios en donde se localizan las centrales termo y carboeléctricas de la Comisión Federal de Electricidad.

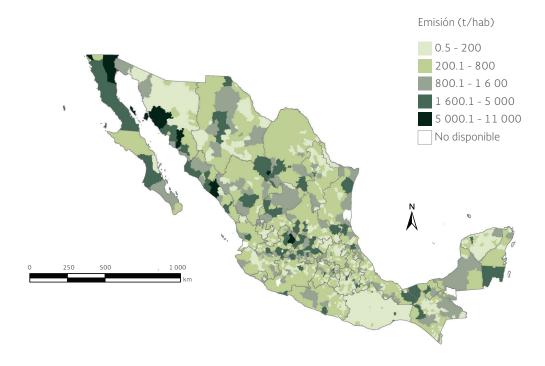
El amoniaco (NH<sub>2</sub>) es un residuo de las actividades ganaderas. El 96% de los municipios produjeron entre 50 kilogramos y 1 600 toneladas, acumulando en conjunto poco más de 593 mil toneladas (esto es, el 69% del total de NH<sub>3</sub> emitido; Mapa 5.9). Los cinco municipios con las mayores emisiones fueron Mexicali (Baja California), Hermosillo (Sonora), Lagos de Moreno (Jalisco), Calihualá (Oaxaca) y Culiacán (Sinaloa), que emitieron entre 6 500 y 10 500 toneladas.

El carbono negro (CN) es producto de la quema incompleta de combustibles; principalmente lo emite el transporte que consume diésel. El 86% de los municipios emitieron entre una y 50 toneladas, acumulando cerca de 30 mil toneladas, lo que representa 38% de la emisión total de este contaminante (Mapa 5.10). Los municipios que emitieron más carbono negro fueron Ciudad Valles (San Luis Potosí), Cosamaloapan (Veracruz), Othón P. Blanco (Quintana Roo), Ahome (Sinaloa) y Tezonapa (Veracruz). Para mayores detalles sobre este contaminante, consultar el recuadro El carbono negro y la salud.

Emisión (t/hab) 0.5 - 200 200.1 - 800 800.1 - 1 600 1 600.1 - 5 000 5 000.1 - 12 000 No disponible

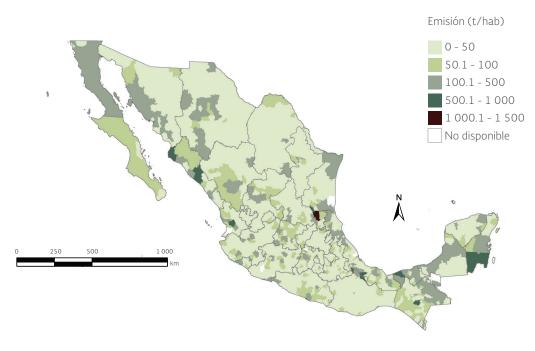
Mapa 5.8 | Emisión de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) por municipio, 2008

Mapa 5.9 | Emisión de amoniaco (NH<sub>3</sub>) por municipio, 2008



Fuente: Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2008. Semarnat. México. 2013.

Mapa 5.10 | Emisión de carbono negro (CN) por municipio, 2008



# **Recuadro** | El carbono negro y la salud

El carbono negro (CN) forma parte de los llamados contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), entre los que se encuentran también el metano (CH<sub>4</sub>), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC). Está formado por pequeñas esferas de carbón de unas cuantas micras rodeadas por lo general de compuestos orgánicos y pequeñas cantidades de nitratos y sulfatos (Tollefson, 2009; Bond et al. 2013). Se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles como el diésel y el combustóleo, así como por la guema 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 están causando gran preocupación. La asociación del CN con ciertos padecimientos se centra principalmente en las partículas suspendidas con diámetros menores de 2.5 µm (PM<sub>3.5</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 PM25 les permite alcanzar zonas más profundas del sistema respiratorio, como la región bronquial, aumentando la incidencia de afecciones como accidentes cerebrovasculares, diversas enfermedades del corazón y cáncer de pulmón, como las más frecuentes, además de que podrían provocar muerte prematura (Janssen et al., 2012; WHO, 2015).

Según las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor de 4.3 millones de muertes prematuras en 2012 pudieron originarse por la exposición a partículas PM<sub>25</sub>. 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/m³) y los niños (285 μg/m³), mientras que los hombres se ven expuestos a concentraciones relativamente menores (204 µg/m³). Estos niveles son más de 20 veces mayores que los recomendados por la OMS como promedio anual (10 µg/m³; 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 las viviendas. 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 (Figura a).

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, p. ej., México se ha



comprometido recientemente, 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 un 70%. 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.

DOF. Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. Diario Oficial de la Federación. México. 2014 (28 de abril).

INECC. Inventario de Gases y compuestos de Efecto Invernadero. INECC. 2015. Disponible en: www.inecc.gob.mx/ descargas/cclimatico/2015 inv nal emis gei result.pdf. Fecha de consulta: marzo de 2016.

Janssen, N.A.H., M.E. Gerlofs-Nijland, T. Lanki, R.O. Salonen, F. Cassee, G. Hoek, P. Fischer, B. Brunekreef y M. Krzyzanowski. Health effects of black carbon. WHO. Dinamarca. 2012.

Molina, M., D. Zaelkeb, K.M. Sarmac, S.O. Andersend, V. Ramanathane y D. Kaniaruf. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO2 emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences (106)49: 20616-20621. 2009.

Semarnat. Intended Nationally Determined Contribution. iNDC. Semarnat. México. 2015. Disponible en: www4.unfccc. int/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 Policymakers. Switzerland. 2015.

# MONITOREO Y CALIDAD DEL AIRE Redes de monitoreo existentes en el país

Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire permiten conocer las concentraciones de contaminantes a las que está expuesta la sociedad. Con el crecimiento de la población también crece la demanda de servicios como transporte, agua, electricidad y su infraestructura asociada, así como la generación de residuos y la emisión y concentración de contaminantes en la atmósfera (Lezama, 2010). En este contexto, la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012 establece la instalación y operación de unidades de monitoreo en las zonas o centros de población que cuenten con alguna de las siguientes condiciones: asentamientos humanos con más de 500 mil habitantes, zonas metropolitanas, asentamientos humanos con emisiones superiores a 20 mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera, conurbaciones y actividad industrial que por sus características requiera del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos (DOF, 2012).

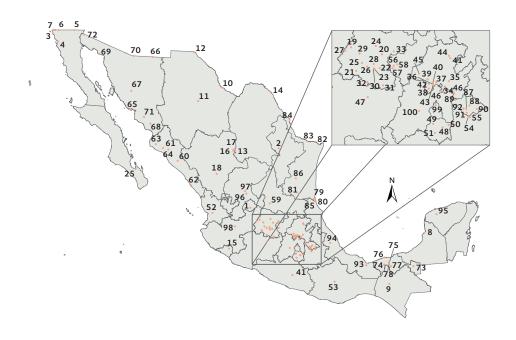
En México se han establecido estaciones y redes de monitoreo atmosférico en sitios que van desde ciudades y zonas metropolitanas, hasta localidades donde existe una intensa actividad industrial. Hasta 2015, el país contaba con equipos instalados para la medición de contaminantes atmosféricos en 29 estados de la república, con un total de 243 estaciones de monitoreo (Mapa 5.11); sin embargo, existían también tres localidades con más de 500 mil habitantes que no contaban con estos sistemas. Es importante resaltar que no todas las ciudades que cuentan con sistemas de monitoreo poseen datos suficientes ni confiables que permitan examinar la evolución de las concentraciones de contaminantes y por tanto, la calidad del aire en periodos largos de tiempo. Dado lo anterior, en las siguientes secciones se muestran las tendencias en la calidad del aire sólo 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 ZMVM, que cuenta con 28 estaciones de monitoreo automático y 11 manuales. 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 que la concentración de plomo ha disminuido significativamente en la ZMVM y se considera bajo control, no se incluyó en este reporte (INECC y Semarnat, 2014).

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<sup>12</sup>. En el Mapa 5.12 se muestra el cumplimiento de las normas de calidad del aire en varias ciudades que realizan monitoreo ambiental.

<sup>12</sup> Puede consultarse en la sección de 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.

**Mapa 5.11** | Zonas metropolitanas o poblaciones con equipos instalados para el monitoreo de la calidad del aire, 2015



Zona metropolitana o población

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

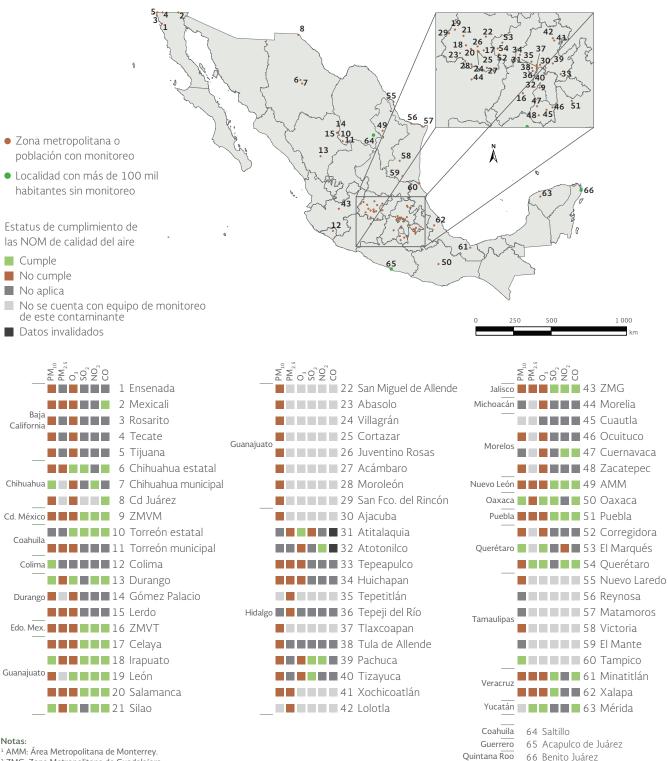
#### Nota:

#### Fuente:

Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes de Vida Corta, INECC, México. Datos a octubre de 2015.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Datos a octubre de 2015.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del aire en zonas metropolitanas o poblaciones en Mapa 5.12 México, 2014



- <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.

INECC y Semarnat. Informe Nacional de Calidad del Aire 2014, México. INECC, Semarnat. México. 2015.

Figura 5.5 | Límites máximos recomendados de algunos contaminantes



European Comission. Environment. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm. Fecha de consulta: julio de 2016. OMS. Calidad del aire (exterior) y salud. OMS. Disponible en: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/. Fecha de consulta: julio de 2016. US Environmental Protection Agency, Criteria Air pollutants. Disponible en: www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naags-table. Fecha de consulta: julio de 2016. PM, 5: Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014: No exceder 45 μg/m³ como promedio de 24 horas y no exceder de 12 μg/m³ como promedio anual. PM<sub>35</sub>: Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. No exceder 75 µg/m³ como promedio de 24 horas y no exceder de 40 µg/m³ como promedio anual.  $O_3$ . Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014. No exceder 0.070 ppm (137  $\mu g/m^3$ ) como promedio móvil de 8 h. CO: Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. No exceder 11 ppm (12 595 µg/m³) en promedio móvil de 8 horas una vez al año. NO.: Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. No exceder 0.21 ppm (395 μg/m³) en una hora una vez al año. SO<sub>3</sub>: Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010. No exceder 0.110 ppm (288 μg/m³) promedio en 24 horas una vez al año.

Derivado de los problemas de la contaminación del aire y de sus efectos sobre la salud de las poblaciones, se han establecido normas que establecen las concentraciones máximas de contaminantes que no deben sobrepasarse en un periodo definido. Nuestro país ha tenido avances y mejoras significativas en la definición de sus normas de calidad del aire para la protección a la salud desde su primera publicación, en 1994, hasta la fecha. No obstante, nuestros límites 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). Las normas oficiales mexicanas tienen como objetivo principal proteger la salud de la población, incluyendo a los grupos más susceptibles (Cuadro D3 R AIREO1 03) y son expedidas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación. Por su parte, la Semarnat es responsable de las normas que establecen los procedimientos para la medición y calibración del equipo empleado para determinar las concentraciones de los contaminantes, los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera y las especificaciones de los combustibles que se utilizan.

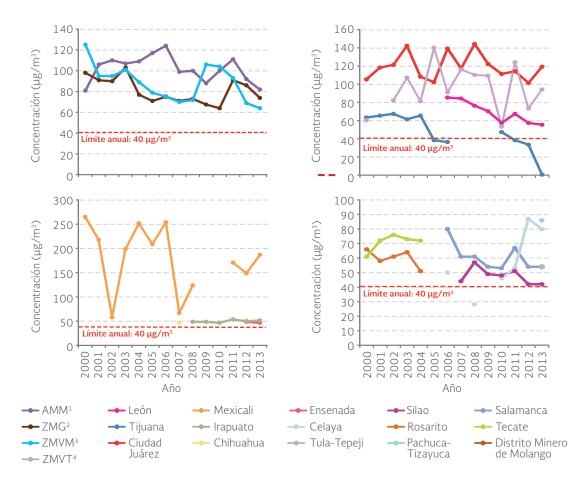
## Calidad del aire en algunas ciudades

La calidad del aire en una zona determinada puede analizarse de distintas maneras, ya sea a través de la concentración de contaminantes, de los días en los que se rebasan los límites definidos por las normas para proteger la salud 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 las normas permite obtener una aproximación a la dinámica temporal de la calidad del aire y con ello 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 diversos contaminantes, en diferentes estaciones de monitoreo y en ciudades distintas. Por ello, aunque existe información histórica para todos los contaminantes criterio, por el momento los datos actualizados de calidad del aire sólo incluyen cuatro contaminantes: PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub>.

En el caso de las  $PM_{10}$ , el límite anual de 40 µg/m³ sólo se cumple para algunos años en Tijuana y en Celaya; el resto de las ciudades registra valores por encima del límite promedio anual (Figura 5.6). Las concentraciones más elevadas en 2013 se registraron en Mexicali (187 µg/m³), Ciudad Juárez (119 µg/m³) y la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT, 94 µg/m³).

**Figura 5.6** | Concentración anual de PM<sub>10</sub> (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2000 - 2013



#### Notas:

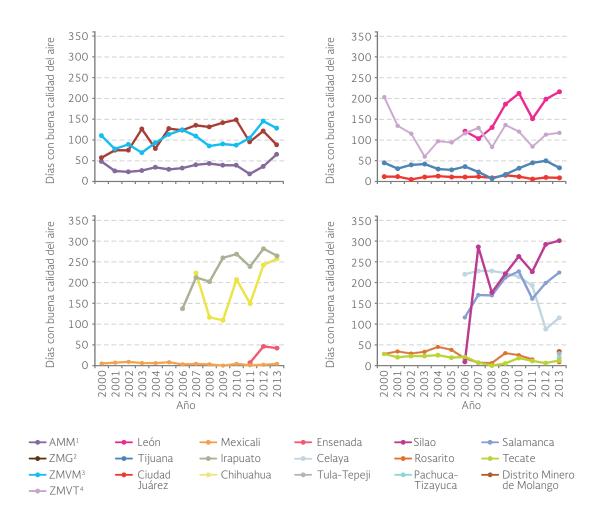
- $^{\scriptscriptstyle 1}$  AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>4</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Estimados a partir de muestreos manuales: Ciudad Juárez, DMM, Ensenada, Mexicali, Pachuca-Tizayuca, Rosarito, Tecate, Tijuana, Tula-Tepeji, ZMVM. Las ciudades de Durango (Durango), Gómez Palacio (Durango) y Puebla (Puebla) no se incluyen porque no cuentan con datos recientes.

#### Fuente:

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

Figura 5.7 | Número de días con buena calidad del aire, PM<sub>10</sub>, 2000 - 2013



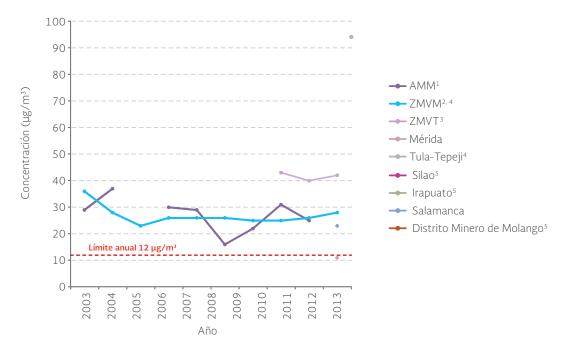
- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- <sup>3</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- 4 ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Estimados a partir de muestreos manuales: Ciudad Juárez, DMM, Ensenada, Mexicali, Pachuca-Tizayuca, Rosarito, Tecate, Tijuana, Tula-Tepeji.

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

El análisis también puede hacerse evaluando el número de días con buena calidad del aire con base en el cumplimiento de las normas. En el caso de las PM<sub>10</sub>, el número de días con buena calidad se calcula a partir de la concentración máxima del día de todas las estaciones de monitoreo de una ciudad o zona metropolitana. En el año 2013, las cinco ciudades con el mayor número de días con buena calidad del aire considerando este contaminante fueron Silao (301 días), Irapuato (264), Chihuahua (257), Salamanca (224) y León (216; Figura 5.7). En el mismo año, las cinco ciudades con menos días con buena calidad del aire fueron Mexicali (4 días), Rosarito (8), Ciudad Juárez (9), Tecate (12) y Pachuca-Tizayuca (19 días).

**Figura 5.8** | Concentración anual de PM<sub>2.5</sub> (promedio anual de los promedios de 24 horas), 2003 - 2013



#### Notas:

- <sup>1</sup> AMM: Área Metropolitana de Monterrey.
- <sup>2</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- <sup>3</sup> ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.
- <sup>4</sup> Estimados a partir de muestreos manuales.
- <sup>5</sup> No se dispone de datos para estas localidades.

## Fuente:

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

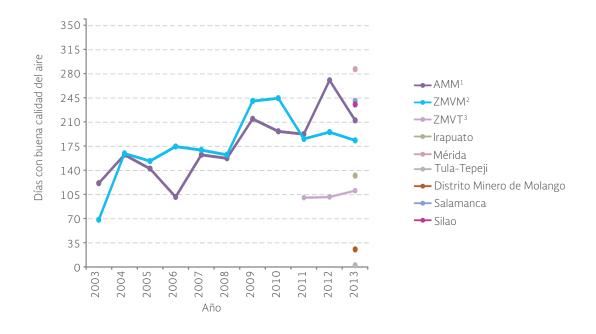
Respecto a las PM $_{2.5}$ , existen pocas ciudades en las que se esté monitoreando este contaminante. El registro más completo corresponde a la ZMVM y el AMM. Sin embargo, cada vez más ciudades se incorporan al registro de este tipo de partículas. El límite anual permitido por la norma son 12 µg/m³, y en 2013, de las ciudades que realizan su monitoreo, sólo la concentración anual en Mérida estuvo por debajo de la permitida (11 µg/m³; Figura 5.8). En ese mismo año, varias ciudades presentaron valores por arriba del límite permitido: Salamanca (23 µg/m³), la ZMVM (28 µg/m³) y la ZMVT (42 µg/m³). Los datos generados por el AMM, Irapuato, Silao y el DMM no cumplieron con los criterios de suficiencia que permitieran valorar adecuadamente la calidad del aire en esas ciudades. El caso más severo de contaminación del aire con partículas PM $_{2.5}$  ocurre en Tula-Tepeji, en donde el INECC sugiere que la elevada concentración registrada en 2013 (94 µg/m³) puede deberse tanto a las características climatológicas como a la actividad industrial (cementera y de cal, así como de explotación de bancos pétreos) que se registra en la zona.

Respecto a los días con buena calidad del aire por  $PM_{2.5}$ , un sitio cumple con la norma cuando el promedio anual de los valores diarios es menor o igual que 12  $\mu$ g/m³. Las dos ciudades con el

monitoreo más prolongado de este contaminante son el AMM y la ZMVM; en ambas, la calidad del aire se ha comportado de manera errática a lo largo de los años, sin embargo, puede observarse cierta tendencia a un mayor número de días con buena calidad. A pesar de esta tendencia, en 2013 el número de días que la calidad del aire de este contaminante estuvo por debajo del valor de la norma fue menor en ambas áreas metropolitanas con respecto al año anterior (Figura 5.9). Para el resto de las ciudades, la poca información existente limita la evaluación de las tendencias; sin embargo, en 2013, de todas las ciudades con monitoreo, sólo el DMM y Tula-Tepeji reportaron menos de 30 días con buena calidad del aire (25 y 2 días, respectivamente).

El ozono afecta la calidad del aire en varias ciudades. La norma NOM-020-SSA1-2014 establece los límites permisibles de concentración de ozono anual en 0.070  $\mu$ g/m³ en el promedio móvil de ocho horas. Tijuana, Rosarito y las zonas metropolitanas AMM, ZMG, ZMVM y ZMVT son las que han monitoreado este contaminante clave durante periodos más prolongados de tiempo. Desde 2000 a 2013, el comportamiento de la concentración de  $O_3$  en todas estas ciudades ha sido errático, pero en el caso de Tijuana, Rosarito y la ZMVM puede hablarse de un descenso progresivo en la concentración a lo largo del tiempo. En 2013, el límite anual de la concentración de ozono sólo se cumplió en Ciudad Juárez, Mérida, Chihuahua y Celaya (Figura 5.10).

Figura 5.9 | Número de días con buena calidad del aire, PM<sub>2.5</sub>, 2003 - 2013



#### Notas:

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

#### Fuente:

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. INECC, Semarnat. México. Junio de 2015.

Respecto a los días con buena calidad del aire por  $O_3$ , el indicador se calcula con el máximo diario de las concentraciones horarias. La tendencia histórica en las ciudades es muy variada, pero en el 2013 las ciudades con el mayor número de días con buena calidad del aire fueron: Ciudad Juárez (326 días), Chihuahua (286), Celaya (278), Salamanca (263), Mérida (235), Tijuana (234), Tula-Tepeji (211) y Pachuca-Tizayuca (186; Figura 5.11). En ese mismo año, destaca la ZMVM por la baja frecuencia de días con buena calidad del aire (sólo 40 días).

**Figura 5.10** Concentración anual de  $O_3$  (quinto máximo de las concentraciones diarias de los promedios móviles de 8 horas), 2000 - 2013



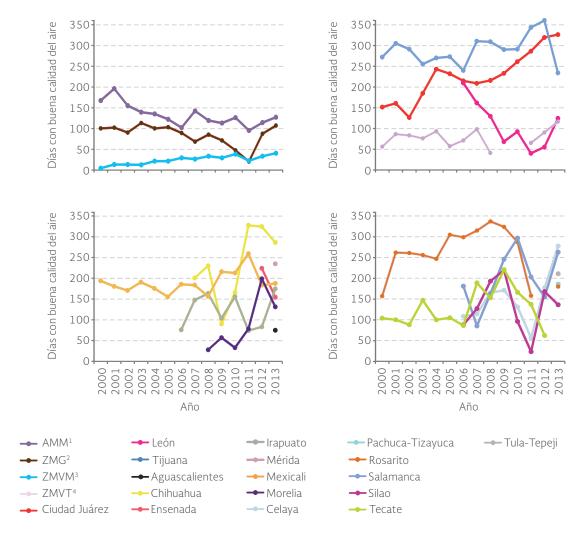
#### Notas:

- <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, Semarnat. México. Julio de 2016.

Figura 5.11 | Número de días con buena calidad del aire, O<sub>3</sub>, 2000 - 2013



## 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.

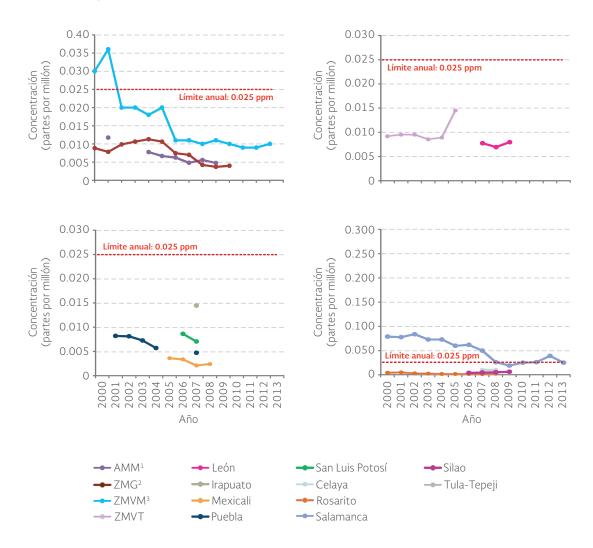
#### Fuente:

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. INECC, Semarnat. México. Junio de 2015.

En el caso de la concentración de  $SO_2$ , sólo la ZMVM y Salamanca cuentan con datos para el período 2000-2013. En ese lapso de tiempo, para esas ciudades, la concentración del contaminante ha tendido a disminuir, aunque no lo suficiente para estar por debajo de lo establecido en la norma como límite anual (0.025 ppm; Figura 5.12). Otras ciudades sí han mantenido concentraciones de  $SO_2$  por debajo de los valores permisibles, sin embargo, no han generado datos de calidad en los últimos años, tal es el caso de León, Rosarito, Silao, la ZMG y la ZMVT, por lo que no es posible observar si mantienen una tendencia a la baja en la concentración de este contaminante.

La frecuencia de días con buena calidad del aire de SO<sub>2</sub> se calcula con el promedio anual de las concentraciones diarias. Este contaminante ha sido largamente monitoreado en la ZMVM y en Salamanca. En ambas ciudades la calidad del aire ha mejorado a lo largo del tiempo. En 2013, la ZMVM tuvo 353 días con buena calidad del aire en este contaminante, mientras que Salamanca tuvo 358 días (Figura 5.13). En el caso de Tula-Tepeji sólo existe información para el año 2013, en el que se registraron 210 días con buena calidad del aire.

Figura 5.12 Concentración anual de SO, (promedio anual de las concentraciones horarias), 2000 - 2013



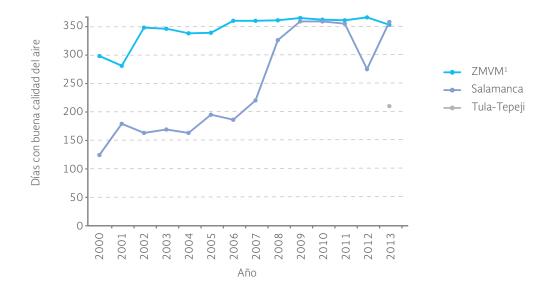
#### Notas:

- <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.
- 4 ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Las ciudades de Puebla (Puebla) y San Luis Potosí (San Luis Potosí) no se incluyen porque no cuentan con datos recientes.

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

**Figura 5.13** | Número de días con buena calidad del aire, SO<sub>3</sub>, 2000 - 2013



Nota:

<sup>1</sup> ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

Fuente

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, INECC, Semarnat. México. Junio de 2015.

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\_AIREO1\_20), así como el Informe Nacional de Calidad del Aire 2014 (INECC, 2015). No existe información actualizada a 2013 ni para el CO ni el  $NO_2$  para 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 2012 (Semarnat 2013).

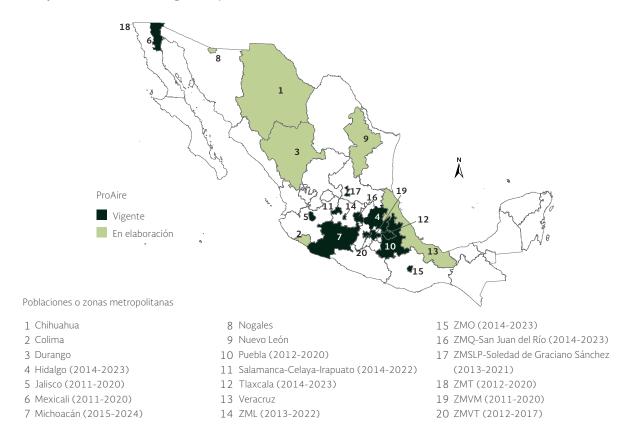
Acciones para mejorar la calidad del aire

La atención a la problemática de la calidad del aire requiere la implementación de políticas integrales que incluyan acciones concretas para su mejora. En este sentido, y como respuesta, 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, 2014). 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, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) se encuentra vigente en catorce zonas metropolitanas y ciudades: Hidalgo, Jalisco, Mexicali, Michoacán, Puebla, Salamanca-Celaya-Irapuato, Tlaxcala, Zona Metropolitana de León (ZML), Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO), Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ)-San Juan del Río, Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP)-Soledad de Graciano Sánchez, Zona Metropolitana de Tijuana (ZMT), ZMVM y ZMVT. Y seis programas más se encuentran en fase de elaboración (Mapa 5.13). Los ProAire vigentes benefician a 66.7 millones de personas (Tabla 5.1; Semarnat, 2014).

Dado que la calidad de los combustibles está directamente relacionada con las emisiones generadas por su consumo, sus características deben regularse. En México, la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 establece las especificaciones para los combustibles que se utilizan (DOF, 2006). Esta norma define el contenido de azufre, olefinas y benceno, entre otros, e incluye un calendario para la introducción de la gasolina y diésel de ultra bajo azufre a nivel nacional. Se ha estimado que con la introducción de combustibles de bajo contenido de azufre, en el periodo 2006-2030 se podrían evitar 56 mil muertes, 166 mil casos de bronquitis crónica y poco más de 78.3 millones de días perdidos de trabajo y de actividad restringida (Semarnat, INE y Pemex, 2006).

Mapa 5.13 | ProAire vigentes y en elaboración, 2016



## Fuentes:

Semarnat, Cuarto Informe de Labores 2015-2016, Semarnat, México, 2016.

Semarnat. Programas de Gestión de la Calidad del Aire. México. 2016. Disponible en: www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestionpara-mejorar-la-calidad-del-aire?idiom=es. Fecha de consulta: septiembre de 2016.

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.

**Tabla 5.1** | Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) vigentes y en elaboración, 2016

ProAire/región	Situación
roAire Chihuahua	En elaboraciór
roAire Colima	En elaboraciór
roAire Durango	En elaboraciór
roAire Hidalgo (2014-2023)	Vigente
roAire Jalisco (2011-2020)	Vigente
roAire Mexicali (2011-2020)	Vigente
roAire Michoacán (2015-2024)	Vigente
roAire Nogales, Sonora	En elaboraciór
ro Aire Nuevo León	En elaboraciór
roAire Puebla (2012-2020)	Vigente
roAire Salamanca, Celaya e Irapuato (2014-2022)	Vigente
roAire Tlaxcala (2014-2023)	Vigente
roAire Veracruz	En elaboraciór
roAire Zona Metropolitana de León (2013-2022)	Vigente
roAire Zona Metropolitana de Oaxaca (2014-2023)	Vigente
roAire Zona Metropolitana de Querétaro-San Juan del Río (2014-2023)	Vigente
roAire Zona Metropolitana de San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez 2103-2021)	Vigente
roAire Zona Metropolitana de Tijuana (2012-2020)	Vigente
roAire Zona Metropolitana del Valle de México (2011-2020)	Vigente
roAire Zona Metropolitana del Valle de Toluca (2012-2017)	Vigente

#### Fuentes:

Semarnat. Cuarto Informe de Labores 2015-2016. Semarnat. México. 2016.

Semarnat. Programas de Gestión de la Calidad del Aire. Semarnat. México. 2016. Disponible en: www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire?idiom=es. Fecha de consulta: septiembre de 2016.

# CAMBIO CLIMÁTICO

Las actividades productivas se han intensificado globalmente como consecuencia de una población mundial que crece aceleradamente al igual que sus necesidades, y con patrones de consumo cada vez más demandantes. Resultado de ello, la energía y los materiales necesarios para la producción de bienes y servicios han crecido significativamente, sobre todo desde la segunda mitad del siglo XX (ver el capítulo Población y medio ambiente). Los impactos de este crecimiento pueden observarse a nivel global, regional y local, siendo uno de los más reconocidos por sus efectos y posibles consecuencias el cambio climático global, que representa hoy día, junto con la pérdida de la biodiversidad, uno de los principales retos ambientales globales.

El clima, y en particular la temperatura del planeta, dependen del balance entre la energía solar que recibe y el calor que emite (radiación infrarroja). 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 ésta 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 que de manera natural existen en la atmósfera, con lo que se incrementa su concentración en la atmósfera y con ello el efecto de calentamiento.

El cambio climático global actual se manifiesta a través del incremento de la temperatura, los cambios en la precipitación (tanto en intensidad como en su distribución temporal y espacial), la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, el deshielo de los glaciares y el incremento del nivel del mar, entre otros. 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). El IPCC señaló que es probable<sup>13</sup> que el incremento de la temperatura superficial observado desde mediados del siglo XX a la fecha se deba muy probablemente al incremento de las concentraciones de GEI de origen antropogénico en todas las regiones, excepto la Antártida<sup>14</sup> (IPCC, 2015).

Las consecuencias de este fenómeno global 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. Ante esta situación resulta esencial no sólo avanzar en el conocimiento científico relacionado con el tema, sino también implementar medidas tanto para frenar el cambio climático (siendo la principal la mitigación de emisiones) como para diseñar e implementar estrategias de adaptación para enfrentar en las mejores condiciones sus efectos.

En esta sección se abordarán las evidencias y consecuencias de este fenómeno, sus causas, así como las medidas que se están tomando a nivel internacional y nacional para enfrentarlo.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> De acuerdo con el IPCC, probable corresponde a una probabilidad entre 66 y 100% (IPCC, 2015).

<sup>14</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.

# EVIDENCIAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En las últimas décadas, los cambios en el clima han causado impactos en los ecosistemas, la sociedad y los sectores productivos. En la Figura 5.14 se presenta un resumen de los principales impactos a nivel global identificados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y 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 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). El incremento de la

፠▮♠▮◂ mérica del norti **₩**≣**#**≡ **※**≣ ♠≡ (A)= △≡ ¥≡ slas pequeñas **₩** América central y del sur Å≣′ \*¥\*■ ŏ≒≡ Antártida **₩=** Nivel de confianza en la Impactos observados atribuidos al cambio en relación con atribución al cambio climático Sistemas biológicos Sistemas humanos y gestionados Ecosistemas i Producción Ē terrestres de alimentos Impactos a escala Medios de subsistencia regional Ecosistemas bajo <sub>medio</sub> alto forestales salud y/o economía Efectos de la erosión Ecosistemas marinos □ indica el rango del nivel de confianza Símbolos delineados=Contribución pequeña del cambio climático Símbolos rellenados=Contribución grande del cambio climático

Figura 5.14 | 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. Cambridge. United Kingdom and New York. 2014.

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 mantenían acumulado, también afecta negativamente a la vegetación que crece en ellos.

Los impactos del cambio climático también han alcanzado a los sectores productivos. En la agricultura, el cambio en el clima ha provocado una disminución en el rendimiento de los cultivos de trigo y maíz en muchas regiones y a nivel global (IPCC, 2013; Figura 5.14). También se ha registrado una reducción en el rendimiento de los cultivos de arroz y la soya, aunque en menor nivel. De seguir esta tendencia, o intensificarse, podría poner en riesgo la seguridad alimentaria de muchos países, o bien, encarecer estos productos a tal nivel que se vuelvan inaccesibles para amplios sectores de la población, pues se tienen documentados incrementos en los precios de alimentos y cereales después de eventos climáticos extremos en las regiones donde se producen.

La biodiversidad también ha sido afectada por el cambio climático, ya que la distribución de las especies es determinada, entre otros factores, por el clima. 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 muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas se tienen registros de modificaciones en sus áreas de distribución geográfica, patrones de migración e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático actual (IPCC, 2013; Figura 5.14). En los arrecifes de coral, se tienen registros de eventos de blanqueamiento, así como cambios en las áreas de distribución de especies de invertebrados, peces, insectos, aves y plantas; también se han observado cambios en las épocas de floración en muchas especies de plantas y el anticipo en la llegada y reproducción de aves migratorias.

En cuestión de salud humana, los efectos se han documentado como incrementos de la mortalidad asociada a eventos de calor extremo. En la Federación de Rusia, por ejemplo, en 2010 murieron alrededor de 55 mil personas por la onda de calor registrada ese año (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 5.14).

Cambios en la temperatura

La temperatura del planeta se ha elevado. 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, 2013). A este fenómeno de incremento global de temperatura se le conoce como "calentamiento global" y es una de las evidencias más contundentes de la existencia del cambio climático. De acuerdo con mediciones recientes publicadas por la NASA, en el año 2015 se registró la mayor desviación de temperatura (0.86 °C) respecto a la media del periodo 1951-1980 (Figura 5.15; IB 1.2-5).



El incremento de la temperatura no ha sido homogéneo en todas las regiones del planeta (Figura 5.16). 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 norteñas de la parte europea de la Federación 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 1 400 años, el cual ha generado un aumento en la frecuencia de ondas de calor en Europa, Asia y Australia (IPCC, 2013).

En la Figura 5.16 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 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>15</sup>.

La temperatura promedio del permafrost<sup>16</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

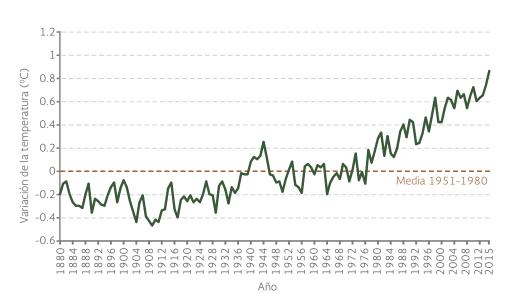


Figura 5.15 | Variación de la temperatura global, 1880 - 2015<sup>1</sup>

#### Nota:

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

#### Fuente

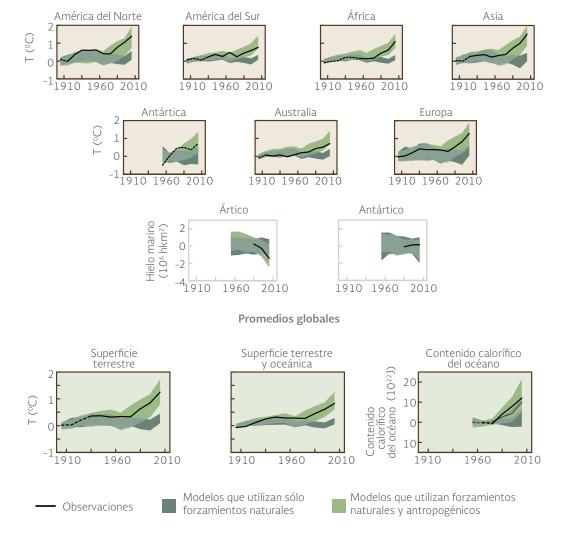
NASA. GISS Surface Temperature Analysis. Global Annual Mean Surface Air Temperature Change. Global Land-Ocean Surface Temperature Anomaly (Base: 1951-1980). 2014. Disponible en: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\_v3/. Fecha de consulta: mayo de 2016.

<sup>15</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.

 $<sup>^{16}</sup>$  Se refiere a la capa del suelo permanentemente congelado en las regiones muy frías.

de la Federación 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 bióxido 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

Figura 5.16 | 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



### Notas:

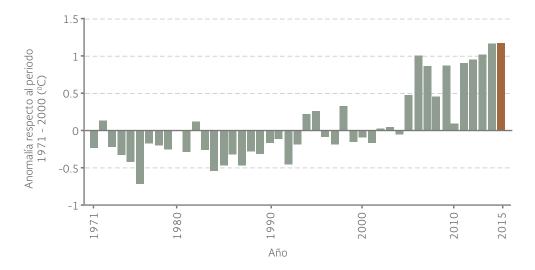
### Fuente:

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. United Kingdom y USA. 2013.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Los cambios de temperatura se muestran en los gráficos negros (la anomalía es respecto al periodo 1880-1919), la extensión del hielo marino en los gráficos blancos (respecto a 1979-1999 y sólo para el mes de septiembre).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Las gráficas muestran los cambios en temperatura utilizando dos tipos de modelos. Estos cambios difieren si se emplean sólo 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.

Figura 5.17 | Anomalía de la temperatura media anual en México, 1971 - 2015



Nota:

La barra café corresponde a la anomalía estimada en 2015.

Fuente

Conagua. Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2015. Conagua. México. 2015.

Ambiente (PNUMA), el deshielo del permafrost podría emitir entre 43 y 135 gigatoneladas de  $CO_2$  equivalente en 2100 y entre 246 y 415 para el año 2200 (UNEP, 2012). 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).

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 de los 21.4 °C (con excepción del año 2010), valor por arriba del promedio anual de temperatura registrado en el periodo 1971-2011 que alcanzó 20.9 °C. Si se analizan las anomalías de temperatura nacionales se observa que entre 2006 y 2015 la temperatura nacional estuvo más de medio grado centígrado por arriba del promedio del periodo 1971-2000, con excepción de los años 2008 y 2010 (Figura 5.17). Se estima además que la temperatura media nacional durante 2015 fue de 22.1 °C, valor 1.1 °C por arriba del periodo 1981-2010, con lo que se convierte junto con 2014 como los más cálidos desde 1971 (Conagua, 2015).

<sup>17</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).

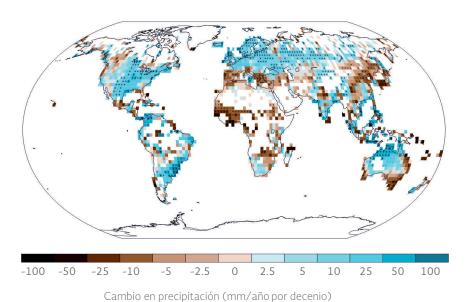
El incremento de temperatura nacional no ha sido homogéneo a lo largo del territorio. Por ejemplo, en 2015 los promedios de la temperatura media más altos (de entre 30 y 35 °C) de temperatura media anual se registraron en la vertiente del Pacífico desde Chiapas hasta Baja California Sur y en el Golfo de México y el Caribe. Los promedios más bajos (10 a 15 °C) se concentraron en el sur de Chihuahua y norte de Durango (Conagua, 2015).

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 occidental murieron 72 210 personas durante la ola de calor de 2003, en la Federación de Rusia la cifra alcanzó alrededor de 55 mil personas y en Perú 339 el mismo año (WMO, 2014).

# Cambios en los patrones de precipitación

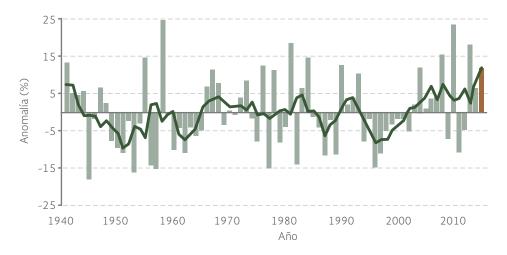
Las variaciones en los patrones de precipitación a nivel global y nacional representan otra alteración del sistema climático. De acuerdo con el IPCC, a partir de 1976 la humedad superficial aumentó en estrecha relación con las temperaturas más altas tanto terrestres como oceánicas. El vapor de agua total 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 5.18; IPCC, 2007b, 2008 y 2013).





IPCC. Summary for Policymarkers Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom y USA. 2013.

Figura 5.19 | Anomalía de la precipitación anual en México, 1941 - 2015



Nota:

La barra café corresponde a la anomalía nacional estimada en 2015 y la línea verde obscuro a la media móvil de cinco años.

Fuente:

Conagua. Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2015. México. 2015.

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 5.19). 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.

Incremento del nivel del mar

La elevación del nivel del mar es otro de los efectos conocidos del cambio climático y se ha originado tanto por la expansión de los cuerpos de agua marina al calentarse (los océanos han absorbido alrededor del 90% del calor que se ha adicionado al sistema climático; IPCC, 2013), como por el agua que se derrite de glaciares y otros mantos de hielo y alcanza los mares. 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 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 1993-2016, la tasa de incremento del nivel global del mar fue de 3.42 milímetros anuales, con un incremento total estimado de 7.45 centímetros hasta enero de 2016 (Figura 5.20).

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 5.21). En el Pacífico sobresalieron Guaymas, Sonora y Manzanillo, Colima, con incrementos anuales de 4.23 y 3.28 milímetros, respectivamente (INE et al., 2008).

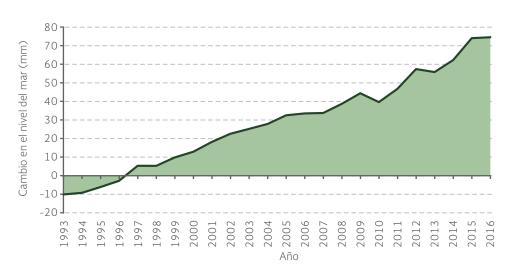


Figura 5.20 | Cambio en el nivel medio global del mar, 1993 - 2016<sup>1</sup>

Nota:

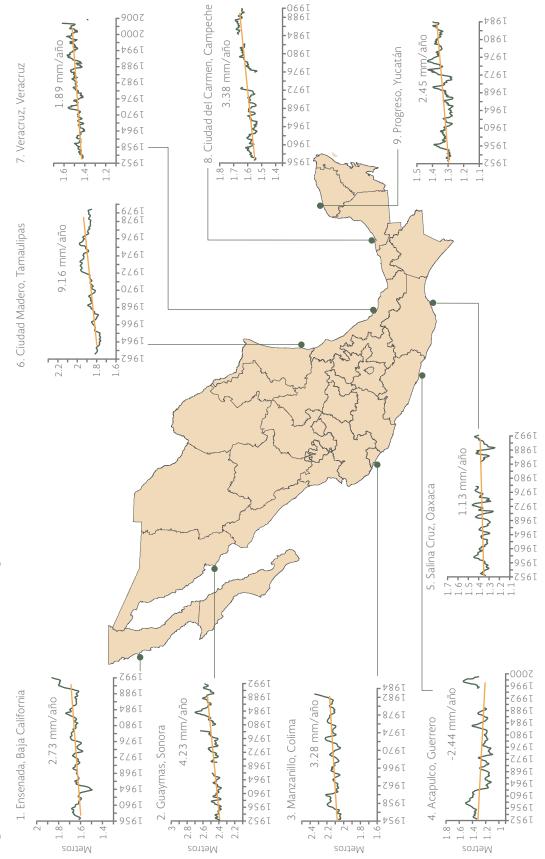
<sup>1</sup> Los datos corresponden al mes de diciembre. El dato de 2016 corresponde a mes de enero.

NASA. Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. Sea Level. NASA. 2015. Disponible en: http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/. Fecha de consulta: mayo de 2016.

## Deshielos

El deshielo de los glaciares y casquetes polares es otra consecuencia del cambio climático. 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 en las seis décadas pasadas, lo que significa

Figura 5.21 | Variación del nivel del mar en algunos sitios de los litorales mexicanos



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.

que el volumen perdido de hielo fue mayor al volumen acumulado. La pérdida acumulada de espesor del hielo en 2005 fue de aproximadamente 15 metros de agua equivalente (mae)<sup>18</sup> respecto al año 1980 (UNEP y WGMS, 2008).

El incremento de temperatura provoca el derretimiento de los glaciares en diversas partes del planeta. De acuerdo con el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, en el periodo 1993-2009 se registró una pérdida importante de hielo de los glaciares a nivel global (mayor detalle en la Figura 5.16 de la sección Cambios en la temperatura).

En el caso de Antártica, destaca la pérdida del hielo de la plataforma Larsen B que actualmente cubre una superficie aproximada de 1 600 km². 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).

La Figura 5.22 muestra la extensión del hielo marino en el Ártico en distintos periodos; en 2015 la extensión (14 millones de km² en promedio) fue menor que en el 2012 y que la extensión promedio del periodo 1981-2010 (14.8 millones de km²). De acuerdo con registros del Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo (NSIDC, por sus siglas en inglés), en abril de 2015 se perdieron 862 mil kilómetros cuadrados de hielo ártico (NSIDC, 2015).

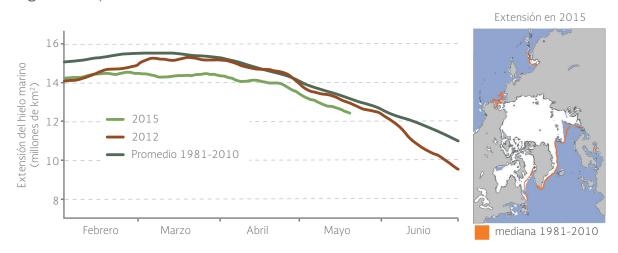
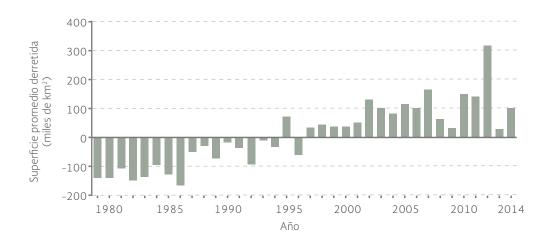


Figura 5.22 | Reducción en la extensión de hielo marino en el Ártico, 1981 - 2015

Fuente: NSDIC. Arctic Sea Ice News & Analysis. NSDIC. 2015. Disponible en: http://nsidc.org/arcticseaicenews/. Fecha de consulta: mayo de 2015.

<sup>18</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 5.23** | Superficie de hielo perdida en Groenlandia de junio a agosto de cada año<sup>1</sup>, 1979 - 2014



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. 2015. Disponible en: http://nsidc.org/. Fecha de consulta: mayo de 2015

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 2014 fue de alrededor de 100 mil kilómetros por arriba del promedio de 1981-2010 (Figura 5.23; NASA, 2015).

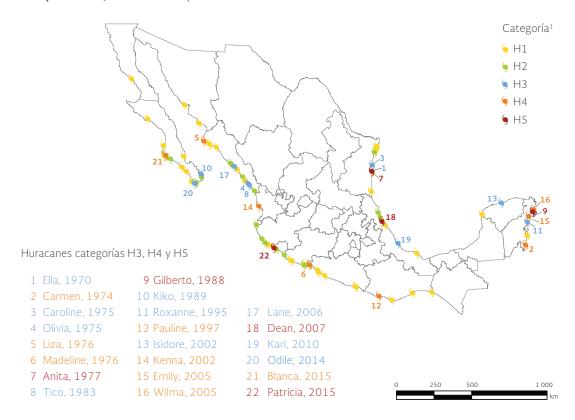
Los deshielos también han afectado a los glaciares de montaña: en el 2006 perdieron 402 gigatoneladas de agua en promedio (NASA, 2011). Se ha documentado también un retroceso de los glaciares alpinos, escandinavos, islandeses, andinos y aquellos de regiones occidentales y septentrionales de América del 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 Popocatépetl 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).

Los asentamientos humanos también se verían afectados por los deshielos. 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 escorrentía (IPCC, 2007b).

Entre los posibles efectos del cambio climático están la variación en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como los ciclones y las sequías. 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.

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 5.14 muestra los huracanes que han entrado a las costas nacionales entre 1970 y 2015.

Mapa 5.14 | Ciclones tropicales en México, 1970 - 2015



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

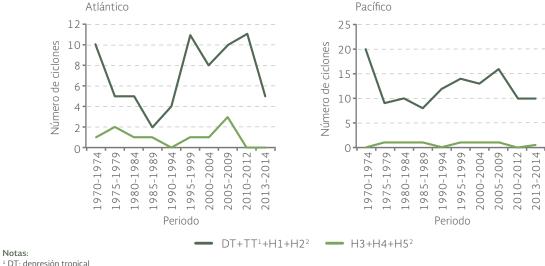
### Fuente:

Elaboración propia con datos de:

Conagua, Semarnat. Atlas del Agua en México 2015. Biblioteca Mexicana del Conocimiento. México 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 2010 (Figura 5.24). 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, s/a). 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).

Figura 5.24 | Ciclones tropicales que han impactado México, 1970 - 2014



<sup>1</sup> DT: depresión tropical TT: tormenta tropical

Fuente:

Conagua. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN). Conagua. México. 2015.

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, 2015). Algunos de los más recientes son los de Tangancícuaro, Michoacán (2014), San Cristóbal de las Casas, Chiapas (2014) y el de Acatlán, Hidalgo (2015).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> H1, 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.

En mayo de 2015, Ciudad Acuña, en Coahuila, fue impactada por un tornado categoría EF3 (escala Fujita mejorada<sup>19</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, 2015).

Seguías

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).

Según el IPCC, a partir de 1970 se han registrado sequías más intensas y largas en los trópicos y subtrópicos (IPCC, 2007, 2014). En México, durante el siglo XX se registraron cuatro grandes periodos de sequía: 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, SEGOB, 2001). Recientemente se presentaron severos periodos de sequía entre 2000 y 2003, en 2006, entre 2007 y 2008, en 2009 y entre 2010 y 2012 (Figura 5.25). En mayo de 2011, más del 90% de la superficie del país se consideraba afectada por la sequía. En 2014 y 2015 el porcentaje de superficie afectada fue menor al 50% de la superficie nacional.

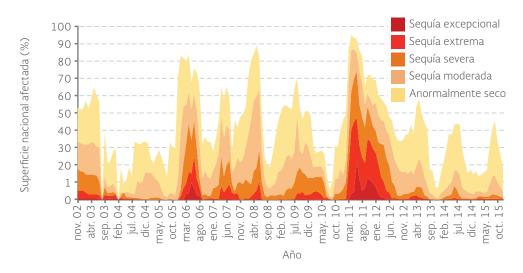


Figura 5.25 | Superficie nacional afectada por sequía en México, 2002 - 2015

Fuente:

Conagua. Monitor de Sequía de México. Servicio Meteorológico Nacional. Conagua. México. Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\_content&view= article&id=20&ltemid=74. Fecha de consulta: mayo de 2016.

<sup>&</sup>lt;sup>19</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 EFO al EFS y que ascienden en la intensidad de los daños.

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>20</sup>, principalmente en la mitad norte del país y en casi la totalidad de la península de Yucatán (Figura 5.26). La superficie afectada por cinco y seis años de sequías extremas y severa fue de tan solo del 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

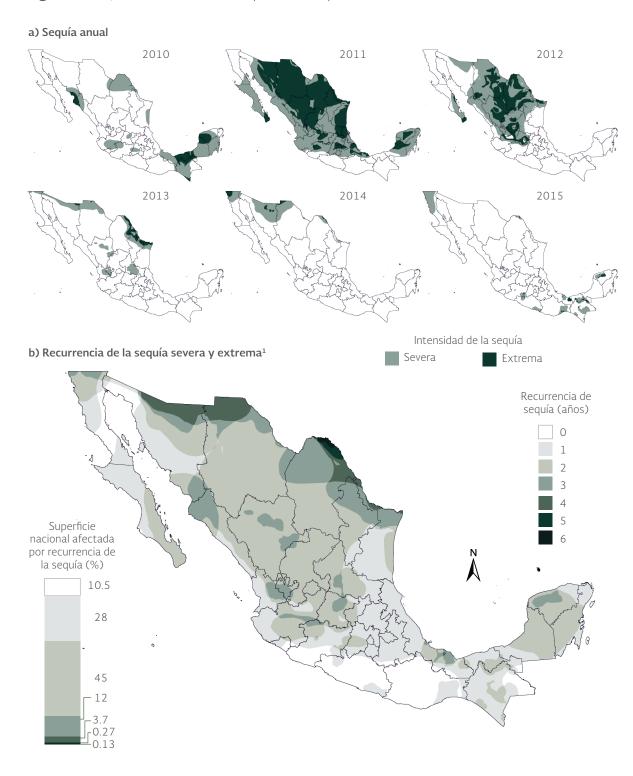
El clima es uno de los principales factores que determinan los patrones de vegetación, estructura y composición florística y faunística. En la actualidad contamos con información relevante que demuestra los efectos del cambio climático global sobre las especies y sus ecosistemas (ver IPCC, 2013). En 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).

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

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> El número de años de recurrencia de sequía no necesariamente corresponde a años consecutivos.

Figura 5.26 | Recurrencia de las sequías severa y extrema en México, 2010 - 2015



## Nota:

<sup>1</sup> La intensidad de la sequía es con base al Monitor de Sequía de América del Norte (NADM).

## Fuente:

Elaboración propia con datos de:

Semarnat, Conagua. Monitor de Sequía en México. Semarnat, Conagua. México. Junio 2016.

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 GEL

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  ${\rm CO_2}^{21}$  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  ${\rm CO_2}$  se enfocan principalmente en las generadas por el consumo y quema de combustibles fósiles.

Figura 5.27 | Emisión mundial de CO, por consumo de combustibles fósiles, 1971 - 2013<sup>1</sup>



Nota:

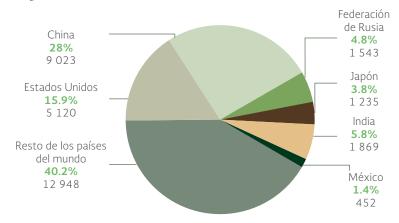
<sup>1</sup> No incluye las emisiones de búnkeres internacionales

Fuente

IEA. CO, Emissions from Fuel Combustion. Highlights. 2015 Edition. IEA. France. 2015.

<sup>&</sup>lt;sup>21</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 10 (1.3-1.5 Wm<sup>-2</sup>) y el notable incremento de su concentración en la atmósfera (IPCC, 2013).

Contribución de los principales países emisores y México a la emisión mundial de Figura 5.28 CO<sub>2</sub> por consumo y quema de combustibles fósiles, 2013<sup>1</sup>



## Notas:

- <sup>1</sup> No incluye las emisiones de bunkers internacionales
- <sup>2</sup> Millones de toneladas de bióxido de carbono y porcentaje.

IEA. CO, Emissions from Fuel Combustion. 2015. IEA. France. 2015. Disponible en: www.iea.org/media/freepublications/stats/CO2Highlights2015Exceltables. xls. Fecha de consulta: agosto de 2016.

Durante el periodo 1971-2013, la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 130% (Figura 5.27; IB 1.2-1). De acuerdo con el último informe publicado por 🚖 la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en el año 2013, cinco países fueron responsables del 58.4% del CO, emitido a nivel mundial por consumo y quema de combustibles fósiles: Estados Unidos, China, Federación de Rusia, Japón e India, en conjunto emitieron 18 790 millones de toneladas de un total de 32.2 mil millones generadas en el planeta (Figura 5.28). Entre estos países, destacan China y Estados Unidos, responsables de 28 y 15.9% de las emisiones en el planeta en ese año, respectivamente. La contribución de México a las emisiones globales en 2013 fue de 1.4%, ubicándolo entre los primeros quince países por su volumen de emisión (Figuras 5.28 y 5.29). Si se considera la emisión de bióxido de carbono en el contexto regional sobresalen Asia, Norteamérica y Europa.

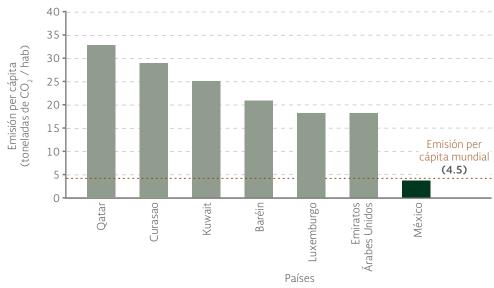
Las emisiones también se pueden analizar a nivel per cápita con el fin de evaluar la posible contribución promedio de cada habitante a la emisión de CO<sub>2</sub>. A nivel mundial en 2013, destacaron Qatar (33.4 toneladas de CO, por habitante), Curasao (28.9), Kuwait (25), Baréin (21.2) y Luxemburgo y los Emiratos Árabes Unidos (cada uno con 17.9) como los seis principales emisores por habitante, con volúmenes que representaron entre cuatro y siete veces la emisión per cápita mundial (4.5 toneladas de CO<sub>2</sub> por habitante; Figura 5.29; IEA, 2015). En el caso de México, el valor varía ligeramente dependiendo de la fuente de datos, entre 3.46 (INECC, Semarnat, 2015) y 3.82 toneladas de CO<sub>2</sub> por consumo de combustibles fósiles por habitante (IEA, 2015). Estas cifras lo ubican en el lugar 69 a nivel mundial y como el más bajo dentro de los países de la OCDE (9.6 toneladas por persona), muy por debajo de la cifra de Luxemburgo (17.9), Australia (16.7) y Estados Unidos (16.2; IEA, 2015).

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 (2015), la intensidad de



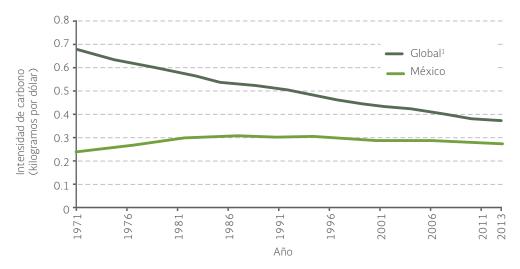
carbono global<sup>22</sup> se redujo 27.8% entre 1990 y 2013, alcanzando en este último año un valor de 0.37 kilogramos por dólar<sup>23</sup> (IEA, 2015). En el caso de México, la misma fuente reporta una reducción de la intensidad de carbono, en el mismo periodo, de 0.3 a 0.28 kilogramos por dólar, lo que representa una reducción de 6.6% (Figura 5.30).

Figura 5.29 | Emisión per cápita de CO<sub>2</sub> en algunos países y México, 2013



Fuente: IEA. CO, Emissions from Fuel Combustion. 2015 Edition. IEA. France. 2015.

Figura 5.30 | Intensidad de carbono global y en México, 1971 - 2013



Nota:

<sup>1</sup> Sólo considera las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles.

Fuente

 ${\sf IEA.\,CO_{2}\it Emissions}\ from\ Fuel\ Combustion.\ Highlights.\ 2015\ Edition.\ IEA.\ France.\ 2015.$ 

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Considerando exclusivamente la quema de combustibles fósiles.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> Considerando el poder de paridad de compra y dólares a precios de 2005.

En México, los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero se han publicado regularmente como parte de las Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. La primera de ellas se presentó en 1997 con datos de emisiones de 1990. Desde entonces se han publicado otras cuatro Comunicaciones con sus respectivos inventarios (Tabla 5.2).

En marzo de 2015, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) presentó al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos<sup>24</sup> de Efecto Invernadero (INEGyCEI 2013). En octubre del mismo año, el INECC publicó el INEGyCEI como parte del Primer Informe Bienal de Actualización (BUR, por sus siglas en inglés) ante la Convención Marco de las Naciones Unidas de Cambio Climático. El INEGyCEI

Comunicaciones Nacionales de México ante la convención Marco de las Naciones Tabla 5.2 Unidas sobre el Cambio Climático

Comunicación y fecha de publicación	Periodo de datos reportados en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero	Descripción	
Primera, 1997	1990	-Primera estimación nacional de las emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI)Incluye una visión general de las circuntancias nacionales respecto al cambio climático y los avances y resultados de los primeros estudios de vulnerabilidad del país ante el cambio climático.	
Segunda, 2001	1994, 1996 y 1998	-Actualización del inventario nacional. -Las emisiones de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura sólo presentaron datos para 1996. -Incluyó escenarios de emisiones de GEI futuras.	
Tercera, 2006	1990 a 2002	-Acualización y recálculo del inventario nacional. -Las emisiones de uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura consideran el periodo 1993-2002.	
Cuarta, 2009	1990 a 2006	-Incluye los avances nacionales en materia de cambio climático a partir de la publicación de la Tercera Comunicación. -Actualización y recálculo del inventario nacional.	
Quinta, 2012	1990 a 2010	-Incluye los avances nacionales en materia de cambio climático entre la Cuarta y Quinta Comunicaciones Nacionales. -Incorpora el tema de cambio climático en ciudades. -Actualización y recálculo del inventario nacional.	

### Fuentes:

Semarnat. Comunicaciones Nacionales de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Primera a Quinta). Semarnat. México, 1997 a 2012.

Semarnat. Cambio Climático: una reflexión desde México. Semarnat. México. 2012.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> La Ley General de Cambio Climático establece que además de los Gases de Efecto Invernadero, el Inventario también deberá cuantificar los compuestos de efecto invernadero, por lo que en 2013 se incluyeron las cuantificaciones de las emisiones de carbono negro.

2013 fue elaborado con un enfoque metodológico distinto a los inventarios presentados en las Comunicaciones Nacionales anteriormente presentadas. Este enfoque permitió contar con información de datos más puntual, precisa y desagregada; también empleó, en la medida de lo posible, factores de emisión acordes a la realidad nacional y por lo tanto una mejor precisión sobre las emisiones nacionales.

El cambio en la metodología utilizado en la elaboración del Inventario 2013 modificó, y en este caso de manera significativa, la estimación del total de emisiones de gases de efecto invernadero reportada en inventarios anteriores (realizados con métodos básicos, así como con información nacional agrupada por tipo de datos de actividad, como tipo de combustible o producción y uso de factores de emisión por defecto del IPCC). Como resultado, la información de emisiones correspondiente al año 2013 no es comparable con la serie histórica que se presentó en la Quinta Comunicación Nacional, por lo que no debe interpretarse como la actualización de la serie 1990-2012 que se presenta en el BUR. Las emisiones de la serie histórica no fueron estimadas con el enfoque metodológico del 2013, por falta de información confiable y completa para estos años. Para mayores detalles respecto a las emisiones nacionales derivadas de ambas metodologías, consultar el recuadro de Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en México.

De acuerdo con el INEGyCEI 2013, elaborado con datos de 2013 y la metodología revisada, las emisiones totales de CO<sub>2</sub>equivalente<sup>25</sup> en ese año fueron de 665 Mt. Las fuentes móviles, principalmente el autotransporte (26.2%) y la generación de energía eléctrica (19%) fueron los sectores que más contribuyeron al total de emisiones. Le siguen en importancia el sector industrial (17.3%), el de petróleo y gas (12.1%) y el agropecuario (12%), aunque en este último caso, resalta su contribución a la generación de metano. Las emisiones atribuibles a los residuos y al uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura no sobrepasaron el 5% cada una (Figura 5.31).

En términos de la composición de las emisiones totales de los GEI, el CO<sub>2</sub> fue el gas de mayor generación (499.7 Mt, 75.1%), seguido por el metano (19%) y el óxido nitroso (4.5%). En este Inventario también se estimó por primera vez la cantidad de CO, absorbido por la vegetación natural del país (especialmente bosques y selvas), que ascendió a 173 Mt. El balance de las emisiones y absorciones de GEI muestra que en 2013 la emisión neta del país fue de 492 Mt de CO<sub>2</sub> equivalente (Figura 5.31).

Adicionalmente a la estimación de las emisiones de GEI, también se calcularon las emisiones del carbono negro (CN)<sup>26</sup>, un compuesto climático de vida corta (CCVC). Para más detalles

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> CO, equivalente (CO, e) corresponde al volumen de bióxido de carbono que causa el mismo forzamiento radiativo que una mezcla determinada de gases de efecto invernadero. El equivalente de bióxido de carbono para un gas determinado se calcula multiplicando el volumen de dicho gas por su potencial de calentamiento. El potencial de calentamiento de los GEI se establece con base en el potencial de calentamiento del bióxido de carbono, al que se le ha asignado un potencial de calentamiento equivalente a la unidad (IPCC, 2013).

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> El carbono negro es un agregado de partículas microscópicas (un porcentaje de las PM<sub>25</sub>) con un núcleo de carbono que puede estar rodeado de otros compuestos orgánicos, sulfatos y nitratos

-173 Mt de CO, .....492 Mt de CO,e

Figura 5.31 | Emisiones de gases de efecto invernadero nacionales, 2013

Fuente: INECC y Semarnat. 2015. Primer Informe Bienal ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, Semarnat. México.

# Recuadro

# Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en México

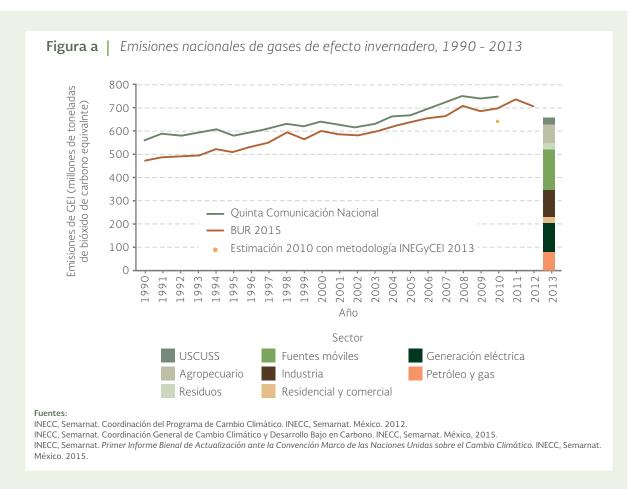
Los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero en el país han sido calculados utilizando diferentes metodologías que pretenden obtener cada vez mejores estimaciones y mayores detalles respecto a las fuentes de emisión. Su publicación responde al compromiso internacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar a la Conferencia de las Partes los inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero (GEI) no controlados por el Protocolo de Montreal (INECC, 2013).

La primera estimación nacional empleó datos del año 1990; formó parte de la Primera Comunicación Nacional (1997) ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Para la Segunda Comunicación (2001) se calcularon las emisiones de los años 1994, 1996 y 1998 con la metodología revisada en 1996 por el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En 2006, la Tercera Comunicación Nacional incluyó nuevos cálculos para el periodo 1990-2002. La Cuarta Comunicación Nacional (2009) presentó datos para el periodo 1990-2006 y a finales de 2012 se publicó la Quinta Comunicación Nacional con datos de la serie histórica para el periodo 1990-2010 (Figura a).

En el año 2015 se presentó la actualización del INEGEI con mejoras metodológicas con respecto a inventarios anteriores. Con la nueva metodología empleada se calculó, hasta donde la información de los sectores lo permitió, las emisiones de GEI para la serie histórica 1990-2012¹, la cual se publicó como parte del Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (BUR, por sus siglas en inglés; Figura a).

El Inventario más reciente corresponde a las emisiones nacionales del año 2013 (INECC-Semarnat, 2015). El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) 2013 fue elaborado con un enfoque metodológico distinto a los inventarios presentados en las Comunicaciones Nacionales anteriormente. Este enfoque permitió contar con información de datos más puntual, precisa y desagregada; y empleó, en la medida de lo posible, factores de emisión acordes a la realidad nacional, por lo que da una información más realista de las emisiones nacionales.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Esta serie comprende las estimaciones de las emisiones por fuentes y sumideros para el periodo 1990- 2012 en cinco de las seis categorías de emisión definidas por el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés): energía (categoría 1), procesos industriales (2), agricultura (4), USCUSS (5) y desechos (6). De la categoría de solventes (3) no se presentan resultados. Respecto a los GEI, consideró los incluidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto: CO<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>3</sub>O, HFC, SF<sub>6</sub> y perfluorocarbonos (PFC). La serie se reporta con el Potencial de Calentamiento Global a 100 años (PCG100) contenido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (ARS, por sus siglas en inglés).



Este nuevo inventario incluye la estimación de las emisiones por fuentes y sumideros para los sectores: 1) generación eléctrica, 2) petróleo y gas, 3) fuentes móviles de autotransporte y no carreteras, 4) industria, 5) agropecuario, 6) uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS), 7) residuos y 8) residencial y comercial. Los GEI que se incluyeron fueron el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>2</sub>). Dada la importancia del carbono negro (CN), el INEGyCEI 2013 también incluyó estimaciones de sus emisiones para los sectores mencionados.

De acuerdo con este inventario, la emisión nacional de gases y compuestos de efecto invernadero en 2013 fue de 665 mil toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Las actividades con mayor emisión de GEI fueron en ese año las fuentes móviles (26%), la generación de energía eléctrica (19%) y las industriales (17%; Figura a)<sup>2</sup>.

Debido a que el cambio de metodología empleado en este nuevo inventario no permite una comparación directa válida con las cifras reportadas en inventarios anteriores (esto es, no es

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Para mayores detalles de la emisión de GEI por los distintos sectores considerados en el inventario de 2013, referirse al texto principal de la sección de Emisiones

correcto interpretar los cambios observados entre los años 2012 y 2013 como cambios reales en las emisiones), se hizo un ejercicio para evaluar de qué magnitud era el cambio en las cifras reportadas atribuibles simplemente al cambio de método y no a variaciones temporales reales de las emisiones nacionales. Empleando el método del INEGyCEI 2013 (hasta donde las fuentes de información lo permitieron) se encontró que las emisiones estimadas del año 2010 serían aproximadamente 7% menores que las estimadas para el BUR e inferiores en poco menos del 15% a las reportadas en la Quinta Comunicación Nacional para ese mismo año.

La información del INEGEYCEI 2013 sirvió como base para la elaboración de la Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (iNDC, por sus siglas en inglés) que México presentó ante la CMNUCC en el primer trimestre del 2015 como parte de los preparativos para la vigésimo primera sesión de la Conferencia de las Partes (COP21) de la CMNUCC.

#### Referencias:

INECC, Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. INECC Semarnat. México. 2013.

INECC, Semarnat. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, Semarnat. México. 2015.

Tabla 5.3 Emisiones nacionales de carbono negro (CN) por sector, 2013

Sectores		Emisión (Gg)
Petróleo y gas		2.17
Generación eléctrica	8.46	
Residencial y comercial	19.01	
Industria <sup>1</sup>	35.42	
Fuentes móviles	47.34	
Residuos <sup>2</sup>		0.23
Agropecuario		8.86
USCUSS <sup>3</sup>		3.61
	Total	125.1

La suma de los parciales pueden no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras.

## Fuentes:

INECC, Semarnat. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, Semarnat. México. 2015.

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 INECC, en el año 2013 se generaron en el país 125.1 Gg de CN, siendo el sector de las fuentes móviles el que más contribuyó, con cerca el 37.8% (47.3 Gg) de las emisiones totales; le siguieron en importancia el sector industrial con 28.3% (35.42 Gg, principalmente por la quema de bagazo en ingenios azucareros) y el sector residencial y comercio con 15.2% (19.01 Gg; Tabla 5.3).

<sup>1</sup> Principalmente de la quema de bagazo en los ingenios azucareros.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Incluye quema a cielo abierto de RSU y la incineración de residuos peligrosos.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Por los incendios forestales.

#### La importancia del carbono negro en el calentamiento global Recuadro

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 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.

Aun cuando existe en la actualidad una importante incertidumbre en la comunidad científica acerca del potencial de calentamiento real de este contaminante (Figura 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>.

Estimaciones del potencial de calentamiento global (PCG) del carbono negro (CN)<sup>1</sup> y el carbono orgánico (CO)<sup>2</sup> a 20 y 100 años

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

### Notas:

- <sup>1</sup> CN: Carbono negro
- CO: Carbono orgánico
- <sup>2</sup> a Fuglestvedt 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 (as also given in Fry et al., 2012). Only aerosol-radiation is included

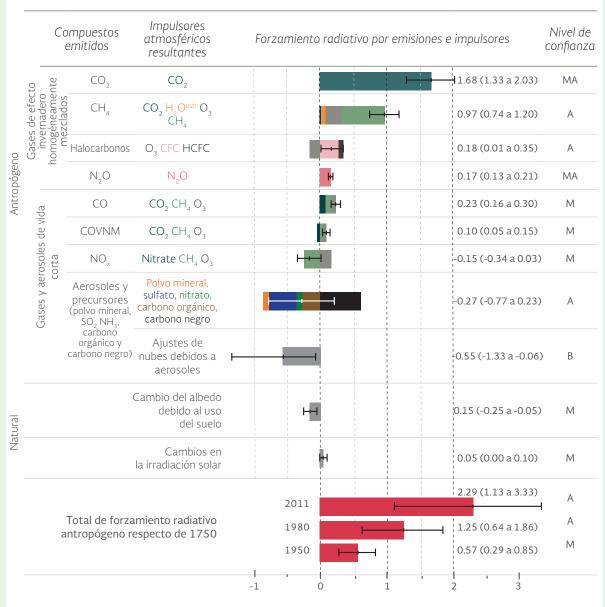
## Fuente:

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.

<sup>&</sup>lt;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, 18 October. (2007).

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



## Forzamiento radiativo respecto de 1750 (W/m²)

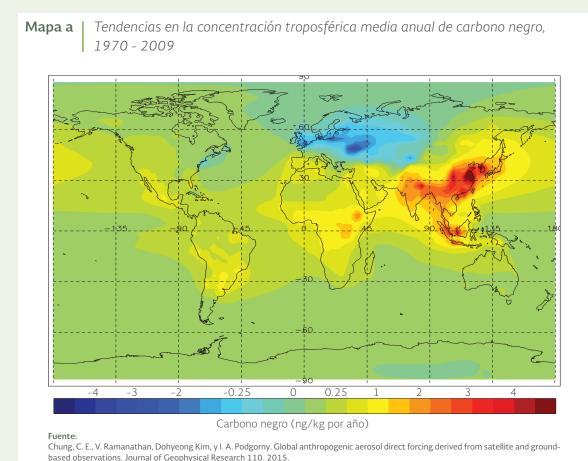
Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático. Los valores son el forzamiento radiativo medio global 14, dividido de acuerdo con los compuestos emitidos o procesos que resultan en una combinación de impulsores. 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/m², 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/m²). 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.

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. En: Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom y New York.

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 Suramérica y gran parte del territorio mexicano.

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:

Fuente:

Modificado de:

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

Existen otros gases de efecto invernadero que, a pesar de que son emitidos en mucho menor volumen que el CO2, contribuyen de manera significativa al calentamiento global debido a su acción combinada de tiempo de permanencia en la atmósfera y de retención de calor. Por ejemplo, los clorofluorocarbonos (CFC) que también destruyen la capa de ozono estratosférico pueden permanecer en la atmósfera hasta 1 700 años, mientras que los fluorocarbonos lo pueden hacer por 50 mil años. En lo que respecta a su retención de calor, los halocarbonos, que incluyen halones y CFC, tienen un forzamiento radiativo<sup>27</sup> de 0.18 Wm<sup>-2</sup>, que es equivalente al 13% del forzamiento radiativo de todos los GEI mezclados mundialmente (IPCC, 2007a; 2013).

Las emisiones totales de GEI 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 México, la intensidad de emisiones en 2013 fue de 0.049 kilogramos de CO₂e por cada peso producido. En el mismo año, cada mexicano emitió alrededor de 6.04 toneladas de CO<sub>2</sub>e considerando el total de emisiones nacionales de GEI. Para mayor detalle sobre las tendencias históricas de emisión per cápita y por PIB a nivel nacional, se sugiere ver la sección de Efectos ambientales de la producción y el consumo del capítulo de Población y medio ambiente.

Los gases de efecto invernadero en la atmósfera

La constante y creciente emisión de GEI ha causado su acumulación y el aumento de su concentración en la atmósfera; la vegetación y los cuerpos de agua, sus sitios naturales de absorción (llamados "sumideros"), no han sido suficientes para capturar la totalidad de las emisiones antropogénicas. Los registros históricos, que incluyen mediciones directas<sup>28</sup> y registros a partir de muestras conocidas como "testigos de hielo"29, 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 5.32; IB 1.2-4). Mientras que la concentración preindustrial de CO, fue de alrededor de 280 partes por millón (ppm), en 2014 alcanzó 398 ppm (lo que significa un incremento de cerca del 43%) y en 2015 rebasó el umbral de las 400 ppm.

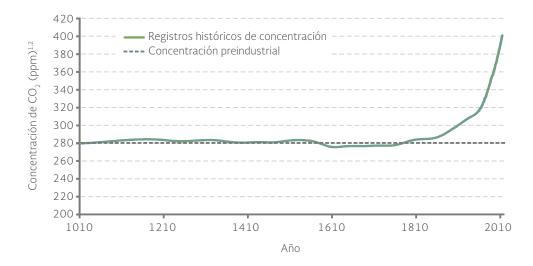
Otros gases, como el óxido nitroso (N3O) y el metano (CH4) también han aumentado significativamente su concentración en la atmósfera en los últimos años. Sus concentraciones preindustriales fueron, respectivamente, de 270 y 715 partes por mil millones (ppmm). Entre 1979 y 2015, la concentración de óxido nitroso creció 9.5% (pasó de 300.2 a 328.6 ppmm), mientras que en el caso del metano lo hizo en 11.5% entre 1984 y 2015 (1 644.6 a 1 834 ppmm; Figura 5.33). Sus concentraciones de 2015 fueron, respecto a la época preindustrial, mayores en 21.7% para el caso del óxido nitroso y de 156.5% para el metano.

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Índice del peso del factor (en este caso el CO<sub>2</sub>) como mecanismo potencial de cambio climático. Se refiere al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie terrestre, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.

<sup>28</sup> Debido a que el CO2 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>&</sup>lt;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.

Figura 5.32 | Concentración global atmosférica de bióxido de carbono, 1010 - 2015



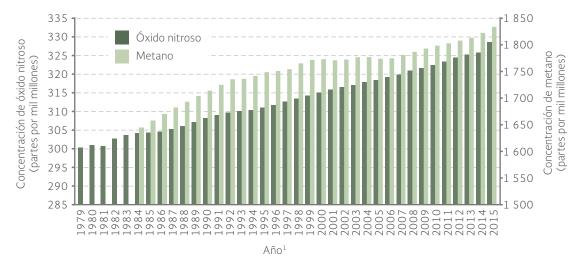
#### Notas

#### Fuentes

Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds y R.J. Francey. 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, M. Wahlen, T.P. Whorf, M. Heimann y H.A. Meijer. Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and 13CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects. SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps. Institution of Oceanography. En: Scripps CO<sub>2</sub> Program. Atmospheric CO<sub>2</sub>, Disponible en: http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric\_co2.html. Fecha de consulta: mayo de 2016.

Figura 5.33 | Concentración global atmosférica de óxido nitroso y metano, 1979 - 2015



### Nota:

<sup>1</sup> Los datos para metano son preliminares para 2015.

## Fuentes:

CDIAC. Atmospheric Trace Gas Measurements. CDIAC. Disponible en: http://cdiac.ornl.gov/. Fecha de consulta: mayo de 2016.
World Resources Institute. Climate and Atmosphere Searchable Database. EarthTrends. The Environmental Information Portal. 2008. Disponible en: http://earthtrends.wri.org/index.cfm. Fecha de consulta: noviembre de 2011.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> La concentración histórica de bióxido de carbono proviene de registros de muestras de hielo (1010-1955) y de mediciones directas de la atmósfera (1959-2015).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> La concentración preindustrial fue de alrededor de 280 ppm de acuerdo con el IPCC.

El aumento de la concentración de GEl causa un incremento en la retención de calor en la atmósfera. Se ha estimado que el  $\rm CO_2$  es responsable de cerca del 60% del efecto invernadero acumulado desde el siglo XVIII, el  $\rm CH_4$  del 20%, el  $\rm N_2O$  del 6% y los halocarbonos del 14% (PNUMA, 2002; IPCC, 2007a). El forzamiento radiativo del  $\rm CO_2$  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  $\rm CO_2$ ,  $\rm CH_4$ ,  $\rm N_2O$  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 mil años.

# IMPACTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Escenarios globales y en México

Para diseñar políticas públicas de mitigación y adaptación al cambio climático es fundamental contar con escenarios del clima en el futuro. Esto permite 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, 2015). 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>30</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>31</sup>; y el RCP8.5<sup>32</sup>, un escenario cuya trayectoria correspondería a la ausencia de esfuerzos adicionales para limitar las emisiones de GEI<sup>33</sup>.

En el caso de la temperatura superficial, según las proyecciones es *probable* que para finales de este siglo (2081-2100) aumente en 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 5.34a; IPCC, 2015). Según el IPCC (2015), 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.

<sup>&</sup>lt;sup>30</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 Wm² 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 a una menor emisión y concentración de GEI en la atmósfera en comparación con el escenario RCP8.5.

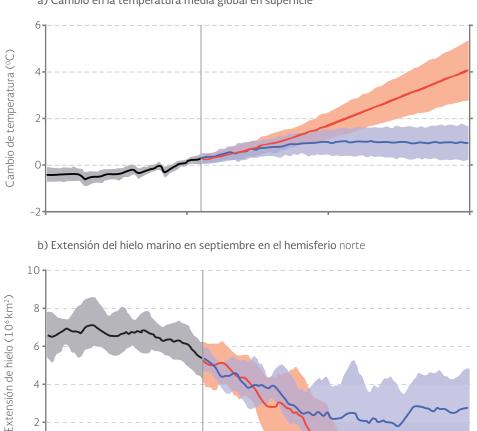
<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Lo cual está acorde con los compromisos del Acuerdo de París obtenidos del año pasado, ver el Recuadro La COP21 y el Acuerdo de París.

<sup>32</sup> Corresponde a un forzamiento radiativo para el año 2100 de 8.5 Wm-2 con respecto al valor de forzamiento de 1750.

<sup>33</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.

Figura 5.34 Cambios proyectados en la temperatura media global y el hielo marino en el hemisferio norte, 1950 - 2100

a) Cambio en la temperatura media global en superficie





2000

1950

RCP8.5 (naranja). El color negro (sombreado gris) representa la evolución histórica en los modelos, utilizando forzamientos históricos reconstruidos.

1 Las series temporales de las proyecciones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP2.6 (morado) y

Año Escenarios 2050

2100

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. United Kingdom y USA. 2013.

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 RPC8.5). Además, es muy probable<sup>34</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, 2015).

Respecto al hielo marino, para ambos escenarios considerados, las proyecciones muestran que en el Ártico se reducirá durante todo el año (Figura 5.34b). 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, 2015).

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 5.35).

El cambio climático afectará también el ciclo del carbono, con lo que se intensificará el incremento de CO, en la atmósfera y en los océanos; ambos escenarios apuntan a que, como resultado, los mares y océanos se acidificarán35 globalmente para finales del siglo XXI, sin embargo, bajo el escenario RCP2.5 podría presentarse una recuperación lenta a partir del 2050.

En el caso de México, recientemente el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y 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<sup>36</sup>. La actualización consideró los escenarios de cambio climático RCP4.5 (de bajas emisiones) y RCP8.5 (de altas emisiones) propuestos por el IPCC<sup>37</sup>.

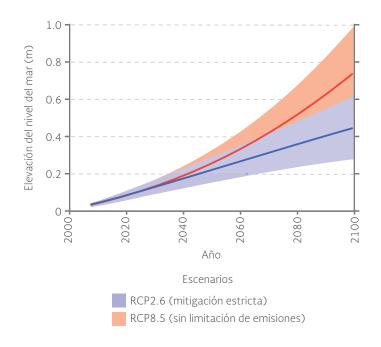
<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> Representa una probabilidad entre el 90 y 100%.

<sup>35</sup> Para mayor detalle sobre los cambios en el clima y ciclos biogeoquímicos, se recomienda revisar el último informe de evaluación del IPCC.

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Los escenarios pueden consultarse en la dirección electrónica: www2.inecc.gob.mx/cgacc/escenarios\_cu/act\_escenarios.html.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Actualmente el Grupo de Modelación del Clima integrado por las instituciones arriba mencionadas y bajo la coordinación del INECC trabajan en la actualización de los escenarios de cambio climático para México como parte de los trabajos de la Sexta Comunicación Nacional ante la CMNUCC, misma que se publicará en el mes de iunio de 2017.

Figura 5.35 | Elevación media mundial del nivel del mar¹ durante el siglo XXI, 2000 - 2100



#### Nota:

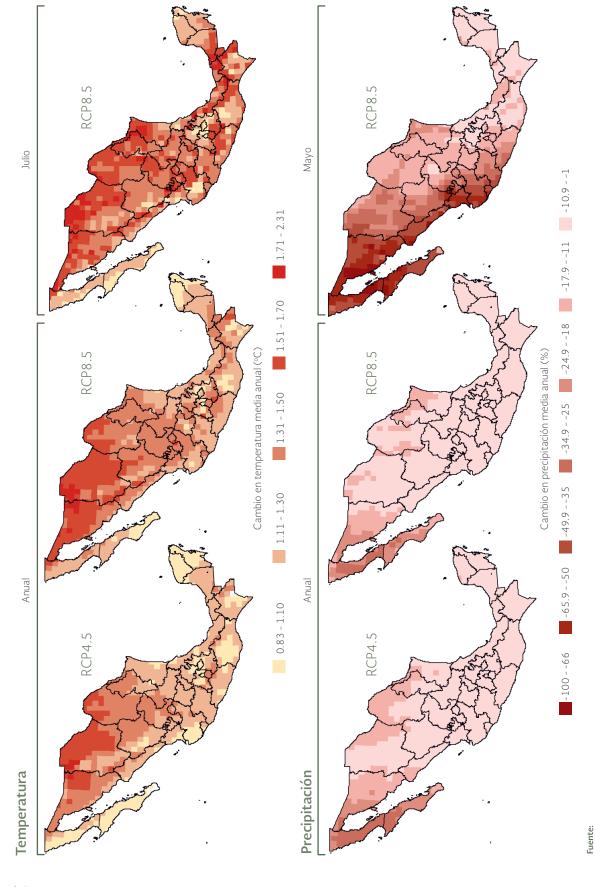
<sup>1</sup> La elevación es calculada con respecto al promedio del período 1986-2005.

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. United Kingdom y USA. 2013.

En el caso de la temperatura promedio anual, ambos escenarios proyectan incrementos para el periodo 2015-2039 con referencia al periodo 1961-2000 para todo el país (Figura 5.36). Mientras que el escenario de bajas emisiones (RCP4.5) pronostica que la mayor parte del país registraría incrementos entre 1.1 y 1.3 °C, 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 5.36). 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 5.36), 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. 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.

Proyecciones de la temperatura y precipitación anuales promedios y para meses seleccionados en México bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, 2015 - 2039 Figura 5.36



Fuente:
Elaboración propia con datos de:
INECC, Semarnat. Cambio climático en México. Futuro cercano (2015-2039). Disponible en: www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/futuro-cercano-2015-2039. Fecha de consulta: junio de 2016.

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, 2015). 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.

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, 2015).

Con respecto a la calidad, se espera que la calidad el 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 seguías, y la interrupción del funcionamiento de las instalaciones de tratamiento durante las crecidas (IPCC, 2015).

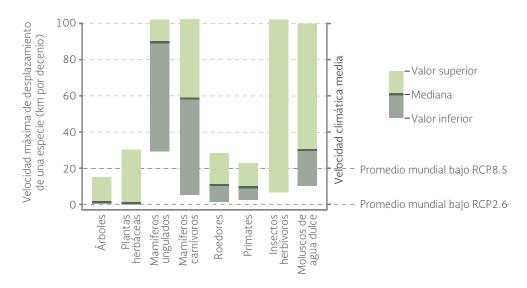
Biodiversidad

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, 2015).

La Figura 5.37 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 5.37). 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>38</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 5.38; Perry *et al.*, 2005).

Figura 5.37 | Velocidades de desplazamiento de algunos grupos de especies ante cambios de temperatura



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.

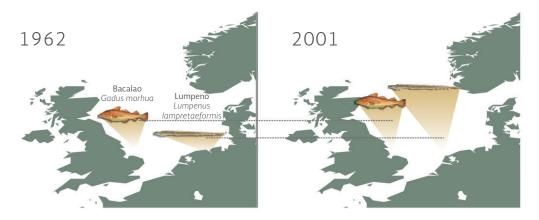
Impactos sobre las poblaciones humanas

Las poblaciones humanas estarán 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>39</sup>.

<sup>38</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>&</sup>lt;sup>39</sup> Para profundizar en el tema se recomienda revisar el último informe de evaluación del IPCC (2015).

Figura 5.38 Desplazamiento de dos especies marinas por el calentamiento del mar del Norte, 1962 v 2001



Fuente: Perry, A.L., P.J. Low, J.R. Ellis y J.D. Reynolds. 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 5.39). Posterior al año 2050, el riego aumenta y depende del nivel de incremento de temperatura (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.

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 provocará 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

100 Proyecciones de rendimiento (%) 80 60 40 20 2050-2069 2010-2029 2030-2049 2070-2089 2090-2109 Rango del cambio del rendimiento 50 a 100% 0 a -5% 25 a 50% -5 a -10% aumento del disminución del 10 a 25% -10 a -25% rendimiento rendimiento 25 a -50

Figura 5.39 | 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 °C o más. En relación con cinco períodos 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 período 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 período suman el 100%.

5 a 10%

0 a 5%

### 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.

riesgos ante fenómenos meteorológicos extremos. Se ha proyectado que aumente el número de personas desplazadas y que los países en desarrollo serán los más afectados.

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, 2015). 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).

Impactos del cambio climático proyectados para México

-50 a -100%

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

<sup>40</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, 2015)

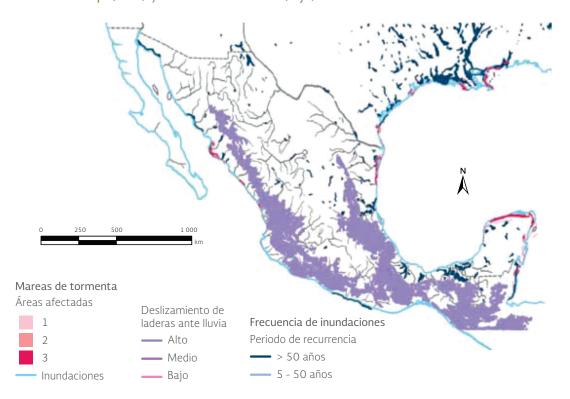
los resultados de distintas evaluaciones realizadas sobre la vulnerabilidad de diversos sectores bajo escenarios de cambio climático, existe evidencia de que sus efectos, en combinación con otros factores de presión, podrían tener consecuencias ecológicas, económicas y sociales muy negativas, algunas de las cuales ya son visibles en la actualidad (Gobierno de la República, 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 Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC, Semarnat, 2012).

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 5.40).

Impactos potenciales por inundación (azul), deslizamiento por lluvias intensas Figura 5.40 (rosa) y marea de tormenta (rojo)



Fuente:

INECC, Semarnat. México 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 5.41). En esos municipios, existían en 2010 alrededor de 35 616 kilómetros de vías pavimentadas, lo que equivale a cerca del 25.6% 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 Baja California (87%), Campeche (86%), Baja California Sur y Tabasco (cada uno con 81%) y Sinaloa (68%).

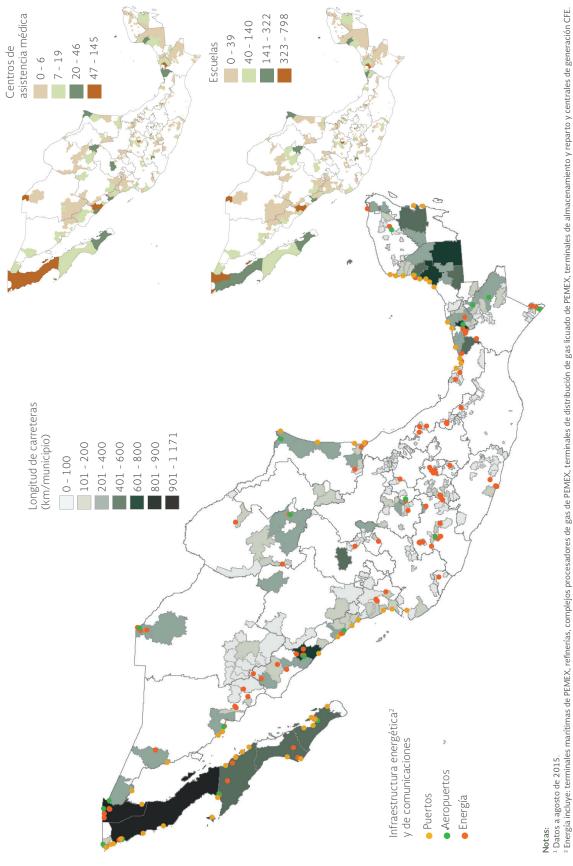
En el caso de los aeropuertos, un total de 20 se encuentran dentro de los municipios más vulnerables, esto es, el 25% del total nacional, y de los cuales cinco son para tráfico nacional y los restantes 15 tanto para tráfico nacional como internacional (Figura 5.41). En el caso de los puertos, cinco instalaciones 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 2010 un total de 13 596 y 2 402 unidades, respectivamente. Finalmente, con respecto a la infraestructura energética, en los municipios más vulnerables existen 42 centrales de generación de energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y seis refinerías y diez centrales de procesamiento de gas, ambas de Petróleos Mexicanos (PEMEX), entre otras instalaciones (Figura 5.41).

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 km², siendo Campeche, Sinaloa y Quintana Roo los estados más afectados en términos absolutos (Mapa 5.15). 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%).

En lo que se refiere a los recursos hídricos del país, éstos pueden 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 (INE, Semarnat e IMTA 2008).

Los posibles impactos del cambio climático sobre los sistemas y sectores productivos en México son diversos y se basan en escenarios futuros construidos en un contexto de incertidumbre. La Tabla 5.4 presenta un análisis con ejemplos de los impactos de este fenómeno global en algunos sectores en México.

Figura 5.41 | Infraestructura en los municipios vulnerables al cambio climático, 2015



Fuentes:

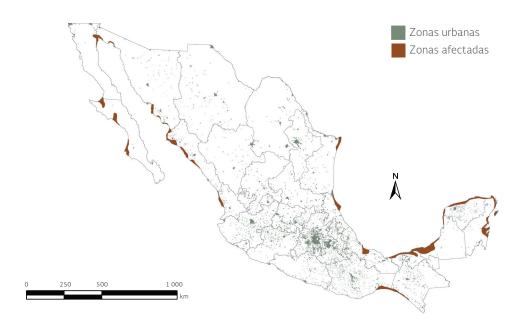
Elaboración propia con datos de:

Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat. México. Julio de 2016.

INEGI, SCT e IMT. Red Nacional de Caminos (RED), escala 1: 50,000. INEGI, SCT e IMT. 2010.

INEGI, Marco Geoestadístico Nacional, 1: 50 000: TOPO\_Urbanos0 2010, TOPO\_Energía50 2010, TOPO\_Vías\_comunicación50 2010, TOPO\_edificaciones50 2010, TOPO\_aeropuerto50, TOPO\_ins\_puertuar50 2010, TOPO\_ins\_piersa50. INEGI. México. 2010.

Mapa 5.15 | Escenario de incremento del nivel del mar de dos metros para México



Fuente:

Elaboración propia con datos de:

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. Fecha de consulta: junio de 2016.

## ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Los posibles impactos del cambio climático serán variables en función de las distintas condiciones sociales, ambientales y económicas presentes en el territorio. En la medida en que las políticas y estrategias sean adecuadas y exitosas, la mitigación de las emisiones globales 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).

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

**Tabla 5.4** | Posibles impactos del cambio climático en sistemas y sectores estratégicos en México

Sistema o sectores	Impactos proyectados	Grado de impacto	Nivel de Confianza
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.	Вајо	1
Hídrico	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
	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.	Вајо	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, 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.		

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

 $<sup>^1</sup> Los impactos proyectados se estimaron considerando un escenario de incremento de temperatura entre 2.5 y 4.5 \,^\circ C y una disminución en la precipitación de la consideración de la co$ 

<sup>&</sup>lt;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.

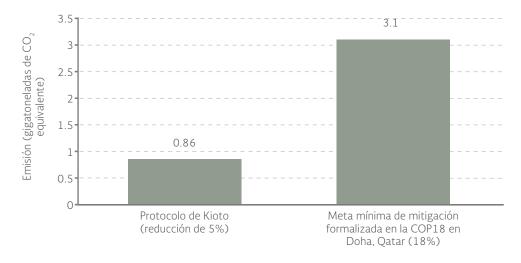
<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> El nivel de confianza tiene una escala del 1 al 5, siendo 1 el nivel más bajo y 5 el de mayor confiabilidad. También es una medida subjetiva basada en el juicio de expertos. Se considera que los trabajos arbitrados más actuales tienen un nivel de confianza mayor. Los factores 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.

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).

A junio de 2015, 192 países habían ratificado, aprobado o aceptado el Protocolo, los cuales, en conjunto, emiten el 63.7% del total de GEI de los países desarrollados o con economías en transición (UNFCCC, 2015). 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 esta enmienda no participan en la reducción de emisiones Canadá, Japón, Nueva Zelandia y la Federación de Rusia, que sí participaron en el primer periodo de compromisos del Protocolo, lo que limita aún más el alcance de los resultados de mitigación en este periodo (INECC, 2014; Figura 5.42).

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). El objetivo principal de la conferencia 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. Mayores detalles sobre los resultados de la Conferencia se mencionan en el recuadro La COP21 y el Acuerdo de París.

Figura 5.42 | Emisiones mitigadas con el Protocolo de Kioto y metas de mitigación post-Kioto



Fuentes:

INECC. Información sobre ecología y cambio climático. Respuesta Internacional. INEEC. México. 2014. Disponible en: http://iecc.inecc.gob.mx/respuesta-internacional.php. Fecha de consulta: octubre de 2014.

Semarnat. COP16. 6 méxico 2010. Las conferencias de Cancún un espacio sobre cambio climático para todos. Semarnat. México. 2011.

### La COP21 y el Acuerdo de París Recuadro

La vigésimo primera sesión de la Conferencia de las Partes (COP21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) tuvo su sede en la ciudad de París, Francia, del 30 de noviembre al 11 de diciembre de 2015. El Acuerdo de París, su principal resultado, es un acuerdo vinculante en el que participan todos los países miembros de la UNFCCC y que, bajo el principio de equidad y responsabilidades comunes pero diferenciadas, y de acuerdo con las capacidades respectivas y a la luz de las diferentes circunstancias nacionales, busca fundamentalmente: 1) contener el incremento de la temperatura muy por debajo de los 2 °C respecto a los niveles preindustriales, prosiguiendo con los esfuerzos para limitar el aumento a 1.5 °C; y 2) alcanzar un pico global de emisiones de gases de efecto invernadero lo más pronto posible, y partir de ese momento reducirse rápidamente durante la segunda mitad del presente siglo¹ (UNFCCC, 2015).

Otros acuerdos logrados son que los países deberán actualizar y comunicar sus Intenciones de Contribuciones Nacionales Determinadas (conocidas como iNDC, por sus siglas en inglés) cada cinco años, siendo cada vez más ambiciosas que las anteriores en sus metas de mitigación. Para la COP21, 188 países (que sumaban el 96% de los países parte de la Convención y más del 95% de las emisiones globales) presentaron sus contribuciones tentativas, mismas que fueron ratificadas en la sede de las Naciones Unidas en abril de 2016<sup>2</sup>.

En el tema del financiamiento, se reconoció la responsabilidad histórica de los países desarrollados y se acordó que éstos deberán proveer los recursos financieros para apoyar a los países en desarrollo tanto en las acciones relativas a la mitigación como para la adaptación. El apoyo financiero, a partir del año 2020, será anualmente de 100 mil millones de dólares, asignándose de manera balanceada entre la mitigación y adaptación; en el caso de esta última deberá escalarse en el tiempo.

Por otro lado, el mecanismo REDD+, el cual reconoce la importancia de los bosques en la lucha contra el cambio climático, y el Mecanismo de Desarrollo y Transferencia de Tecnología quedan legitimados por el Acuerdo de París. También se crea un Mecanismo de Desarrollo Sostenible, el cual promoverá, además de la mitigación de las emisiones, el desarrollo sostenible de los países. Por primera vez se incluyó en un acuerdo una meta global cualitativa en adaptación, que consiste en aumentar la capacidad de adaptación, fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad de los países al cambio climático. Además, se reconoce como fin la protección de las personas, los

 $<sup>^{1}</sup>$  El balance será entre las emisiones antropógenicas por las fuentes y la absorción antropógenica por los sumideros.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> México fue el primer país en desarrollo en presentar su iNDC en marzo de 2015. Para mayores detalles de su contenido, ver la sección de Esfuerzos nacionales contra el cambio climático.

medios de vida y de los ecosistemas, teniendo en cuenta las necesidades urgentes e inmediatas de los países más vulnerables. Quedó establecido que los países presentarán, de manera periódica, reportes en cuanto a sus problemáticas y los avances obtenidos en cuanto a sus procesos de adaptación.

Para dar seguimiento a los avances del Acuerdo, se estableció un mecanismo de balance del avance colectivo (el llamado "Global Stocktake"), mediante el cual los países reportarán, de manera periódica cada cinco años, su progreso en la implementación de acciones en mitigación, adaptación y financiamiento, además del avance en la implementación de sus planes climáticos. La primera evaluación ocurrirá en 2023 y después cada cinco años.

Para la aplicación del Acuerdo de París, será necesario que 195 países partes lo ratifiquen entre el 22 de abril de 2016 y el 21 de abril de 2017. Seguido de esto, el Acuerdo entrará en vigor 30 días después de que al menos 55 países u organizaciones, que sumen el 55% de las emisiones globales, lo hayan ratificado (UNFCCC, 2015).

### Referencia:

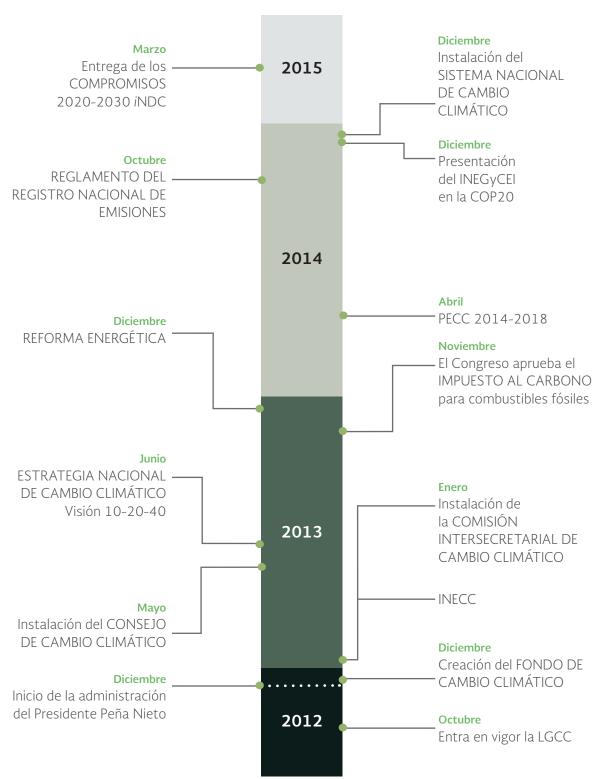
UNFCCC. *Acuerdo de París*. UNFCCC. 2015. Disponible en: http://unfccc.int/portal\_espanol/items/3093.php. Fecha de consulta: abril de 2016.

### 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, lo que le ha permitido destacar a nivel internacional. Algunos de los hitos en años recientes al respecto se muestran en la Figura 5.43. 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, 2012).

Para la instrumentación de esta ley, se publicó en 2013 la Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40 (ENACC), que describe los ejes estratégicos y las líneas de acción (sin definir acciones concretas o responsables particulares) para orientar las políticas de los tres órdenes de gobierno y fomentar la corresponsabilidad con los diversos sectores de la sociedad (Semarnat, 2013). En la ENACC se plantea como reto para el país reducir 30% las emisiones en 2020 y 50% en 2050 con respecto a las emisiones del año 2000.

Figura 5.43 | Hitos recientes de la estrategia nacional para el combate al cambio climático, 2012 - 2015



Fuente-

Modificado de:

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

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), 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 ENCC 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 deberá realizar 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 está compuesto por 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). El PECC se planteó como meta al 2018 la reducción de 83.2 megatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente<sup>41</sup>.

En materia internacional, en marzo de 2015 México presentó su Contribución Prevista y Determinada a nivel Nacional para el periodo 2020-2030 (iNDC; Intended Nationally Determined Contribution), 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 solventará con recursos propios, mientras que las condicionadas son aquellas que podría llevar a cabo 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>42</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). Mayores detalles respecto al contenido del *i*NDC nacional y del efecto climático de los *i*NDC presentados hasta la fecha por las partes ante la CMNUCC se muestran en el recuadro El *i*NDC de México y la mitigación global de emisiones en el periodo 2020-2030 global según los *i*NDC recibidos por la CMNUCC.

En la Tabla 5.5 se describen en general algunas de las estrategias implementadas por México más relevantes en materia de cambio climático.

<sup>41</sup> Utilizando un potencial de calentamiento global a 100 años –PCG100 – de los gases y compuestos de efecto invernadero (Semarnat, 2014).

 $<sup>^{42}</sup>$  Incluye energía renovable, cogeneración con gas natural y termoeléctricas con captura de  $\mathrm{CO}_2$ .

## Recuadro

El iNDC de México y la mitigación global de emisiones en el periodo 2020-2030 según los iNDC recibidos por la CMNUCC

En la décimo novena Conferencia de las Partes (COP19) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) celebrada en Varsovia, Polonia, a finales de 2013, se invitó a las partes a elaborar sus compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático (Intended Nationally Determined Contributions, iNDC, por sus siglas en inglés) para el periodo 2020-2030, todo ello con el fin de adoptar un protocolo o instrumento legal vinculante bajo la Convención que permitiese estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera a niveles que impidieran interferencias humanas en el sistema climático. La decisión fue reiterada en la COP20 de Lima, Perú, en 2014, bajo el acuerdo de que los iNDC deberían representar un avance más allá de los esfuerzos de mitigación de ese momento. Los iNDC deberían presentarse ante la CMNUCC durante el primer trimestre de 2015 para servir de insumo básico en la COP21 a llevarse a cabo en París, Francia, entre noviembre y diciembre de ese mismo año.

Como parte central de sus iNDC, los países incluyeron, de acuerdo a sus prioridades, circunstancias y capacidades nacionales, las acciones que emprenderían para combatir el cambio climático, y muy en especial, estimaciones de sus ambiciones para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para el periodo 2020-2030. Se sugirió también la inclusión de las acciones de adaptación para reducir los efectos del cambio climático.

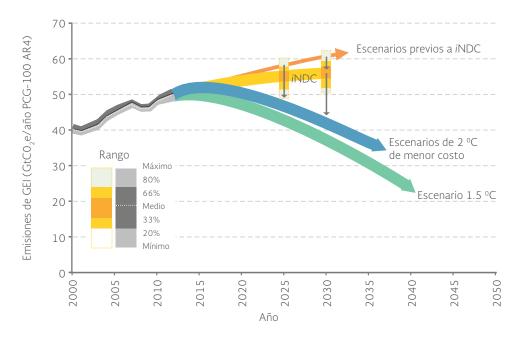
Para abril de 2016, la Convención había recibido un total de 161 iNDC, incluyendo 189 partes y una organización económica regional; todos ellos comprenden el 96% de las partes y el 99% del volumen de emisiones de las partes de la Convención (UNFCCC, 2016). La suma de la contribución de la reducción de las emisiones comprometidas por las partes permite conocer si la meta global de la mantener la temperatura superficial del planeta por debajo de los 2 °C en relación a la época pre-industrial puede alcanzarse.

Según la Convención (2016), con la reducción de las emisiones que podría alcanzarse de implementarse los iNDC recibidos (considerando los compromisos condicionados y no condicionados), las emisiones globales ascenderían a 55.0 (51.4 a 57.3)1 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente en 2025 y de 56.2 (52.0 a 59.3) en 2030<sup>2</sup>. Estas cifras, si se comparan con los escenarios tendenciales sin implementar los iNDC, representan una reducción de 2.8 (0.0 a 6.0) gigatoneladas de CO<sub>3</sub> equivalente en 2025 y de 3.3 (0.3 a 8.2) en 2030 (Figura a).

 $<sup>^{1}</sup>$  Los valores fuera del paréntesis se refieren a promedios y los que se ubican dentro de ellos a rangos del 20 al 80%.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Esta cifra incluye las emisiones provenientes del cambio de uso del suelo y usa valores de potencial de calentamiento global del AR4 a 100 años. Las cifras incluyen los compromisos condicionados y los no condicionados. Si se consideran tan solo los compromisos no condicionados, las emisiones globales podrían alcanzar 55.6 (53.1 a 57.3) Gt CO<sub>2</sub> en 2025 y 57.9 (54.4 a 59.3) Gt CO<sub>2</sub> en 2030.

Figura a Emisiones globales en 2025 y 2030 sin y como resultado de la implementación de los Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático



AR4= Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. iNDC= Historical emission database and intended nationally determined contribution quantifation.

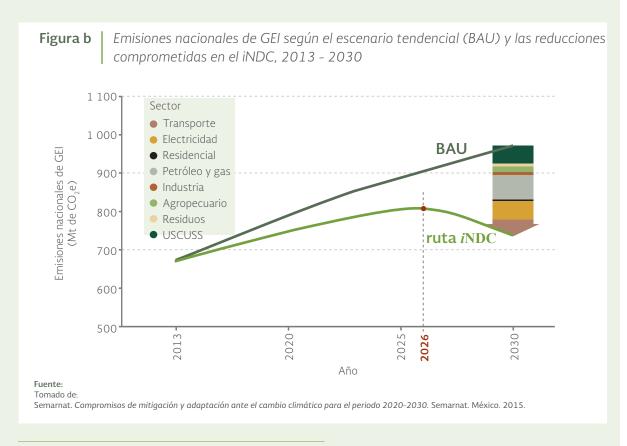
IPCC. Fifth Assessment Report scenario database, 1.5 °C scenarios from scientific literature, IPCC historical emission database and intended nationally determined contribution quantification. IPCC.

Cuando se compara el valor de las emisiones globales resultado de la implementación de los iNDC recibidos con los valores de las emisiones globales para el escenario de calentamiento por debajo de los 2 °C, se observa que el primero resulta 19% mayor en 2025 y también 36% superior en 2030; esta diferencia equivale a alrededor de 8.7 gigatoneladas de CO<sub>3</sub> equivalente en 2025 y 15.2 gigatoneladas en 2030 (Figura a).

Las estimaciones anteriores muestran que los esfuerzos comprometidos por los países en sus iNDC resultan insuficientes para conseguir alcanzar la meta del calentamiento por debajo de los 2 °C, y más aún para el escenario del 1.5 °C. Aun cuando la posibilidad de conseguir emisiones anuales que permitan alcanzar esos escenarios más allá del 2030 existe, es claro que los esfuerzos de mitigación que habrían de realizar los países entonces son mayores y a un mayor costo que las rutas de reducción de emisiones que podrían comenzar pronto o en 2020. Por lo anterior, mayores esfuerzos en la reducción de las emisiones que los contenidos en los iNDC serán necesarios por parte de los países en el periodo posterior a 2025 y 2030 para poder mantener el calentamiento del planeta por debajo de 2 °C respecto a los niveles pre-industriales (UNFCCC, 2016).

En marzo de 2015, México presentó su Contribución Prevista y Determinada a nivel Nacional para el periodo 2020-2030, siendo el primer país en vías de desarrollo en hacerlo ante la CMNUCC y el cuarto a nivel global, después de la Unión Europea, Suiza y Noruega. Su contribución contiene dos componentes, uno de mitigación y otro de adaptación. El componente de mitigación contempla dos tipos de medidas: las no condicionadas, es decir, aquellas que el país podría solventar con sus propios recursos, y las medidas condicionadas que podrían realizarse si México pudiera obtener recursos adicionales y transferencia de tecnología disponibles mediante cooperación internacional, al igual que contar con un precio internacional del carbono y mecanismos de ajustes de frontera.

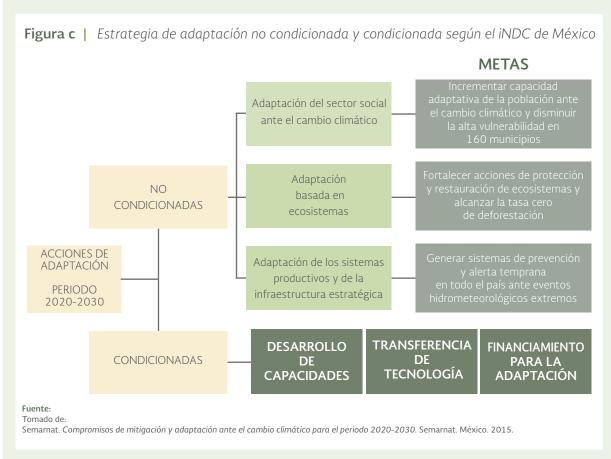
Respecto a la reducción de sus emisiones, México asumió el compromiso no condicionado de mitigar el 22%<sup>3</sup> de sus emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030, lo cual significa una reducción de alrededor de 210 megatoneladas de GEI (Figura b). Paralelamente, el país planteó la reducción de sus emisiones de carbono negro, uno de los CCVC más importantes (ver el Recuadro La importancia del carbono negro en el calentamiento global) para el 2030. En este caso, su meta no condicionada contempla reducir 51% del volumen de sus emisiones para el año 2030 con base en un escenario tendencial carente de medidas para combatir el cambio climático.



<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Considerando un escenario tendencial carente de medidas para combatir el cambio climático

En caso de adoptarse un acuerdo<sup>4</sup> que permita llevar a cabo los compromisos condicionados, las reducciones nacionales de carbono negro podrían incrementarse a 70% y las de GEI alcanzar 36% al 2030, llegando así a una trayectoria consistente con la planteada en la Ley General de Cambio Climático, la cual busca reducir para 2050 en 50% el volumen de las emisiones con respecto a las registradas en el año 2000.

El componente de adaptación, que incluye también compromisos no condicionados y condicionados al 2030, considera como prioridad nacional proteger a la población de los efectos del cambio climático, principalmente de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, así como aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica del país y de los ecosistemas. En la Figura c pueden observarse los principales componentes de la estrategia de adaptación nacional incluida en su iNDC.



### Referencias:

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

UNFCCC. Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update. Synthesis report by the Secretariat. 2016. Disponible en: http://unfccc.int/resource/docs/2016/cop22/eng/02.pdf. Fecha de consulta: julio de 2016.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Podría conseguirse en caso de adoptarse un acuerdo global que incluya, por ejemplo, un 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, todo ello a una escala equivalente con el reto del cambio climático global.

**Tabla 5.5 |** 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 <i>i</i> NDC, 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 planteó 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.

**Tabla 5.5** | Estrategias y políticas adoptadas por México en materia de cambio climático (conclusión)

Estrategia/Política	Observaciones		
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.		
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.		

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.

Dirección de Modelos Sectoriales de Desarrollo Bajo en Carbono. INECC, Semarnat. México. 2015.

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. Fecha de consulta: marzo de 2012.

Semarnat, CCE, CESPEDES, WRI y WBCSD. Programa GEI México. Semarnat. México. Disponible en: www.geimexico.org. Fecha de consulta: septiembre de 2013.

Semarnat. Dirección General Adjunta para Proyectos de Cambio Climático. Semarnat. México. 2012.

# **Recuadro** El impuesto al carbono en México

En 2014 se implementó una nueva modalidad de impuesto especial sobre la producción y los servicios (IEPS), la cual grava el contenido de carbono en los combustibles fósiles. Su objetivo principal es desincentivar el consumo de combustibles en la población, básicamente por el incremento en su precio, todo ello con la intención de contribuir a mitigar las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero.

El cálculo del impuesto, concebido como una cuota proporcional en función de las emisiones generadas por unidad de producto consumido, se basó en las cotizaciones del precio promedio de la tonelada de bióxido de carbono en los mercados de bonos de carbono europeo y norteamericano, así como en los factores de emisión asociados a cada uno de los combustibles fósiles en oferta<sup>1</sup> (World Bank, 2015). Del total del precio de los combustibles fósiles, entre el uno y dos por ciento lo constituyen los impuestos al carbono. Entre 2014 y 2015, el impuesto al carbono recaudó en el país alrededor de 17.3 mil millones de pesos (9.7 y 7.6 mil millones de pesos, respectivamente, en 2014 y 2015; SHCP, 2016).

### Referencia:

DOF. Acuerdo 26/2015 Acuerdo por el que se actualizan las cuotas que se especifican en materia del impuesto especial sobre producción y servicios. DOF. México. 2015.

SHCP. Estadísticas Oportunas de Finanzas Públicas. SHCP. México. Disponible en: http://www.shcp.gob.mx/ POLITICAFINANCIERA/FINANZASPUBLICAS/Estadisticas Oportunas Finanzas Publicas/Paginas/unica2.aspx. Fecha de consulta: julio de 2016.

World Bank. State and Trends of Carbon Pricing 2015. WB. Washington. 2015.

A nivel local, se han elaborado los Programas Estatales de Cambio Climático, las Leyes Estatales de Cambio Climático y los Inventarios Estatales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. 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

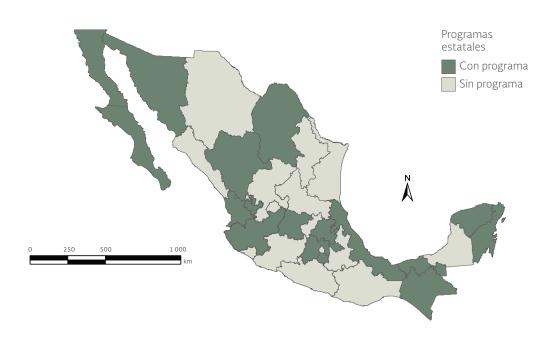
<sup>1</sup> Las cuotas del impuesto tienen una vigencia anual, actualizándose al concluir el año por efecto de la inflación con base en el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC). Durante el 2016 las cuotas son de 11.05 y 13.4 centavos por litro de gasolina y Diésel, respectivamente, por ejemplo. En general, los combustibles fósiles se ven gravados a un nivel de 42.37 pesos por cada tonelada de carbono que contengan. És importante mencionar que sé excluye de la regulación al gas natural (DOF 24-12-2015).

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.

Al mes de noviembre de 2015, 17 estados contaban con su PECC concluido (Mapa 5.16), 17 contaban con sus Leyes Estatales de Cambio Climático (Mapa 5.17) y 26 tenían sus Inventarios Estatales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Mapa 5.18).

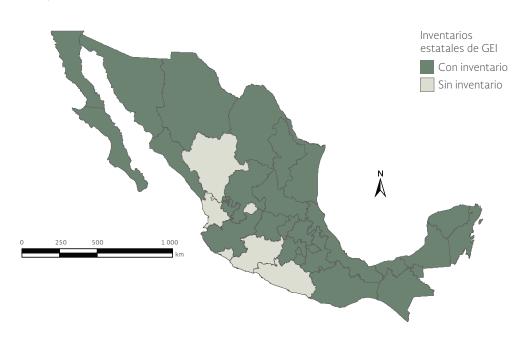
A la fecha no se cuenta con un estudio actualizado sobre los costos económicos del cambio climático en México. Sin embargo, un estudio publicado en 2009 indicó que los "...costos económicos de los impactos climáticos al 2100 serán al menos tres veces superiores que los costos de mitigación de 50% de 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 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). Esto deja claro 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.

Mapa 5.16 | Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático publicados, 2015



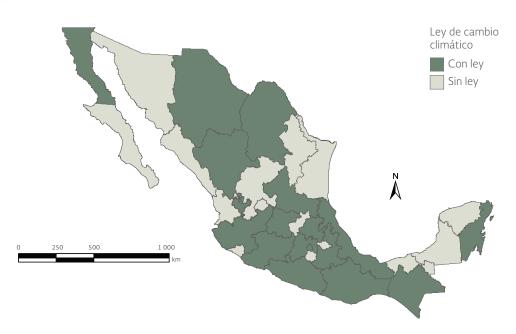
INECC. Acciones y Programas. Cambio Climático en México. Instrumentos de política pública en materia de cambio Climático en las entidades federativas. INEEC. M'exico. Disponible en: www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/instrumentos-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-entidades-de-politica-en-las-en-lfederativas. Fecha de consulta: mayo de 2016.

Mapa 5.17 Inventarios Estatales de Emisiones de Gases de efecto Invernadero elaborados, 2015



INECC. Acciones y Programas. Cambio Climático en México. Instrumentos de política pública en materia de cambio climático en las entidades federativas. INECC. M'exico. Disponible en: www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/instrumentos-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-efederativas. Fecha de consulta: mayo de 2016.

Mapa 5.18 | Leyes de Cambio Climático publicadas, 2015



### Fuente:

 $INECC.\ Acciones\ y\ Programas.\ Cambio\ Climático\ en\ M\'exico.\ Instrumentos\ de\ política\ p\'ublica\ en\ materia\ de\ cambio\ climático\ en\ las\ entidades\ federativas.\ INECC.\ Acciones\ y\ Programas.\ Cambio\ Climático\ en\ M\'exico.\ Instrumento\ s\ de\ p\'olítica\ p\'ublica\ en\ materia\ de\ cambio\ climático\ en\ las\ entidades\ federativas.\ INECC.\ Acciones\ y\ Programas.\ Cambio\ Climático\ en\ México.\ Instrumento\ s\ de\ p\'olítica\ p\'ublica\ en\ materia\ de\ cambio\ climático\ en\ las\ entidades\ federativas.\ INECC.\ Acciones\ y\ Programas.\ Cambio\ Climático\ en\ México.\ Instrumento\ s\ de\ p\'olítica\ p\'$  $\begin{tabular}{lll} \textbf{M\'exico.} & \textbf{Disponible} & \textbf{en:} & www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/instrumentos-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-publica-en-materia-de-cambio-climatico-en-las-entidades-de-politica-en-materia-de-politica-e$ federativas. Fecha de consulta: mayo de 2016.

De los problemas ambientales globales, el adelgazamiento de la capa de ozono, junto con el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad, es uno de los más preocupantes. Su importancia radica en que la afectación de los niveles de ozono estratosférico reducen la protección que brinda la capa de ozono de los rayos ultravioleta<sup>43</sup> provenientes del Sol. Desde mediados de los años 70<sup>44</sup> se descubrió que ciertas sustancias producidas por el hombre destruían las moléculas de ozono estratosférico; diez años después<sup>45</sup> se comprobó la existencia del llamado "agujero de ozono" sobre Antártica (Laube et al., 2014; UNEP, 2012).

Los compuestos responsables de la destrucción del ozono estratosférico son conocidos como sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO)46. Las SAO existen naturalmente en la atmósfera y también son emitidas por actividades humanas. Entre las más conocidas están los clorofluorocarbonos (CFC), también destacan los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), halones, bromuro de metilo (BM), tetracloruro de carbono (TCC) y metil cloroformo (MCF). Estas sustancias se han empleado históricamente en los sistemas de aire acondicionado, refrigeración, y en la fabricación de solventes y aerosoles, entre otros usos.

El descubrimiento del agujero 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 es un ejemplo de un acuerdo multilateral exitoso 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).

## FL AGUJFRO DF O7ONO

El consumo y emisión de las SAO, así como la destrucción del ozono estratosférico, ocurren a nivel global; sin embargo, el agujero en la capa de ozono se ha registrado sólo en Antártica<sup>47</sup>. Esto 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, 2003; WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012; Manney et al., 2011).

El agujero de ozono no implica la ausencia total de este gas en una región de la atmósfera en particular, en realidad se refiere a una disminución importante en su concentración. Se considera

<sup>43</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 ózono impide su paso. Por último, la radiación UV-B es también muy dañina, pero es retenida en gran parte por la capa de ózono; no obstante, de esta última radiación, una pequeña proporción alcanza la superficie y puede causar daños a células y tejidos de los organismos.

<sup>&</sup>lt;sup>44</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, los átomos de cloro inician una cadena de reacciones que destruyen cantidades importantes de ozono en la estratosfera. Por ejemplo, un átomo de cloro o bromo puede destruir hasta cien mil moléculas de ozono (WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012).

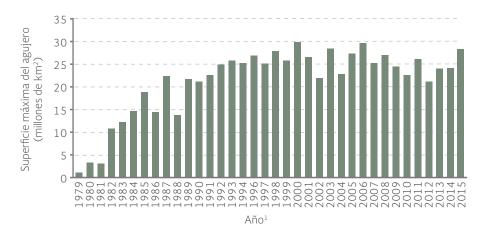
<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Con base en registros de concentración de ozono en Antártica, los científicos Joesph Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin descubrieron que en esa zona ocurre un adelgazamiento importante de la capa de ozono, fenómeno conocido actualmente como "agujero de ozono" (The Ozone Hole, 2015)

<sup>46</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 nitroso (Weatherhead y Andersen, 2006).

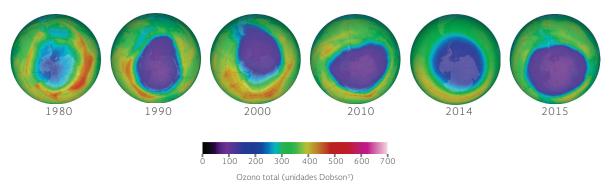
<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> Se considera que el agujero de ozono en Antártica se forma en el mes de octubre.

Figura 5.44 | Extensión del agujero de ozono

### a) Extensión máxima



b) Registro histórico de la extensión del aqujero de ozono, 1980 - 2015<sup>2</sup>



### Notas:

- <sup>1</sup> No hay datos disponibles para el año 1995.
- <sup>2</sup> 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> 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).

### Fuente:

NASA. Ozone Hole Watch. Annual Records. 2015. NASA. Disponible en: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual\_data.html. Fecha de consulta: mayo de 2016.

que se ha formado un agujero de ozono cuando su concentración es menor a 220 unidades Dobson (UD)<sup>48</sup>, una concentración menor al promedio global que es de 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 los 29.9 millones de kilómetros cuadrados en el año 2000. En 2015, el tamaño máximo fue de 28.2 millones de kilómetros cuadrados, lo que equivale a 1.9 veces la superficie de Antártica (Figura 5.44a y b; NASA, 2015).

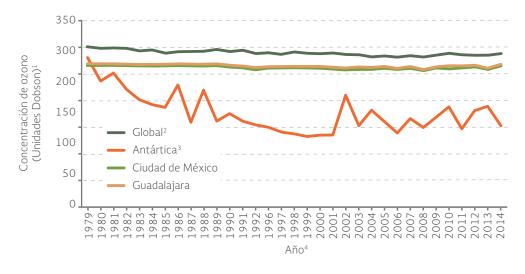
<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Cien unidades Dobson representan una cantidad equivalente a un milímetro de grosor de la capa de ozono, a nivel del mar y a 0 °C, y es la medida para expresar el grosor de la capa (PNUMA, 2003; UNEP, 2012).

Aunque el agujero de ozono se ha observado exclusivamente en Antártica, en 2011 se registró por primera vez una pérdida importante de ozono en el Ártico. Las condiciones en la estratosfera baja en esa región ese año provocaron que se destruyeran alrededor del 80% 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 (NASA, 2014). En Europa y otras regiones de altas latitudes, se han registrado disminuciones de la concentración de ozono de entre 5 y 30% (UNEP, 2012).

## CONCENTRACIÓN DE OZONO ESTRATOSFÉRICO

Las concentraciones de ozono estratosférico, tanto a nivel global como en algunas ciudades del mundo, son monitoreadas por la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés). Para el caso de México se tiene información para Guadalajara y la Ciudad de México, en las cuales no se muestran variaciones importantes en la concentración entre 1979 y el año 2014 (Figura 5.45). Los valores registrados a nivel global y para México contrastan fuertemente con los encontrados desde principios de los años ochenta en Antártica (IB 1.3-3). En esa región se ha mantenido una tendencia decreciente en la concentración de ozono y aunque en algunos años se han registrado incrementos, éstos siempre se han mantenido por debajo de la concentración global. Esta diferencia en las concentraciones es consistente con el planteamiento de que la destrucción de la capa de ozono es un problema generado a nivel global pero sus efectos más evidentes son regionales.

Concentración de ozono estratosférico: global, sobre Antártica y sobre dos ciudades mexicanas. 1979 - 2014



 $NASA. \ \textit{Aura Validation Data Center}. \ NASA. \ \textit{Disponible en: http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=677741240}. \ \textit{Fecha de consulta: febrero de 2015}. \ \textit{Consulta: febrero de 20$ NASA. Ozone Monitoring Instrument (OMI). NASA. 2014. Disponible en: ftp://toms.gsfc.nasa.gov. Fecha de consulta: febrero de 2015. NASA. Total Ozone Mapping Spectrometer. NASA. 2003.

<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>&</sup>lt;sup>2</sup> La concentración global de ozono en el año 2014 incluye mediciones hechas de enero a marzo.

<sup>&</sup>lt;sup>3</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 aguiero de ozono.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Datos no disponibles para el periodo 1993-1995.

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

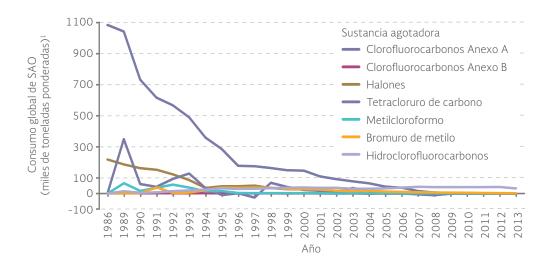
El impacto sobre la capa de ozono depende de la SAO de la que se trate. Cada sustancia posee una capacidad de destrucción de moléculas de ozono diferente; a dicha capacidad se le llama potencial de agotamiento del ozono<sup>49</sup>. Por ello, los valores de consumo de estas sustancias se presentan ponderados por dicho potencial y consideran el consumo aparente de cada SAO, es decir, incluyen tanto su producción como las importaciones y exportaciones (WMO y UNEP, 2003; UNEP, 2012). A nivel global, el consumo de SAO se redujo 99% entre 1986 y 2013 (Figura 5.46; IB 1.3-1). No 🔝 obstante, su concentración en la atmósfera, aunque muestra indicios de disminución si se compara con los valores máximos registrados en la década de los noventa, no lo hace a la misma velocidad que el consumo (Figura 5.47; 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).





De acuerdo con la última evaluación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) sobre los logros obtenidos por el Protocolo de Montreal, la concentración atmosférica de las principales SAO está disminuyendo. 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 del este siglo y, en el caso de su superficie sobre Antártica, es posible que se refleje unos 15 años más tarde (PNUMA, 2014).

Figura 5.46 | Consumo global ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1986 - 2013

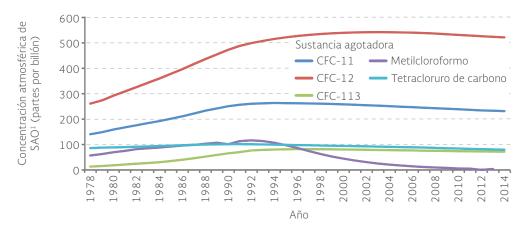


1 El consumo es el resultado de la producción más la importación menos la exportación. Algunos datos de consumo son negativos debido a que la exportación fue mayor a la producción. El consumo neto es ponderado por el potencial de agotamiento de la capa de ozono que posee cada sustancia.

UNEP. Ozone Secretariat. Data Access Centre. UNEP. Disponible en: http://ozone.unep.org/Data\_Reporting/Data\_Access/#notes. Fecha de consulta: febrero de 2015.

<sup>&</sup>lt;sup>49</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.

Figura 5.47 | Concentración atmosférica de sustancias agotadoras del ozono, 1978 - 2014



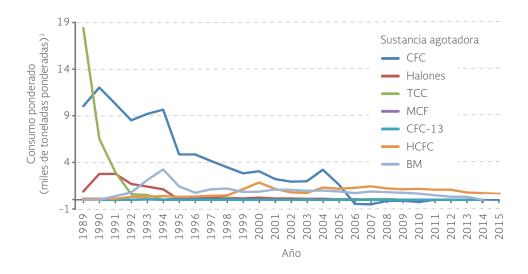
Nota:

### Fuente

CDIAC. Atmospheric CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCI4 and SF6 histories (1910-2014). 2014. Disponible en: http://cdiac.ornl.gov/oceans/new\_atmCFC.html. Fecha de consulta: mayo de 2015.

En México, la tendencia de consumo de las SAO es consistente con la tendencia global. El consumo total ponderado nacional de SAO disminuyó poco más de 98% entre 1989 y 2015 (pasó de 29 mil a 610.2 toneladas) (Figura 5.48; IB 1.3-2; IC 8). Esta disminución se debe 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 5.48 | Consumo nacional ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1989 - 2015



### Nota:

¹ 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 poseé cada sustancia.

### Fuente:

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

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

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

El Protocolo de Montreal sobre Sustancias que Degradan 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 (adoptada en 1985) han buscado definir estrategias para 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 5.6; UNEP, 2014).

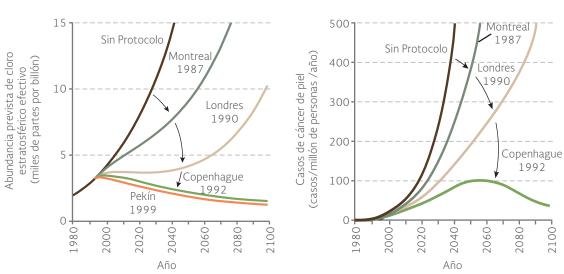
En el año 2009, tanto la Convención de Viena como el Protocolo de Montreal se convirtieron en los primeros tratados en la historia de las Naciones Unidas en lograr la ratificación universal (UNEP, 2014). México firmó estos tratados y adoptó las enmiendas de Londres (1991), Copenhague (1994), Montreal (2006) y Pekín (2007; UNEP, 2014).

Se ha calculado que sin la implementación del Protocolo, la destrucción del ozono estratosférico podría haber aumentado 50% en el hemisferio norte y 70% en las latitudes medias del sur en 2050. Esta situación habría incrementado la incidencia de radiación UV- B en la superficie terrestre: el doble en las latitudes del norte y cuatro veces más en el sur. Con la adopción de las medidas 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

Figura 5.49 | Efectos del Protocolo de Montreal y sus enmiendas







Nota:

Fuente:

UNEP. Vital Ozone Graphics. UNEP. 3a. edición. 2012

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

 Tabla 5.6 | 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
Metil cloroformo	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	100% en 2015
	70% en 2003	
	100% en 2005	
Hidroclorofluorocarbonos	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:

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

de tipo melanoma, 19 millones de casos de cáncer de tipo no melanoma y 130 millones de casos de cataratas (UNEP; 2012). En la Figura 5.49a 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 5.49b).

Como resultado del cumplimiento de los compromisos adquiridos ante el Protocolo de Montreal, a partir de 1995 la mayoría de las SAO incluidas en el Protocolo, con excepción de los CFC, habían dejado de producirse en los países industrializados. A partir de 2005, se eliminó 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 de un periodo de gracia para su eliminación, así como apoyos financieros que les permitieran enfrentar los costos de su eliminación.

El gobierno de México se comprometió a cumplir las metas de reducción de las SAO. Las acciones se han orientado principalmente a la eliminación de los clorofluorocarbonos, al uso de sustancias alternativas que minimicen los impactos en la capa de ozono, al control en el consumo y producción de otras SAO, así como financiamiento de tecnologías limpias que empleen sustancias y prácticas alternativas a las SAO.

Nuestro país cumplió anticipadamente las metas de reducción de algunas sustancias: CFC, tetracloruro de carbono (TCC), metil cloroformo (MCF), halones y bromuro de metilo. En el año 2005 se cerró la única planta de producción de CFC en México, con lo que se redujo 60% la producción en Latinoamérica y 12% a nivel mundial, adelantándose cuatro años al cumplimiento de su compromiso. 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).

A partir del 2006 se reportó un consumo negativo de CFC, ya que se eliminó la producción de estas sustancias y parte de las reservas fue exportada. Dado que se impulsó el uso de sustancias alternativas para sustituir aquellas con mayores potenciales de agotamiento, el consumo de HCFC50 se incrementó a finales de los noventa. Sin embargo, su consumo también está regulado por el Protocolo, por lo que en los últimos años también ha disminuido (Figura 5.50; IB 1.3-5). Las metas 🖨 de reducción progresiva de los HCFC plantean una disminución del 10% en 2015 hasta 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 AIREO3 01, D3 AIREO3 02, D3 AIREO3 03, D3 AIREO3 04 y D3 AIREO3 05.

Como parte de las estrategias de cooperación internacional, en 1991 se estableció el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal, cuyo objetivo ha sido apoyar a los países en desarrollo a cumplir con las medidas de control adoptadas ante el Protocolo



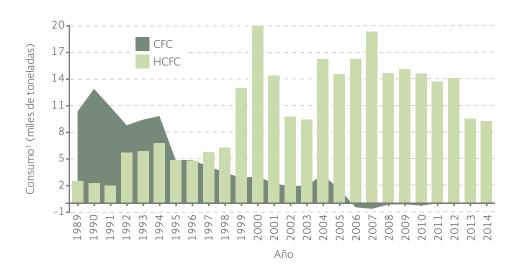
<sup>50</sup> Los HCFC poseen un menor potencial de agotamiento: los que se emplean en México poseen potenciales de entre 0.04 y 0.07, en contraste con los reportados para los CFC, que van de 0.6 a 1.0

de Montreal. Sus recursos se dirigen a impulsar la introducción de tecnologías limpias y a la capacitación de los usuarios de las SAO en esos países. A mayo de 2014, el Fondo había destinado a nivel mundial alrededor de 3 100 millones de dólares y se busca que con la implementación de todos los proyectos apoyados se alcance una reducción en el consumo y producción de aproximadamente 463 mil toneladas ponderadas de SAO. A diciembre de 2012 ya se había llegado al 97% de esta cifra (UNEP, 2014). México recibió de este Fondo en el periodo 1991-2014 un total de 124.07 millones de dólares, con los que apoyó 146 proyectos en sectores como refrigeración, aerosoles, espumas, solventes, agricultura y almacenaje de productos, entre otros (Figura 5.51).

A nivel nacional, hace más de veinte años se creó la Unidad de Protección a la Capa de Ozono, dependiente de la Semarnat. Su función es implementar las medidas necesarias para el cumplimiento de los compromisos de México ante el Protocolo de Montreal. También se desarrolló el Sistema de Información y Seguimiento de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SISSAO) para vigilar su importación y exportación y contar con un registro estadístico de su movimiento (Semarnat, 2013).

Los logros a nivel global son importantes, sin embargo, el problema aún no está resuelto. 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 relativamente baja de estas nuevas sustancias de alrededor de 74 mil toneladas, muy por abajo del millón estimado para otros CFC en los ochenta, es muestra de lo importante que resulta el monitoreo de su presencia en la atmósfera.

Figura 5.50 | Consumo nacional de HCFC como sustancias alternativas a los CFC, 1989 - 2014



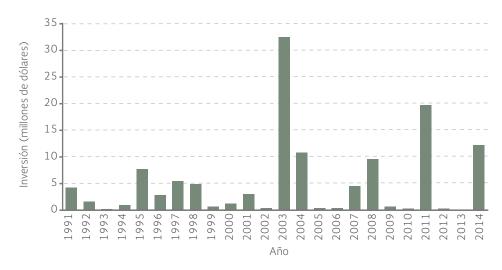
### Nota:

<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.

### Fuente:

Semarnat. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Unidad de Protección a la Capa de Ozono. Semarnat. México. 2015.

Figura 5.51 Fondos otorgados a México por el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal, 1991 - 2014



Semarnat. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Unidad de Protección a la Capa de Ozono. Semarnat. México. 2015.

## **REFERENCIAS**

Aufdenkampe, A.K., E. Mayorga, P.A. Raymond, J.M. Melack, S.C. Doney, S.R. Alin, R.E. Aalto y K. Yoo. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. Frontiers in Ecology and Environment 9(1): 53-60, doi:10.1890/100014. 2011.

Barriopedro, D., E. Fischer, J. Luterbacher, R. Trigo y R. García. 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, J.J. Sirutis, G.A. Vecchi, S.T. Garner e I.M. Held. 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. Segob. México. 2001.

Cenapred. Tormentas severas. Serie Fascículos. México. 2014. Disponible en: 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. USA. 2013.

Conagua. Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2014. Conagua. México. 2014.

Conagua. Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2015. Conagua. México. 2015.

Conagua. Resumen de la temporada de ciclones tropicales del año 2015. Conagua. México. s/a. Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/ tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Resumenes/2015.pdf.

Delgado, G.H. Volcano-ice interactions in Mexico: Extinction of glaciers at Popocatépetl 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, S. Ortega del Valle y M.A. Alatorre Ibargüengoitia. Chronicle of a death foretold: Extinction of the smallsize tropical glaciers of Popocatépetl 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.

DOF. Modificación a la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Diario Oficial de la Federación. México. 2006 (3 de octubre).

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

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.

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: doi:10.1098/rsta.2007.2083.

IEA. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights. 2014 Edition. IEA. France. 2014.

IEA. CO., Emissions from Fuel Combustion. Highlights. 2015 Edition. IEA. France. 2015.

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

INECC. Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM<sub>25</sub> en tres zonas metropolitanas mexicanas. INECC. México. 2014a.

INECC. Información sobre ecología y cambio climático. Respuesta Internacional. INECC. México. Disponible en: http://iecc.inecc.gob.mx/ respuesta-internacional.php. Fecha de consulta: agosto de 2014b.

INECC. Información sobre ecología y cambio climático. Respuesta Internacional. INECC. México. 2016. Disponible en: www.sicc.amarellodev. com/respuesta-internacional.php. Fecha de consulta: abril de 2016.

INECC, Semarnat. Informe Nacional de Calidad del Aire 2013, México. INECC, Semarnat. México. 2014.

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

INECC, Semarnat. Dirección de Modelos Sectoriales de Desarrollo Bajo en Carbono. INECC, Semarnat. México. 2015.

INECC, Semarnat. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC, Semarnat. México. 2015.

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 INE/A1-051/2008. INE, Semarnat y UNAM. México. 2008.

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. France. 2007a.

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

IPCC. Climate change and water. IPCC Technical Paper VI. IPCC. Switzerland. 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. United Kingdom y USA. 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, R.F., S.C. Piper, A.F. Bollenbacher y J.S. Walker. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center. U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/atg.035. 2009.

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. USA. Disponible en: http://cdiac.ornl.gov/. Fecha de consulta: agosto de 2015.

Khazendara, A., C.P. Borstada, B. Scheuchlb, E. Rignotb y H. Seroussia. 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, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. Kossin, A.K. Srivastava y M. Sugi. Tropical cyclones and climate change. Nature Geoscience 3: 157-63. 2010.

Laube, J., M.J. Newland, C. Hogan, C. Brenninkmeijer, P.J. Fraser, P. Martinerie, D.E. Oram, C.E. Reeves, T. Röckmann, J. Schwander, E. Witrant y W.T. Sturges. Newly detected ozone-depleting substances in the atmosphere. Nature 7: 266-269. 2014.

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. Invest. Geog. 83. 2014. Disponible en: www.scielo.org. mx/scielo.php?script=sci arttext&pid=S0188-46112014000100006#figura3. 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.

NASA. Arctic sea ice continues decline, hits 2nd-lowest level. 2011. NASA. Disponible en: www.nasa.gov/topics/earth/features/2011temps.html. Fecha de consulta: agosto de 2015.

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

NASA. Greenland Ice Sheet Today. 2015a. NASA. Disponible en: http://nsidc.org/greenland-today/. Fecha de consulta: mayo de 2015.

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

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

NOAA. Greenland Ice Sheet. 2015. NOAA. Disponible en: www.arctic.noaa.gov/reportcard/greenland\_ice\_sheet.html. Fecha de consulta: mayo de 2015.

NSIDC. Artic Sea Ice News & Analisys. NSIDC. 2015. Disponible en: https://nsidc.org/arcticseaicenews/2015/05/. Fecha de consulta: iulio de 2015

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

Perry, A.L., P.J. Low, J.R. Ellis y J.D. Reynolds. 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. GEO América Latina y El Caribe. 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://ozone.unep.org/es/protocolo-de-montreal-logros-alcanzados-hasta-la-fecha-y-desaf%C3%ADos-futuros. 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.

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: www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/ calidaddelaire/Paginas/pco.aspx. Fecha de consulta: abril de 2015.

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

Semarnat. Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire. México. Semarnat. México. 2014. Disponible en: www.semarnat.gob. mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire. Fecha de consulta: abril de 2015. Semarnat, INE y Pemex Refinación. Estudio de evaluación socioeconómica del proyecto integral de calidad de combustibles. Reducción de azufre en gasolinas y diésel. Semarnat, INE y Pemex Refinación. Estudio. México. 2006.

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

Stern, N. Stern Review. The Economics of Climate Change. United Kingdom. 2007.

The Ozone Hole. Ozone Hole History. 2015. Disponible en: www.theozonehole.com/ozoneholehistory.htm. Fecha de consulta: abril de

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

UNFCCC. Kyoto Protocol, Status of Ratification, UNCCD. 2014. Disponible en: http://unfccc.int/kyoto\_protocol/status\_of\_ratification/ items/2613.php. Fecha de consulta: junio de 2015.

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

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

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

UNEP. Ozone Secretariat. Status of Ratification. 2014. UNEP. Disponible en: http://ozone.unep.org/en/treaties.php. Fecha de consulta: abril de 2015.

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

Vittoz, P., D. Cherixa, Y. Gonsethc, V. Lubinid, R. Magginie, N. Zbindenf y S. Zumbachg. Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. Journal for Nature Conservation. 21: 154-162. 2013. Disponible en: www.researchgate.net/profile/Daniel\_Cherix/  $publication/235622981\_Climate\_change\_impacts\_on\_biodiversity\_in\_Switzerland\_A\_review/links/00463536bced815598000000.$ pdf. Fecha de consulta: junio de 2016.

Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry y H.R. Change. 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.

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. Switzerland. 2014b.

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