



ATMÓSFERA

ATMÓSFERA

A lo largo de su historia la humanidad ha buscado el disfrute de una vida con mayor bienestar y comodidad. Sin embargo, el desarrollo que ha experimentado para alcanzarlo, ha ido acompañado de consumos masivos de recursos naturales y energéticos, así como de la generación de una variedad enorme de residuos y emisiones a la atmósfera que han causado una extensa degradación ambiental. Históricamente los residuos generados por las actividades humanas se han descargado al ambiente con la idea errónea de que tarde o temprano se degradarán o desaparecerán. El resultado es que actualmente las huellas de la actividad humana son evidentes en prácticamente cualquier lugar, incluso en aquellos que se encuentran alejados de los sitios donde se generan esos residuos. Un buen ejemplo de problemas ambientales que tienen implicaciones tanto locales como globales son los atmosféricos, de los cuales, los más importantes, por sus efectos sobre la salud de la población y los ecosistemas naturales, son la disminución de la calidad del aire, el fenómeno de cambio climático global y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico.

La contaminación atmosférica tiene efectos a nivel local, regional y global. Varios países como Japón, China y México enfrentan, desde hace tiempo, problemas de calidad del aire en sus principales zonas metropolitanas; en el caso particular de México destaca el Valle de México como el más conocido y documentado. Además de los efectos locales asociados a la mala calidad del aire en la salud de las personas, también se presentan efectos a nivel regional, como la afectación de los bosques y ecosistemas acuáticos debido a la lluvia ácida o, incluso, a nivel mundial, como el cambio climático y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico, cuyos efectos más evidentes se manifiestan en Antártica (PNUMA, 2002).

Ante esta situación, resulta fundamental contar con información confiable y actual de los temas más relevantes relacionados con la atmósfera que permita tomar acciones efectivas a nivel local y global. En este contexto, el presente capítulo incluye información sobre las emisiones de contaminantes a la atmósfera en México, la normatividad vigente relacionada con ellos y una descripción de la calidad del aire en las ciudades y zonas urbanas más importantes del país en los últimos años. También se ha incluido una sección sobre el cambio climático global, sus evidencias y consecuencias, así como las medidas que se han tomado para enfrentarlo y por último una sección sobre la disminución del espesor de la capa de ozono estratosférico. Por su naturaleza y efectos mundiales, la información relacionada con el cambio climático y el agotamiento de la

capa de ozono estratosférico no se restringe a la situación de México sino que se da un panorama global.

CALIDAD DEL AIRE

La gestión de la calidad del aire requiere información de diversos tipos, destacando la que se refiere a la identificación de los principales generadores de emisiones, del volumen y composición de éstas, así como de la concentración de los contaminantes en la atmósfera. Esta información, que es la base de los programas tendientes a mejorar la calidad del aire, proviene principalmente de los inventarios de emisiones y de las redes de monitoreo.

INVENTARIOS DE EMISIONES

La calidad del aire en una zona determinada, además de ser afectada por elementos climáticos y geográficos, está relacionada directamente con el volumen y características de los contaminantes emitidos, tanto local como regionalmente a la atmósfera. Por ello, un componente indispensable para el diseño y la aplicación de cualquier programa para controlar el problema de la contaminación del aire es la información sobre las principales fuentes de contaminantes atmosféricos y los volúmenes emitidos.

Los antecedentes de los inventarios de emisiones en México se remontan al año 1988, cuando se implementó el Sistema Nacional del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas, así como el estudio encaminado a cuantificar las emisiones en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Siete años más tarde se inició un programa para incrementar la capacidad de México en la elaboración de inventarios de emisiones, el cual se amplió en 2001 orientándose a la elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM). El desarrollo del INEM constó de tres

fases: I) planeación, II) desarrollo del inventario para seis estados del norte y III) los inventarios de los estados restantes. Los resultados de la segunda fase fueron publicados en 2005 con los datos del Inventario de Emisiones de los Estados de la Frontera Norte de México de 1999, que incluyó información sobre las emisiones en Baja California, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas (Semarnat, 2005; INE, Semarnat, 2005). En el año 2006 se publicó el primer Inventario Nacional de Emisiones, que incluye información del año 1999, desagregada por fuente de emisión de contaminantes y para todos los estados y municipios del país (INE, Semarnat, 2006). En el año 2011 se publicó el más reciente INEM con datos de 2005, el cual presenta la estimación de las emisiones de contaminantes por fuente, por estado y municipio. La información de los INEM se concentra en el Subsistema del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera de México (SINEA).

Este capítulo se enfocará con mayor detalle a los resultados del INEM 2005. La información sobre inventarios locales elaborados para algunas zonas metropolitanas y ciudades del país puede consultarse directamente en sus respectivos Programas para Mejorar la Calidad del Aire que han sido desarrollados. De acuerdo con el INEM, en 2005 se emitieron alrededor de 71.2 millones de toneladas de contaminantes, de los cuales, 22% fueron emitidos por fuentes naturales¹ y 78% por fuentes antropogénicas. Las fuentes naturales emitieron principalmente compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno. Aunque las emisiones de fuentes naturales fueron significativas en cuanto a volumen, se distribuyen ampliamente en todo el territorio nacional, en contraste con las antropogénicas que cobran mayor importancia porque se generan en, o cerca de ciudades o poblados, por lo que se incrementa el número de personas expuestas a los efectos nocivos de los contaminantes.

¹ Fuentes naturales: incluyen fuentes biogénicas como la vegetación y la actividad microbiana del suelo. En 2005 no se reportaron emisiones por actividad volcánica -otra fuente importante de emisiones, aunque intermitente-, ya que no se registró una actividad significativa.

El 89% del total de contaminantes emitidos por fuentes naturales en 2005 correspondió a compuestos orgánicos volátiles provenientes de la vegetación y el restante 11% fue de óxidos de nitrógeno generados por la actividad microbiana del suelo. En el caso de las fuentes antropogénicas, el mayor volumen emitido provino de las fuentes móviles carreteras² (61%), seguidas por las fuentes de área³ (9%), las fuentes fijas⁴ (7%) y las fuentes móviles no carreteras⁵ (1%; Figura 5.1; **IB 1.1-2**; [Cuadro D3_AIRE01_01_D](#)).



Considerando sólo a las fuentes antropogénicas, los contaminantes emitidos en mayor proporción fueron el monóxido de carbono (CO; 41.9 millones de toneladas; 76% del total), los compuestos orgánicos volátiles (COV; 5.2 millones de toneladas;

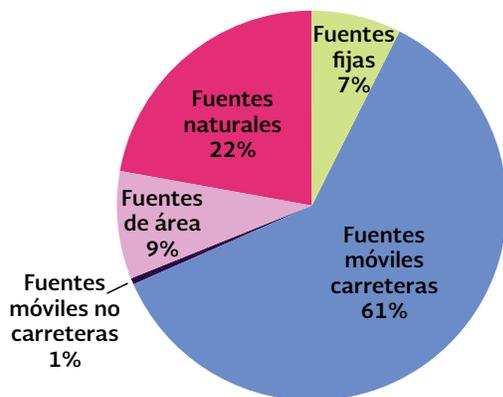
9%), el bióxido de azufre (SO₂; 3.1 millones de toneladas; 6%) y los óxidos de nitrógeno (NO_x, 2.8 millones de toneladas; 5%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje menor al 2% en cada uno de los casos (Figura 5.2; **IB 1.1-2**).



En 2005, la mayor parte de las emisiones antropogénicas fueron generadas por los vehículos automotores (fuentes móviles carreteras; 78.3% del total). Este tipo de fuentes emitieron principalmente CO (91.5% del CO total emitido por todas las fuentes), NO_x (66.4%) y COV (59.3%; Figura 5.3). Aunque con menor porcentaje, debe mencionarse también la contribución de las fuentes de área (11.5% del total de contaminantes de las fuentes antropogénicas), que produjeron principalmente CO y COV resultado

Emisión nacional de contaminantes por fuente, 2005

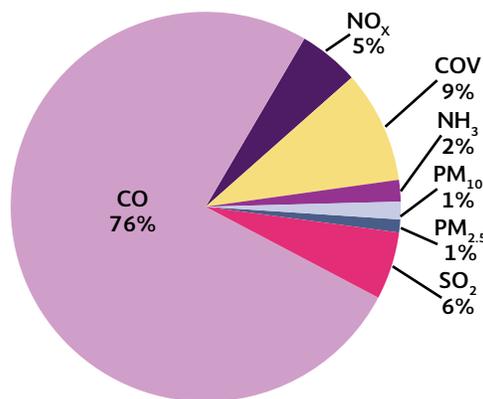
Figura 5.1



Fuente: Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante, 2005

Figura 5.2



Fuente: Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

² Fuentes móviles carreteras: 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.

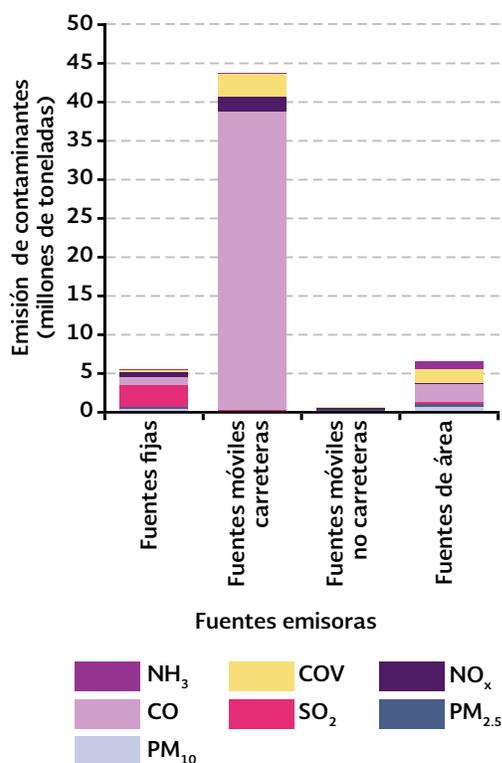
³ Fuentes de área: incluyen combustión agrícola y doméstica, artes gráficas, asfaltado, lavado en seco, pintura automotriz, pintura para señalización vial, recubrimiento de superficies, uso doméstico de solventes, limpieza de superficies industriales, manejo y distribución de gas licuado de petróleo, gasolinas y diesel, actividades de construcción, asados al carbón, panificación, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda, ganaderas de amoníaco, labranza, aguas residuales, incendios de construcciones, incendios forestales, emisiones domésticas de amoníaco, esterilización de material hospitalario, cruces fronterizos, terminales de autobuses y quemas agrícolas.

⁴ Fuentes fijas: incluyen a las industrias del petróleo y petroquímica, química (incluye plásticos), producción de pinturas y esmaltes, metalúrgica y siderúrgica, automotriz, celulosa y papel, cemento y cal, asbesto, vidrio, alimentos y bebidas, textil, madera, generación de energía eléctrica, residuos peligrosos, hospitales y producción de asfalto, entre otras.

⁵ Fuentes móviles no carreteras: incluyen aviación, equipo básico en aeropuertos, embarcaciones marinas, locomotoras de arrastre, locomotoras de patio, maquinaria de uso agropecuario y para construcción.

Emisión de contaminantes de origen antropogénico, por fuente y contaminante, 2005

Figura 5.3



Fuente: Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2005. México, 2012.

principalmente de la combustión doméstica. Les siguieron las fuentes fijas (9.5% del total de contaminantes emitidos por fuentes antropogénicas), quienes produjeron la mayor parte del SO₂ en el país (91%), principalmente por la generación de energía eléctrica y la industria del petróleo y petroquímica.

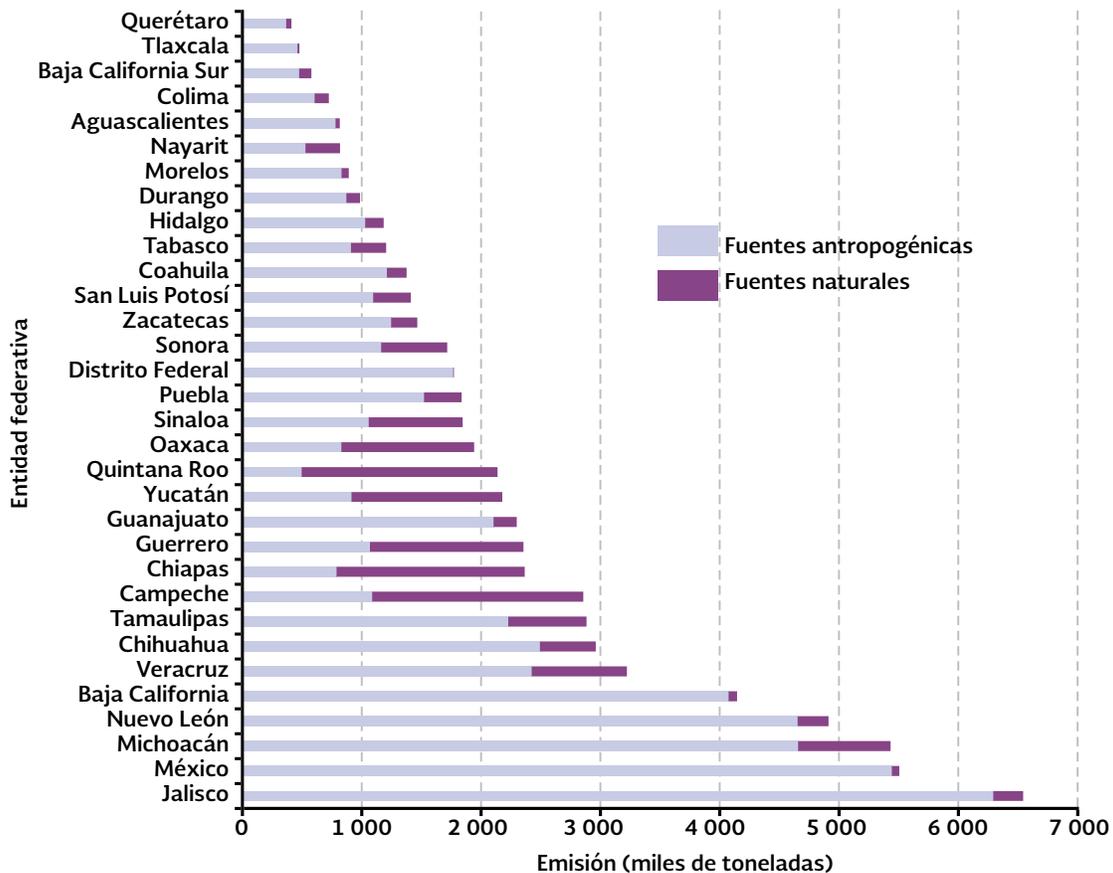
Considerando las emisiones de fuentes naturales y antropogénicas, las cinco entidades federativas que emitieron una mayor cantidad de contaminantes fueron Jalisco, estado de México, Michoacán, Nuevo León y Baja California (Figura 5.4). Sus contribuciones a la emisión total nacional oscilaron entre 5.8 y 9.2%. En contraste, Querétaro, Tlaxcala y Baja California Sur emitieron, cada una, menos de uno por ciento del total nacional.

Cuando se analiza la emisión de contaminantes per cápita⁶ se observa que a nivel nacional, en el año 2005, cada habitante emitió en promedio alrededor de 0.68 toneladas. Si sólo se consideran las emisiones de fuentes naturales, la cifra es de 0.15 toneladas por habitante, mientras que las emisiones estrictamente antropogénicas fueron de 0.53. La emisión per cápita total por municipio y delegación política, muestra que en 89% de los municipios se generaron entre 0.01 y 2 toneladas de contaminantes en 2005. Los cinco municipios que reportaron una mayor emisión per cápita fueron: Calakmul (23.9 toneladas; en Campeche), San Javier (20.05; Sonora), Santa María Chimalapa (18.5; Oaxaca), San Juan Lajarcia (15.6; Oaxaca) y La Colorada (15; Sonora), todos ellos con emisiones generadas principalmente por fuentes naturales (Mapa 5.1).

Con respecto a las emisiones totales por municipio y contaminante, en el caso de los NO_x se observa que alrededor del 49% de los municipios del país emitieron en 2005 entre 5 y 500 toneladas, acumulando poco más de 236 mil toneladas que representan el 5.2% del total nacional emitido de ese contaminante (Mapa 5.2). Si a estos municipios se suman los que emitieron hasta 5 mil toneladas, se alcanza 42% de las emisiones totales nacionales y el 93% de los municipios del país. De esta manera, el restante 58% de las emisiones de NO_x fueron generadas por tan sólo el 7% de los municipios. Entre estos últimos, destacan los municipios de Nava (Coahuila), Monterrey (Nuevo León), Tijuana y Mexicali (ambos en Baja California), Carmen (Campeche) y Toluca (México) con emisiones de entre 50 y 108 mil toneladas.

En lo que se refiere al SO₂, 50% se concentró en cinco municipios: Carmen (Campeche), Tula de Allende (Hidalgo), Nava (Coahuila), Tuxpan (Veracruz) y Manzanillo (Colima), en todos ellos, la mayor parte de las emisiones fueron generadas por las fuentes fijas, en particular por las plantas de generación de electricidad

⁶ La emisión per cápita se calculó con base en los datos del INEM que corresponden a 2005 y la población por municipio del mismo año.



Fuente: Semarnat. Inventario Nacional de Emisiones de México 2005. México. 2012.

y por las refinerías de petróleo (Mapa 5.3). La mayoría de los municipios del país (78%) emitió entre 0.02 y 60 toneladas de SO₂, que representan apenas el uno por ciento del total.

Por otro lado, en el caso de los COV, 44% de los municipios generaron cantidades que fueron de las cinco a las dos mil toneladas, 40% emitió entre dos mil y diez mil toneladas, 15.8% entre diez mil y ochenta mil toneladas y 0.2% entre ochenta mil y 570 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 generaron poco más de 2.48 millones de toneladas de COV (equivalentes a 13% del total emitido), provenientes principalmente de fuentes naturales⁷.

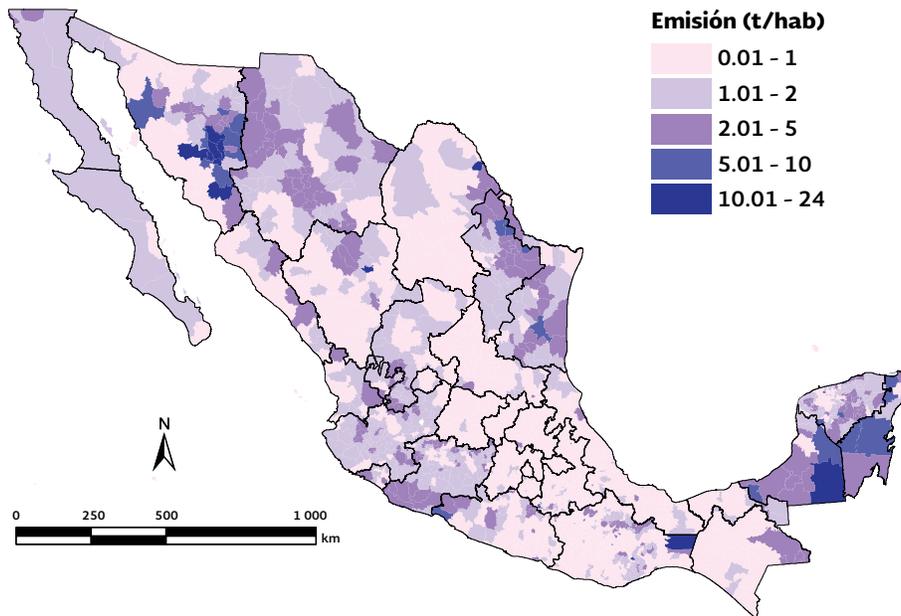
El CO fue generado en mayor cantidad por las fuentes móviles en municipios pertenecientes a ciudades donde el número de vehículos es elevado. Los municipios que emitieron más CO fueron: Tijuana (Baja California), Guadalajara (Jalisco), Monterrey (Nuevo León), Toluca (México), Mexicali (Baja California) y Morelia (Michoacán; Mapa 5.5).

En lo que se refiere a las PM₁₀ el 95% de los municipios del país emitieron entre una y 1 600 toneladas, lo que representa en conjunto

⁷ Los COV naturales son isoprenos y monoterpenos y pueden ocasionar reacciones de tipo alérgico e incluso lesiones neurológicas graves.

Emisión per cápita de contaminantes por municipio, 2005

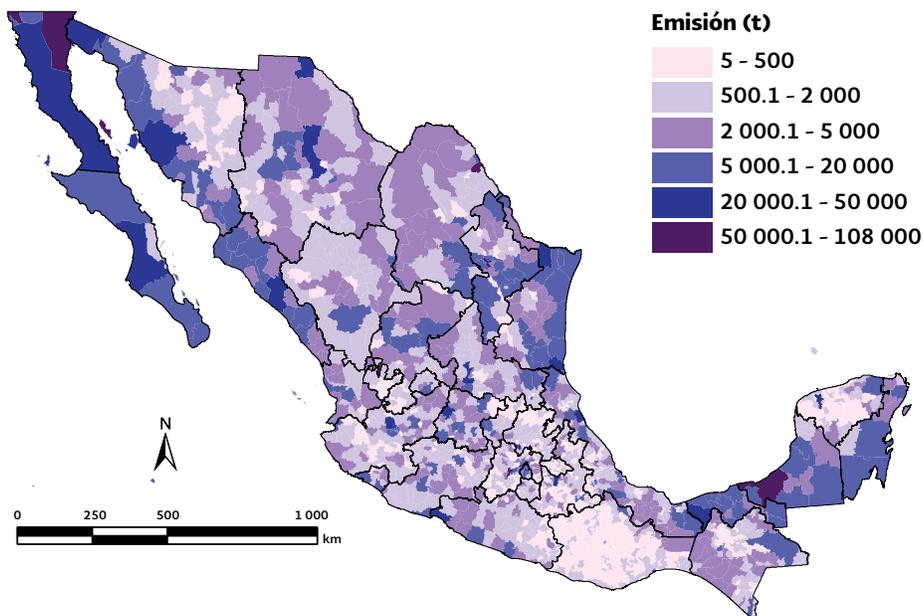
Mapa 5.1



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

Emisión de óxidos de nitrógeno por municipio, 2005

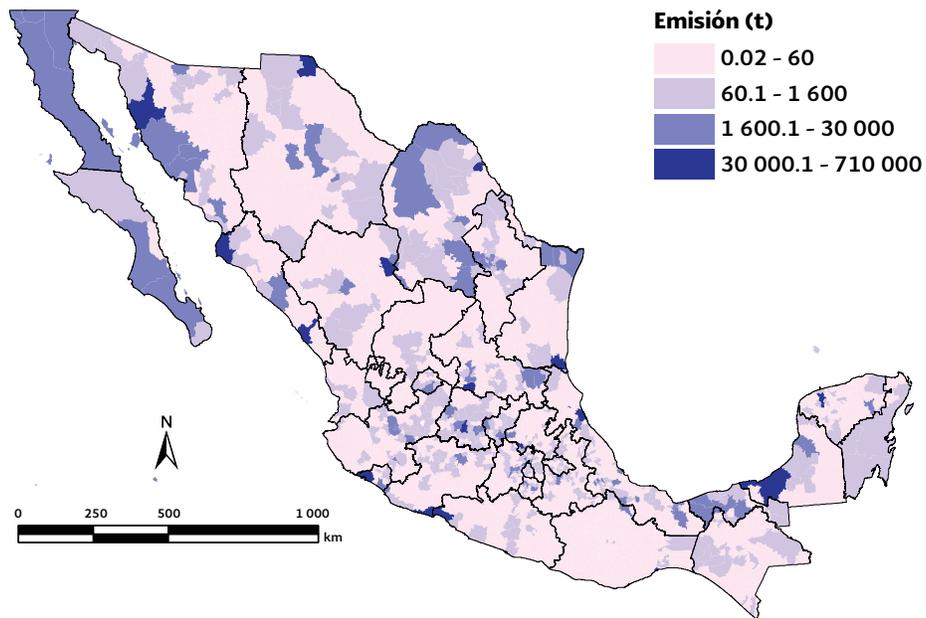
Mapa 5.2



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

Emisión de bióxido de azufre por municipio, 2005

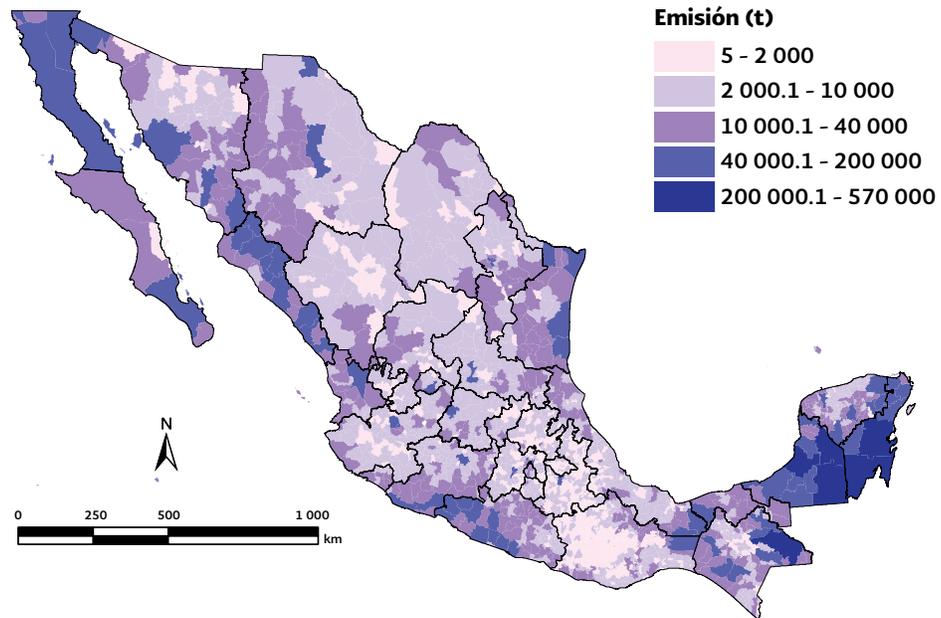
Mapa 5.3



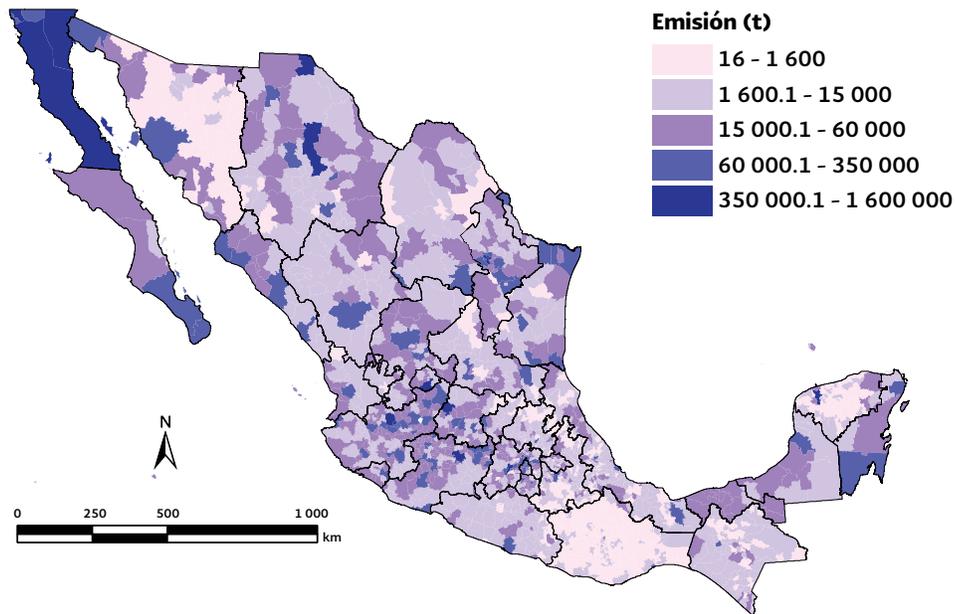
Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México, 2012.

Emisión de compuestos orgánicos volátiles por municipio, 2005

Mapa 5.4



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México, 2012.



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

el 52% de la emisión total del contaminante (Mapa 5.6). Los cinco municipios donde se emitió la mayor cantidad de PM_{10} son: Monclova (Coahuila), Tula de Allende (Hidalgo), Jaltipan (Veracruz), Manzanillo (Colima) y Culiacán (Sinaloa). Respecto a la emisión de $PM_{2.5}$, el 97% de los municipios emitieron entre una y 1 600 toneladas, generando entre todos ellos el 56% del total emitido (Mapa 5.7). Los municipios que emitieron el mayor volumen de este contaminante son: Monclova (Coahuila), Tula de Allende (Hidalgo), Tuxpan (Veracruz), León (Guanajuato) y Manzanillo (Colima). Ambos tipos de partículas fueron generados principalmente por las fuentes fijas y de área.

El amoníaco (NH_3) es producido principalmente por las actividades ganaderas, 95% de los municipios produjeron entre 0.8 y 1 600 toneladas, acumulando poco más de 592 mil toneladas (que equivalen a 59% del total de NH_3 emitido; Mapa 5.8). Los cinco municipios con las mayores emisiones fueron: Nava (Coahuila); San Juan de los Lagos (Jalisco),

Tepatitlán de Morelos (Jalisco), Culiacán (Sinaloa) y Huajuapán de León (Oaxaca), que emitieron entre 7 000 y 11 200 toneladas.

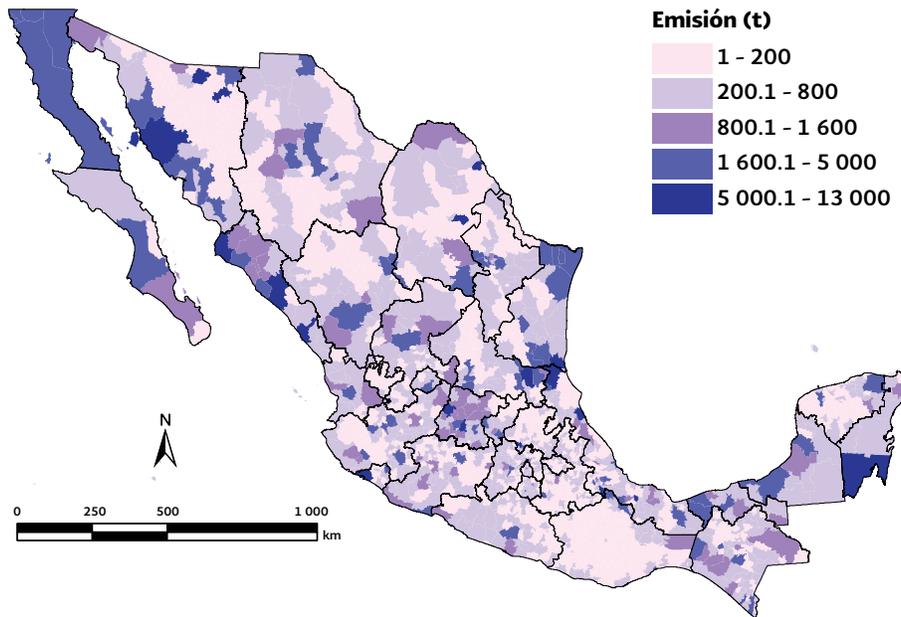
Si se revisan las emisiones totales generadas por actividades humanas, a nivel municipal, se observa que 69% de los municipios emitieron entre 25 y 10 mil toneladas de contaminantes, acumulando un total de alrededor de 4.4 millones de toneladas (8% del total emitido; Mapa 5.9). Los cinco municipios que generaron mayores cantidades de contaminantes fueron Tijuana (Baja California), Guadalajara (Jalisco), Monterrey (Nuevo León), Toluca (México) y Mexicali (Baja California) que en total emitieron el 12% nacional.

EMISIONES EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

En la ZMVM se han estimado las emisiones de contaminantes para el periodo 2000-2010. Los resultados que se enfatizan en esta sección

Emisión de partículas menores a 10 micrómetros por municipio, 2005

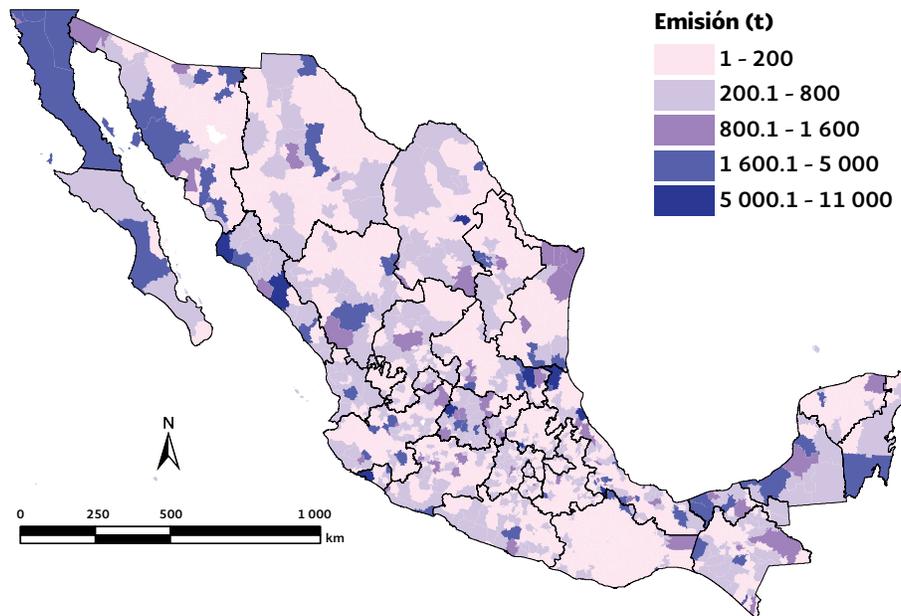
Mapa 5.6



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

Emisión de partículas menores a 2.5 micrómetros por municipio, 2005

Mapa 5.7



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

son los obtenidos en 2010, mientras que los cambios ocurridos toman como referencia el año 2000⁸.

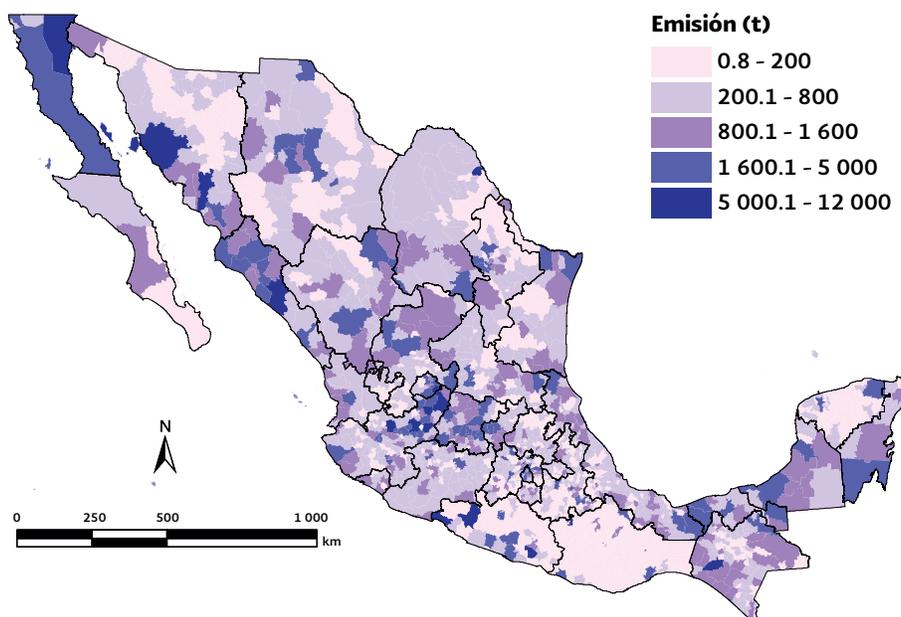
Considerando el total de contaminantes emitidos en el periodo 2000-2010, hubo una reducción importante en la emisión (41%) entre esos años (Figura 5.5). El CO ha sido, consistentemente, el contaminante que más se ha emitido en la ZMVM, con valores que han oscilado entre el 66 y 79% del total de las emisiones (Figura 5.5). No obstante, la emisión de este gas es la que, comparativamente con los restantes contaminantes, ha mostrado la disminución más drástica en su volumen de emisión, al pasar de cerca de 3.3 millones de toneladas en 2000 a 1.6 millones de toneladas en 2010, lo cual ha sido resultado principalmente de la incorporación de nuevas tecnologías en un mayor número de vehículos. Esto también se refleja en el caso de las emisiones de COV y de NO_x que presentan

una reducción del 25 y 8%, respectivamente, en el mismo periodo. Aunque el SO₂ se emite en menor proporción, sus emisiones también han disminuido, debido principalmente a la reducción en el contenido de azufre en los combustibles y al cambio por combustibles gaseosos y menos contaminantes (GDF, 2012). Las PM₁₀ mostraron un ligero incremento en el periodo al pasar de 0.8% en el 2000 a 1.2% en 2010.

En lo que se refiere al origen de los contaminantes, en 2010 el 61% de las emisiones provino de las fuentes móviles, siendo el CO el contaminante que representó la mayor proporción de las emisiones de dicha fuente (74%; Figura 5.6). Las altas emisiones asociadas a las fuentes móviles, pueden deberse a factores como el número de vehículos en circulación, la cantidad de combustible que consumen y las emisiones de vehículos sin tecnologías de control

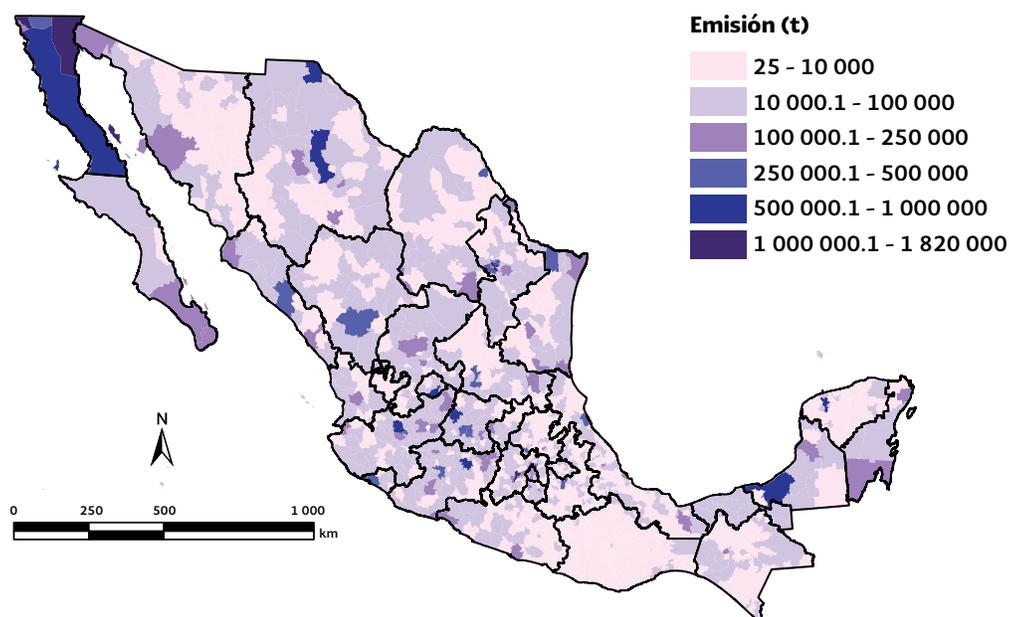
Emisión de amoniaco por municipio, 2005

Mapa 5.8



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

⁸ La información para hacer este análisis fue publicada en el Inventario de Emisiones de la ZMVM 2010, el cual incluye un nuevo cálculo de las emisiones de todos los años anteriores usando la misma metodología.



Fuente:
Semarnat. *Inventario Nacional de Emisiones de México 2005*. México. 2012.

incorporadas (por ejemplo, en el año 2010, todavía el 11% de los vehículos a gasolina no contaban con sistemas de control de emisiones). Los autos particulares por ser los más numerosos, generan la mayor parte de las emisiones de las fuentes móviles; no obstante los tractocamiones, aunque menos abundantes, contribuyen en gran proporción con las emisiones de partículas debido a su consumo de diesel (GDF, 2012).

A las fuentes móviles le siguieron en importancia las fuentes de área (que emitieron 27% del total de los contaminantes de la ZMVM), las fuentes puntuales (9%) y la vegetación y los suelos (3% de las emisiones).

NORMATIVIDAD Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

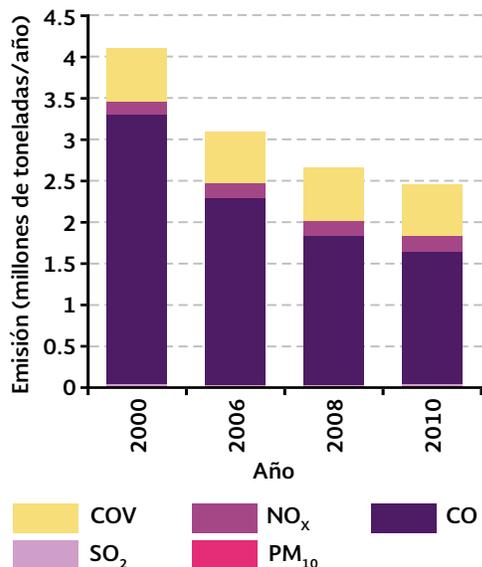
Los contaminantes atmosféricos tienen efectos negativos sobre la salud de la población, entre ellos, las enfermedades respiratorias y los problemas cardiovasculares

(ver Recuadro *Efectos de la exposición a contaminantes atmosféricos sobre la salud*). Por esta razón, en distintas zonas metropolitanas y poblaciones del país se monitorea la concentración atmosférica de los principales contaminantes: SO_2 , CO , bióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, partículas suspendidas totales (PST) y plomo (Pb). Para cada uno de ellos se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire que establece las concentraciones máximas que no deben sobrepasarse en un periodo definido, con el objeto de garantizar la protección de la salud de la población, incluyendo a los grupos más susceptibles ([Cuadro D3_R_AIRE01_03](#)).

Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994; en octubre de 2002 se publicó la modificación a la norma referente a ozono (DOF, 2002) y en septiembre de 2005 la modificación a la de partículas, en la que se incluyen por primera vez las $\text{PM}_{2.5}$ (DOF, 2005).

Emisión de contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México¹ 2000 - 2010

Figura 5.5



Nota:

¹ La ZMVM incluye las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del estado de México pero, para fines de comparación con los inventarios de años anteriores, en esta gráfica sólo se incluyen 18 municipios del estado de México además de todas las delegaciones del Distrito Federal.

Fuente:

GDF. *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. 2012.

Por otro lado, la Semarnat tiene la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas que señalan los procedimientos para la medición y calibración del equipo destinado a determinar las concentraciones de los contaminantes, los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera y las especificaciones de los combustibles que se utilizan.

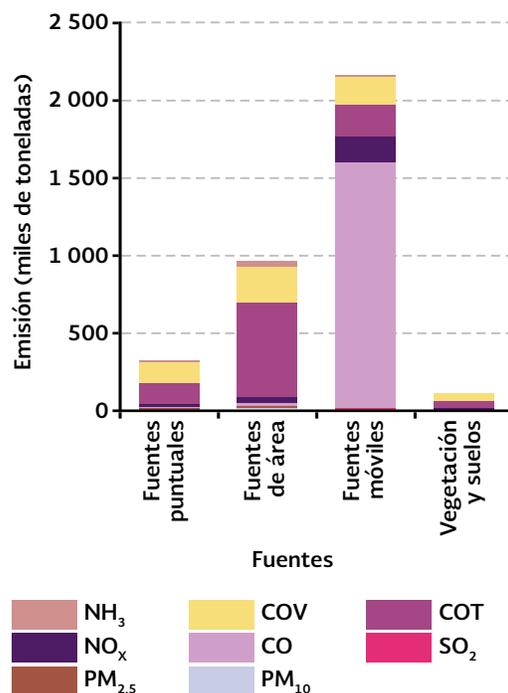
Para conocer la concentración de contaminantes, se han establecido estaciones y redes de monitoreo atmosférico. Actualmente se cuenta con equipos instalados para la medición de contaminantes atmosféricos en 82 zonas metropolitanas y poblaciones (Mapa 5.10; **IB 1.1-9; IC 6**). Tomando en cuenta sólo a las poblaciones con más de cien mil habitantes, existen 35 localidades que no cuentan con monitoreo de la calidad del aire en el país. En



todas las estaciones y redes de monitoreo, los contaminantes se miden aplicando procedimientos estandarizados a nivel internacional. La red más completa y antigua se localiza en la ZMVM, que cuenta con 26 estaciones de monitoreo automático (EMA), 2 estaciones de monitoreo manuales, 8 mixtas y 2 unidades móviles. Las estaciones de monitoreo registran, entre otras variables, las concentraciones de O₃, CO, SO₂, NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}, considerados como contaminantes criterio y de los cuales se tiene más información acerca de sus efectos sobre la salud. Debido a que la concentración de plomo en la ZMVM ha disminuido significativamente y se considera que está bajo control, no se incluye en este reporte.

Emisión de contaminantes atmosféricos por fuente en la Zona Metropolitana del Valle de México¹, 2010

Figura 5.6



Nota:

¹ Los totales no coinciden con las emisiones de 2010 presentadas en la gráfica 5.5 debido a que aquí se considera la ZMVM completa (16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del estado de México).

Fuente:

GDF. *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. 2012.

Las poblaciones que habitan en zonas con elevada concentración de contaminantes están expuestas a un mayor riesgo de contraer enfermedades asociadas a la contaminación atmosférica. Por ejemplo, existen estudios que han analizado el efecto de las emisiones de partículas sobre la salud de las personas, en los que se plantea que un incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente) causan un aumento en la mortalidad de 1.83 y 1.48% respectivamente (García-Suástegui *et al.*, 2011). Análisis epidemiológicos en Estados Unidos sugieren que existe un incremento de cáncer de pulmón asociado a la exposición a contaminantes atmosféricos y, en particular, a las PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.

Asimismo se ha reportado que la exposición de mujeres embarazadas a $\text{PM}_{2.5}$ puede generar un déficit en el crecimiento (peso y estatura) de los recién nacidos. El estudio también encontró evidencia de que los fetos masculinos son más sensibles a la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ si son expuestos a una concentración promedio de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ya que nacen con un déficit promedio de 189 gramos de peso y 1.1 centímetros de estatura, en comparación con los efectos sobre los fetos femeninos cuyo déficit al nacer es de 17 gramos y 0.36 centímetros (Jedrychowski, *et al.*, 2009).

Diversos análisis llevados a cabo en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) han encontrado una asociación entre las concentraciones de ozono y el

incremento en admisiones hospitalarias por asma. También reportan una correlación entre el incremento de mortalidad en la población total y grupos vulnerables como niños y adultos mayores (GDF, Semarnat, SSA, GEM, 2002).

Para la misma ZMVM se analizó la relación entre la presencia de aductos¹, esto es, alteraciones del material genético por la incorporación de compuestos químicos, y la concentración de partículas (PM_{10}) en el aire. El estudio encontró que los niveles de aductos en ADN de células sanguíneas fueron significativamente mayores en la época seca donde la concentración de PM_{10} fue mayor que en la época de lluvias (García-Suástegui *et al.*, 2011).

Nota:

¹ Los aductos son alteraciones del ADN que se producen cuando un compuesto químico se une a su cadena. La presencia de estos aductos se ha relacionado con un elevado riesgo de desarrollo de cáncer.

Referencias:

GDF, Semarnat, SSA, GEM. *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. México. 2002.

García-Suástegui, W. A., A. Huerta-Chagoya, Carrasco-Colín, K. L., Pratt, M., John, K., Petrosyan, P., Rubio, J., Poirier, M. y M. Gonsebatt. Seasonal variations in the levels of PAH-DNA adducts in young adults living in Mexico City. *Mutagenesis* 26: 385-391. 2011.

Jedrychowski, W., F. Perera, Mrozek-Budzyn, D., Mroz, E., Flak, E., Spengler, J., Edwards, S., Jacek, R., Kaim, I. y Z. Skolicki. Gender differences in fetal growth of new borns exposed prenatally to airborne fine particulate matter. *Environmental Research* 4: 447-456. 2009.

Zonas metropolitanas o poblaciones con equipos instalados para el monitoreo de la calidad del aire, 2012

Mapa 5.10



Fuente:

Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, INE, Semarnat. México. 2012.

Otras ciudades que cuentan con redes de monitoreo importantes y con registros relativamente antiguos (mediados de los noventa) son las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, Toluca y ciudades fronterizas como Tijuana, Mexicali y Ciudad Juárez. Algunas ciudades se concentran en evaluar alguno o varios contaminantes de importancia local, como es el caso de Ajacuba y Tepetitlán en Hidalgo, Guaymas y Navojoa en Sonora, que se enfocan en la medición de partículas. 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.

Con el fin de hacer más comprensible el nivel de contaminación del aire, en México se ha usado un índice conocido como Imeca (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), que consiste en una transformación de las concentraciones del contaminante a un número adimensional. En la escala utilizada por el Imeca, los valores están determinados en múltiplos de 50 Imeca.

La difusión del Imeca se inició en 1986 a través de diversos medios y actualmente se transmite por radio, televisión, Internet y prensa escrita. Sin embargo, al no existir un documento oficial que definiera el significado y la utilidad del Imeca, así como los lineamientos para su generación, uso y difusión, no existió uniformidad de sus procedimientos entre los distintos generadores en los estados. Esto llevó a que en el Distrito Federal se elaborara la norma ambiental NADF-009-AIRE-2006 (GDF, 2006), que establece los lineamientos que debe cumplir el Imeca. Dicha norma tiene aplicación en el Distrito Federal y se extiende a los municipios conurbados del estado de México que forman parte de la ZMVM. De acuerdo con esta norma, el Imeca tiene como objetivo informar a la población de manera clara, oportuna y continua sobre los niveles de contaminación atmosférica, los probables daños a la salud y las medidas de protección que puede tomar. Con esta nueva reglamentación, la difusión del Imeca se realiza por medio de colores y calificativos sobre la calidad del aire, de acuerdo con el grado de riesgo que represente para la salud humana (Tabla 5.1). Sin embargo, para analizar el cumplimiento de las normas de calidad del aire en una región determinada, es más recomendable utilizar

indicadores que se generen a partir de las bases de datos validadas por las redes de monitoreo atmosférico y con la aplicación de los mismos criterios durante el procesamiento de la información (INE, 2007).

Con base en los valores del Imeca, las autoridades pueden declarar una contingencia ambiental, que se refiere a una situación eventual y transitoria, en la que la concentración de contaminantes en la atmósfera alcanza niveles dañinos a la salud de la población en general. Algunas de las ciudades y zonas industriales que cuentan con programas de contingencias ambientales por contaminación atmosférica son el Valle de México, Guadalajara, Monterrey y Salamanca. En la ZMVM la última vez que se declaró una contingencia ambiental por ozono fue en el año 2002 y por PM_{10} , en 2005.

En la ZMVM, algunas de las medidas que se aplican, completa o parcialmente, durante una contingencia son la suspensión de: actividades deportivas, cívicas y de recreo al aire libre, quemas a cielo abierto, actividades de bacheo y pintado, restricción a la circulación vehicular adicional al programa Hoy No Circula y restricción a la actividad industrial, entre otras.

Interpretación del Imeca

Tabla 5.1

Imeca	Condición	Efectos a la salud
0 – 50	Buena	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51 – 100	Regular	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades.
101 – 150	Mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
151 – 200	Muy mala	Causante de mayores efectos adversos a la salud de la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
> 200	Extremadamente mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.

Fuente:

GDF. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Imeca. 2011. Disponible en: www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=22. Fecha de consulta: septiembre de 2012.

CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES DEL PAÍS

Existen diversas formas de abordar el análisis de la calidad del aire. En este informe se empleó el número de días al año en los que se excede el valor de la norma asociada a cada contaminante, y los promedios anuales de las concentraciones diarias de PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , O_3 , NO_2 y CO. Los días en que se excede el valor de la norma reflejan la magnitud del problema, ya que muestran la frecuencia con la que se rebasa el umbral definido para proteger la salud; además, junto con las tendencias de los promedios anuales de las concentraciones, permiten tener una visión de la dinámica temporal de la calidad del aire y son un medio para evaluar la efectividad de las medidas que se toman para controlar el problema. Para

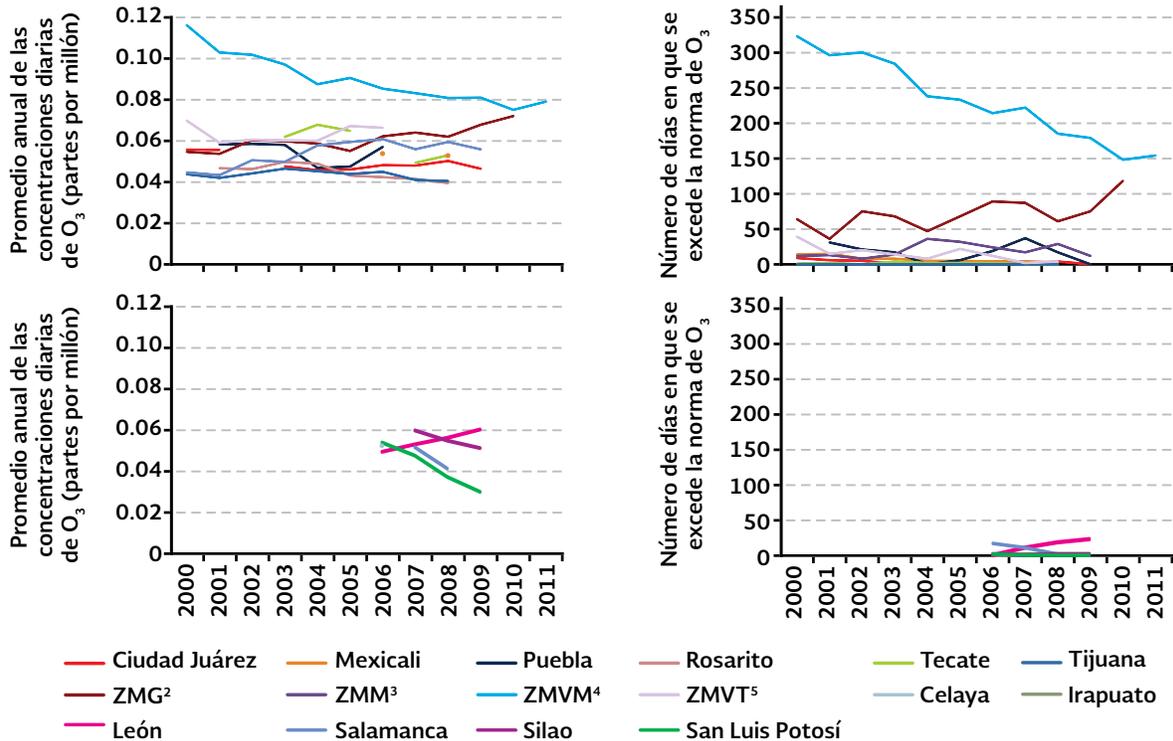
tener una imagen más integral de la calidad del aire, también se ha incluido aquí el número de días por año, en los que se excede la norma de cualquiera de los contaminantes criterio, ya que si por lo menos uno de los contaminantes excede sus niveles permitidos, la calidad del aire no es adecuada. En este capítulo se describe la calidad del aire de aquellas ciudades del país que cuentan con información confiable para realizar análisis adecuados.

Si se examina la frecuencia con la que se exceden los límites establecidos en las normas, los dos contaminantes más importantes en las ciudades con monitoreo son el O_3 (Figura 5.7; Cuadro D3_AIRE01_06; IB 1.1-7) y las PM_{10} (Figura 5.8; IB 1.1-5). El O_3 es el principal problema en la ZMVM, ya que el número de días que se rebasa la norma



Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma horaria de ozono¹, 2000 - 2011

Figura 5.7



Notas:

- ¹ Norma (Modificación a la NOM-020-SSA1-1993): no exceder 0.11 ppm en una hora en un periodo de un año.
- ² ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- ³ ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.
- ⁴ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- ⁵ ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

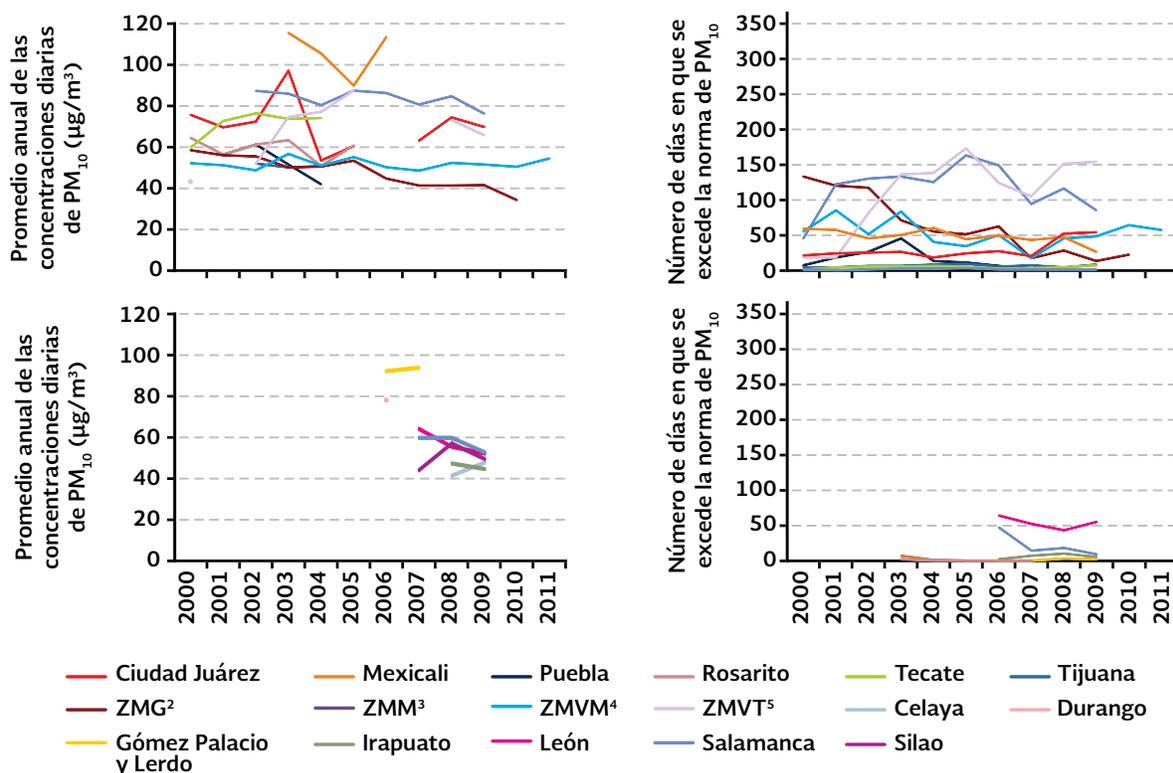
horaria aún es elevado (154 días en 2011, que representan 42% del año); no obstante es considerablemente más bajo si se compara con los registros de principios de la década pasada (por ejemplo, 323 días en el año 2000). La ZMG ha reportado para el periodo 2001-2010 valores de entre 36 y 118 días en que se excede la norma. Las demás ciudades han reportado valores menores a 40 días en los periodos para los que existe información. Las ZMVM, ZMM, ZMG y Rosarito muestran una tendencia de reducción de los promedios anuales de las concentraciones diarias de O_3 , mientras que Ciudad Juárez, Puebla, Tecate, Tijuana y la ZMVT no mostraron cambios significativos (Figura 5.7; **IB 1.1-7**).



En el caso de las PM_{10} , aunque en algunas de las ciudades no se puede observar una clara tendencia o bien no hay cambios significativos, la ZMG es la única que reporta una mejora en el periodo 2000-2010. En contraste, la ZMVT incrementó significativamente el número de días en que se rebasa la norma en el periodo 2000-2010. Las ZMVT y ZMM son las que reportan el mayor número de días (154 y 85 días, respectivamente en 2009) en que se excede la norma diaria. En contraste, hay ciudades como Tijuana, Tecate, Rosarito, Celaya, Irapuato y Silao en las que la frecuencia con que se rebasa el límite permitido es muy baja (entre 1 y 8 días en 2009) o llega a cero en el caso de Puebla en 2008 y 2009 (Figura

Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma¹ de 24 horas de partículas menores a 10 micrómetros, 2000 - 2011

Figura 5.8



Notas:

- ¹ Norma (Modificación a la NOM-025-SSA1-1993): no exceder 120 $\mu g/m^3$ en 24 horas 2% de veces al año.
- ² ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- ³ ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.
- ⁴ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- ⁵ ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

5.8; Cuadro D3_AIRE01_06; IB 1.1-5). En lo que se refiere a los promedios anuales de las concentraciones diarias, sólo la ZMG mostró una clara reducción, mientras que Ciudad Juárez, Mexicali, Rosarito, Tecate, ZMM, ZMVM y ZMVT se mantuvieron con niveles constantes. El resto de las ciudades no muestra una tendencia clara ya que aún cuentan con pocos datos (Figura 5.8; IB 1.1-5).

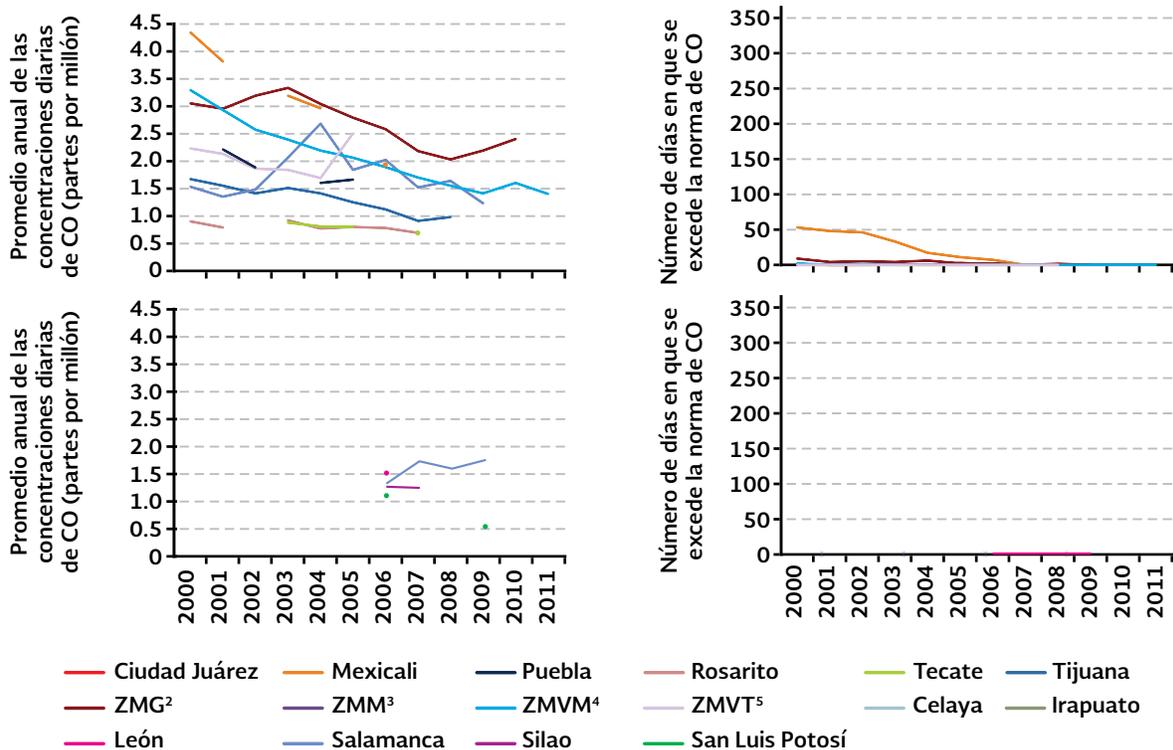
En los últimos años, la concentración atmosférica de CO no ha sido un problema grave en prácticamente ninguna de las ciudades con monitoreo. El número de días en que se rebasa el límite permitido de CO ha disminuido en algunas ciudades, como Mexicali y ZMG y se ha mantenido constante, entre 3 y cero días, en Ciudad Juárez, Puebla, Rosarito,

Tecate, Tijuana, ZMM, ZMVM y ZMVT (Figura 5.9; Cuadro D3_AIRE01_06; IB 1.1-3).

El SO₂ también está controlado en casi todas las ciudades en las que se mide; en el periodo reportado, prácticamente no se rebasó la norma ningún día, con excepción de Salamanca, que en el año 2000 reportó 51 días con niveles mayores a los permitidos; no obstante, en el 2009 ya no se excedió la norma ningún día en esa ciudad (Figura 5.10; Cuadro D3_AIRE01_06; IB 1.1-6). Reflejo de lo anterior fueron las concentraciones diarias relativamente bajas en todas las ciudades con monitoreo en el periodo, con la excepción ya señalada de Salamanca, que aunque reportaba concentraciones mayores, han disminuido significativamente en los últimos años.

Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma¹ de 8 horas de monóxido de carbono, 2000 - 2011

Figura 5.9

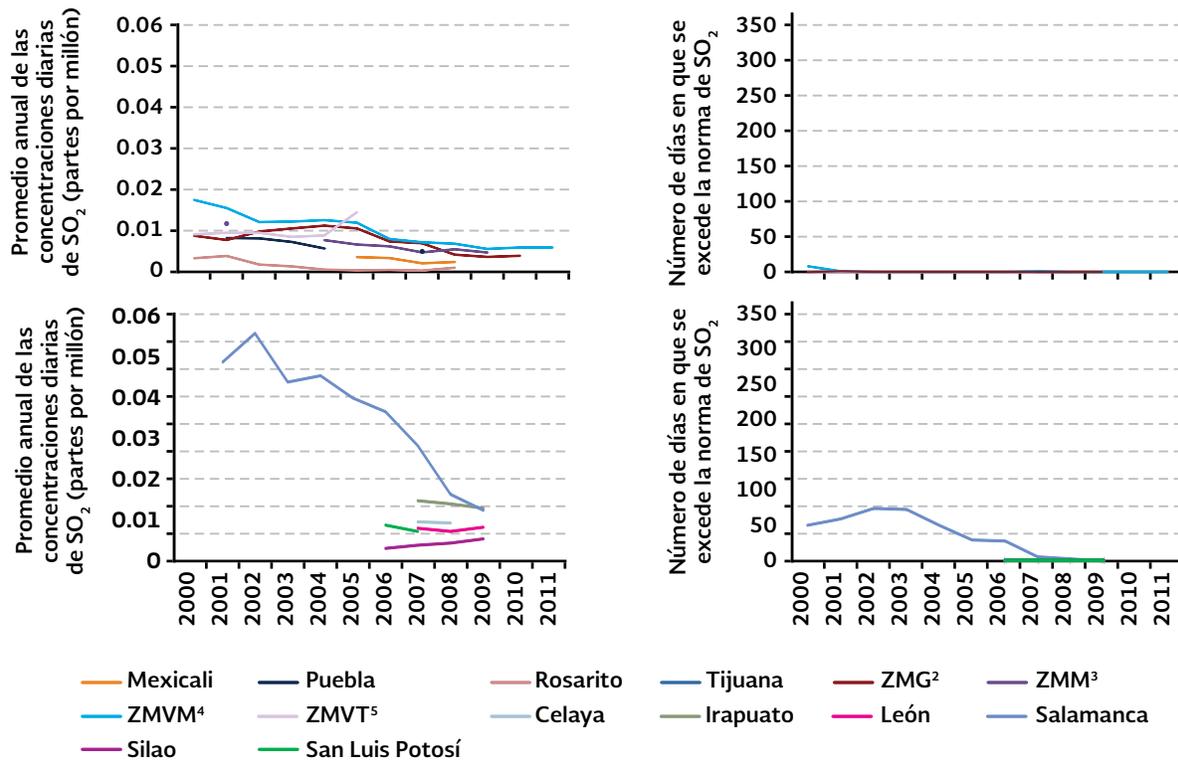


Notas:
¹ Norma (NOM-021-SSA1-1993): no exceder 11 ppm en promedio móvil de 8 horas una vez al año.
² ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
³ ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.
⁴ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
⁵ ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:
 Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma¹ de 24 horas de bióxido de azufre, 2000 - 2011

Figura 5.10



Notas:

- ¹ Norma (NOM-022-SSA1-1993): no exceder 0.13 ppm en 24 horas una vez a año.
- ² ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- ³ ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.
- ⁴ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- ⁵ ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

El problema de la contaminación por NO₂ también está controlado, prácticamente en ninguna ciudad con monitoreo se rebasa la norma (sólo en la ZMG se rebasó la norma seis días en 2010); las concentraciones se han mantenido relativamente constantes y por debajo de 0.05 partes por millón en la mayoría de las ciudades (Figura 5.11; [Cuadro D3_AIRE01_06](#); **IB 1.1-4**).

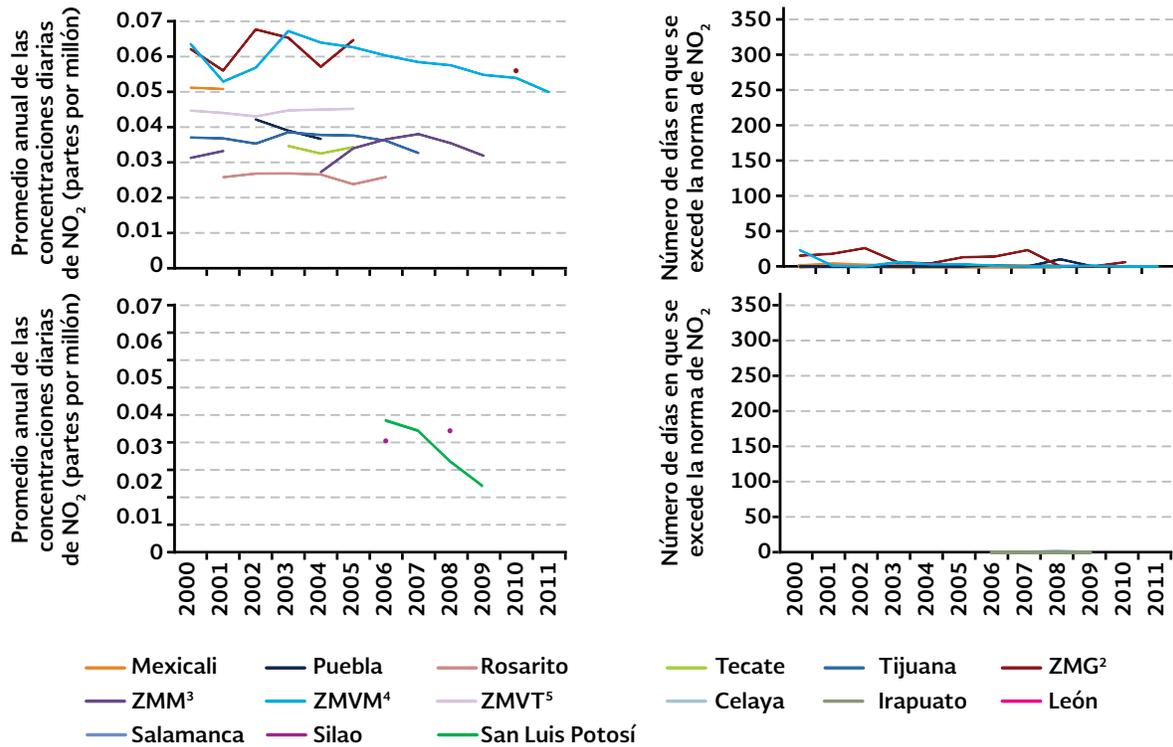
número de días por año en los que se rebasó la norma se mantuvo prácticamente en los mismos niveles en la ZMM y la ZMVM, a diferencia de Mexicali cuyos valores oscilaron entre 13 días en 2005 y 110 en 2007 (Figura 5.12; [Cuadro D3_AIRE01_06](#); **IB 1.1-8**).

Aunque en las gráficas anteriores es posible analizar con detalle la situación de cada contaminante en las distintas zonas metropolitanas y algunas ciudades, no se puede evaluar de manera integral la calidad del aire. Por ello y con el fin de mostrar de manera resumida la situación de la calidad del aire en cada ciudad con monitoreo, en la Figura 5.13 se presenta el número de días en los que



Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma horaria de bióxido de nitrógeno, 2000 - 2011

Figura 5.11



Notas:

- ¹ Norma (NOM-023-SSA1-1993): no exceder 0.21 ppm en una hora una vez al año.
- ² ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara.
- ³ ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.
- ⁴ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.
- ⁵ ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

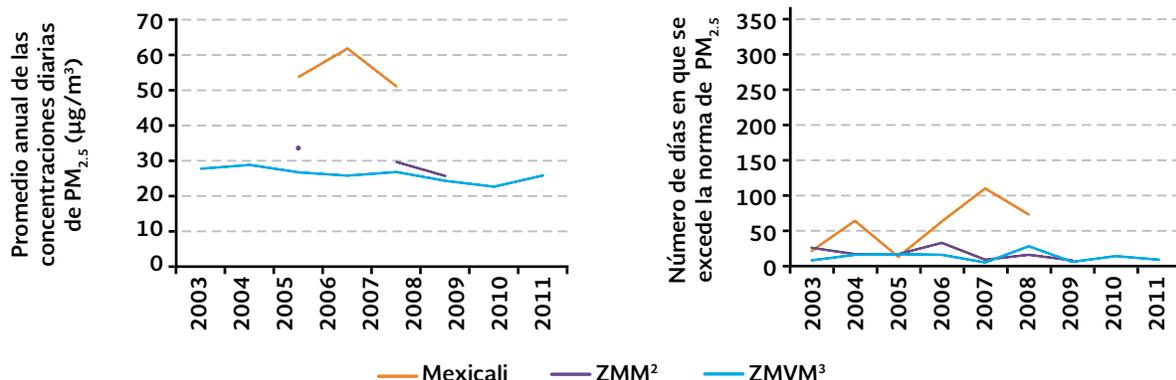
por lo menos alguno de los contaminantes monitoreados excedió su límite establecido en la norma. Esta información resulta relevante en el análisis, dado que la calidad del aire se deteriora cuando al menos uno de los contaminantes monitoreados excede los límites de concentración establecidos en las normas.

De acuerdo con esta información, las grandes ciudades son las que tienen los principales problemas, aunque con tendencias a disminuir en los años recientes. Por ejemplo, la contaminación del aire en la ZMVM a principios de la década pasada rebasaba los límites permitidos entre 329 y 305 días al año, mostrando posteriormente una clara tendencia a la baja llegando en 2010 a 178 días. Guadalajara y Mexicali también reportaron

un número significativo de días en el año 2000 (157 y 117 respectivamente) con un posterior descenso (123 días en 2010 y 26 en 2009 respectivamente). En el caso de Salamanca, aunque ha llegado a reportar hasta 79 días (año 2006) con valores mayores a los permitidos, en el año 2009 esta cifra disminuyó a 11 días. En contraste, Monterrey y Valle de Toluca han incrementado el número de días en los que se rebasan los límites establecidos en las normas. En el resto de las ciudades con monitoreo no se han excedido los límites en más de 58 días al año, de hecho en algunas de ellas el máximo ha sido de 11 días, tal es el caso de Tijuana, San Luis Potosí, Irapuato, Celaya, Silao, Tecate, Rosarito, y la Zona Metropolitana de Hidalgo y Tepeji del Río de Ocampo. Es importante señalar que la tendencia del número de días en que se exceden

Promedio anual de las concentraciones diarias y número de días en que se excede el valor de la norma¹ de 24 horas de partículas menores a 2.5 micrómetros, 2003 - 2011

Figura 5.12



Notas:

¹ Norma (Modificación a la NOM-025-SSA1-1993): no exceder 65 µg/m³ en 24 horas 2% de veces al año.

² ZMM: Zona Metropolitana de Monterrey.

³ ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

las normas de salud, en cada ciudad refleja su condición particular, por lo que la comparación entre ellas debe hacerse con reserva pues no todas las ciudades o zonas urbanas monitorean todos los contaminantes (Figura 5.13).

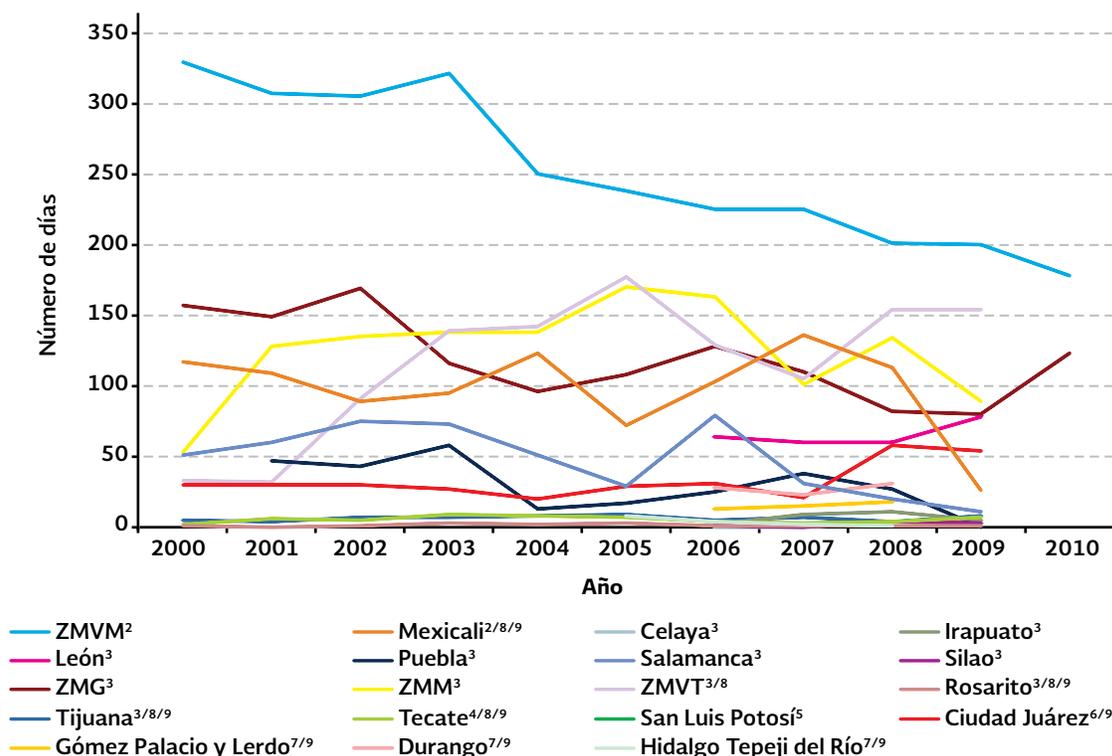
A pesar de que actualmente existen estaciones de monitoreo de los principales contaminantes en 82 localidades, aún son insuficientes para contar con una cobertura nacional. Además, en la mayoría de las ciudades, la información todavía no tiene las características necesarias para hacer un análisis confiable de la tendencia de las concentraciones de contaminantes: sólo veinte de ellas cuentan con datos suficientes para conocer la calidad del aire de al menos tres años consecutivos, nueve localidades para cinco años y únicamente las zonas metropolitanas de Monterrey, Guadalajara y Valle de México han generado de manera constante la información desde que iniciaron operaciones (INE, Semarnat, 2011). En el caso de la ZMVM su red de monitoreo también registra información relacionada con lluvia ácida. En 1987 se puso en marcha el Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ver Recuadro *Lluvia ácida: causas y consecuencias*).

En resumen, del análisis de las tendencias de los principales contaminantes se desprende que en general la calidad del aire en las principales ciudades del país ha mejorado en los últimos años. A pesar de que en la ZMVM la calidad del aire aún es deficiente, debido principalmente a los niveles de O₃, es importante resaltar que se presenta una tendencia a la baja en su concentración, así como en la de otros contaminantes, por ejemplo el CO, SO₂ y PM_{2.5}. Sin duda, la eliminación del plomo de la gasolina, la reducción del contenido de azufre (tanto de la gasolina como del diesel), la introducción al mercado de gasolina oxigenada y reformulada, el establecimiento de límites de emisión más estrictos para los vehículos nuevos, así como la adopción de tecnologías vehiculares cada vez más eficientes, han contribuido de manera significativa a que el plomo ya no sea un problema de contaminación en el aire y que los niveles de SO₂, CO y NO₂ raramente sobrepasen los valores de las normas.

Como respuesta al problema de la contaminación del aire, el gobierno federal, en coordinación con autoridades estatales y municipales y con la participación del

Número de días en los que al menos un contaminante excede algún límite de las normas de calidad de aire, 2000 - 2010¹

Figura 5.13



Notas:

¹ Los años para los cuales no se reportan datos se debe a que no existe medición, información o actualización.

² PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, CO, NO₂ y SO₂

³ PM₁₀, O₃, CO, NO₂ y SO₂

⁴ PM₁₀, O₃, CO y NO₂

⁵ O₃, CO, NO₂ y SO₂

⁶ PM₁₀, O₃ y CO

⁷ PM₁₀

⁸ El número de días en 2009 sólo corresponde a las PM₁₀.

⁹ Los días corresponden a muestreos de 24 horas con equipo manual.

Fuente:

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2012.

sector académico ha establecido programas para mejorar la calidad del aire, conocidos como Proaires. Estos representan uno de los principales instrumentos desarrollados para revertir las tendencias de deterioro e incorporan una visión de mediano y largo plazos, además de que proponen acciones concretas para la reducción y control de las emisiones (Semarnat, 2012). Las acciones contenidas en estos programas están orientadas a las fuentes con mayor aporte de contaminantes e incluyen medidas de reducción factibles en su costo y con un beneficio significativo en la calidad del aire. Los Proaires se han

aplicado en zonas metropolitanas que por sus características, como número de habitantes, actividades industriales, parque vehicular y condiciones climáticas y geográficas, entre otras, presentan los mayores problemas de contaminación atmosférica.

Las zonas metropolitanas para las que se ha desarrollado por lo menos un Proaire son el Valle de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Ciudad Juárez, Mexicali, Tijuana-Rosarito, Salamanca, Puebla, León, Cuernavaca, Durango y la Comarca Lagunera (que incluye parte de Coahuila y Durango), Querétaro-

La lluvia, deposición o precipitación ácida se forma a partir de la reacción química de sus precursores -dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x)- con la humedad atmosférica. Los ácidos sulfúrico y nítrico que se forman se depositan en construcciones y monumentos, vegetación, suelo y cuerpos de agua a través de gases o partículas (deposición seca) o de lluvia, nieve o niebla (deposición húmeda).

Para detectar la presencia de lluvia ácida en una región determinada se utiliza como referencia el valor de pH^1 del agua de lluvia, que es de 5.6 (SMAGDF *et al.*, 2011). Los precursores de la lluvia ácida provienen de fuentes naturales, como los incendios forestales, las emisiones volcánicas y la materia orgánica en descomposición, o de fuentes antropogénicas relacionadas con la agricultura y la quema de combustibles fósiles en la industria, la generación de energía y el sector transporte (EPA, 2011; SMAGDF *et al.*, 2011). Los efectos de la deposición ácida (seca y húmeda) dependen de diversos factores, como el nivel de acidez del agua, la composición química y la capacidad de amortiguamiento de los materiales donde cae, así como de la susceptibilidad de la vegetación y de los organismos expuestos a ella (INE, 2007).

EFFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

La lluvia ácida puede afectar prácticamente a todos los ecosistemas.

Llega a los cuerpos de agua directamente por los eventos pluviales o por las escorrentías de las zonas aledañas (EPA, 2011). Las escorrentías pueden además arrastrar elementos tóxicos como el aluminio, el cual agrava el problema de la acidificación de las aguas porque afecta directamente a los organismos (Xu y Ji, 2001). La lluvia ácida puede producir la acidificación de lagos y arroyos con baja capacidad de amortiguamiento; los lagos que tienen pH entre 6 y 8 pueden mitigar mejor el efecto ácido de la lluvia; mientras que los que son naturalmente ácidos, presentan menor capacidad de amortiguamiento (EPA, 2011).

La acidificación de los cuerpos de agua tiene diversas consecuencias en los ecosistemas y, en particular en las redes tróficas. Por ejemplo, se ha observado la disminución de las poblaciones de invertebrados acuáticos así como del peso y talla de los peces (EPA, 2011), lo que a su vez impacta el éxito reproductivo y la abundancia de la aves que se alimentan de ellos (Graveland, 1998).

En los ecosistemas terrestres la acidez de la lluvia ocasiona la lixiviación de los nutrientes del suelo antes de que las plantas puedan aprovecharlos, provoca daños y alteraciones fotosintéticas en las hojas y cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo (Calva *et al.*, 1991; Saavedra-Romero *et al.*, 2003). A nivel mundial, se ha estimado que entre 7 y 17% de los ecosistemas

¹ Es una medida que determina la acidez o alcalinidad de cualquier solución. La escala va de 0 (ácido) a 14 (básico). El 7 es neutro.

terrestres están en riesgo crítico de acidificación (Bouwman *et al.*, 2002). La precipitación ácida también perjudica los cultivos agrícolas al dañar las hojas y reducir la calidad del suelo (SMAGDF *et al.*, 2011).

En México se han realizado diversos estudios para evaluar el efecto de la lluvia ácida en los ecosistemas, particularmente en los bosques que rodean a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En Chapa de Mota y San Luis Ayucan al noreste del Valle de México se han registrado valores muy ácidos en la lluvia (Velasco-Saldaña *et al.*, 2002). En el Parque Nacional del Desierto de los Leones, en los bosques de *Abies religiosa* se han registrado valores de pH entre 5.11 y 6.64 en la lluvia (Saavedra-Romero *et al.*, 2003). Esta acidez está relacionada con diferentes tipos de daño a la vegetación como pérdida de hojas y ramas, necrosis foliar, clorosis, descortezamiento y deficiencia nutrimental (Saavedra-Romero *et al.*, 2003).

Además de sus efectos sobre los ecosistemas boscosos, la lluvia ácida también daña la roca caliza de edificios y monumentos históricos. Por ejemplo, Bravo *et al.* (2006) documentaron los daños en la zona arqueológica de El Tajín, en Veracruz, donde se han registrado valores de pH menores a 5.62. El Tajín está rodeado de fuentes potenciales de precursores de lluvia ácida con alto

contenido de azufre (plantas eléctricas y refinerías), los cuales son transportados por las corrientes de viento que usualmente atraviesan el sureste del Golfo de México.

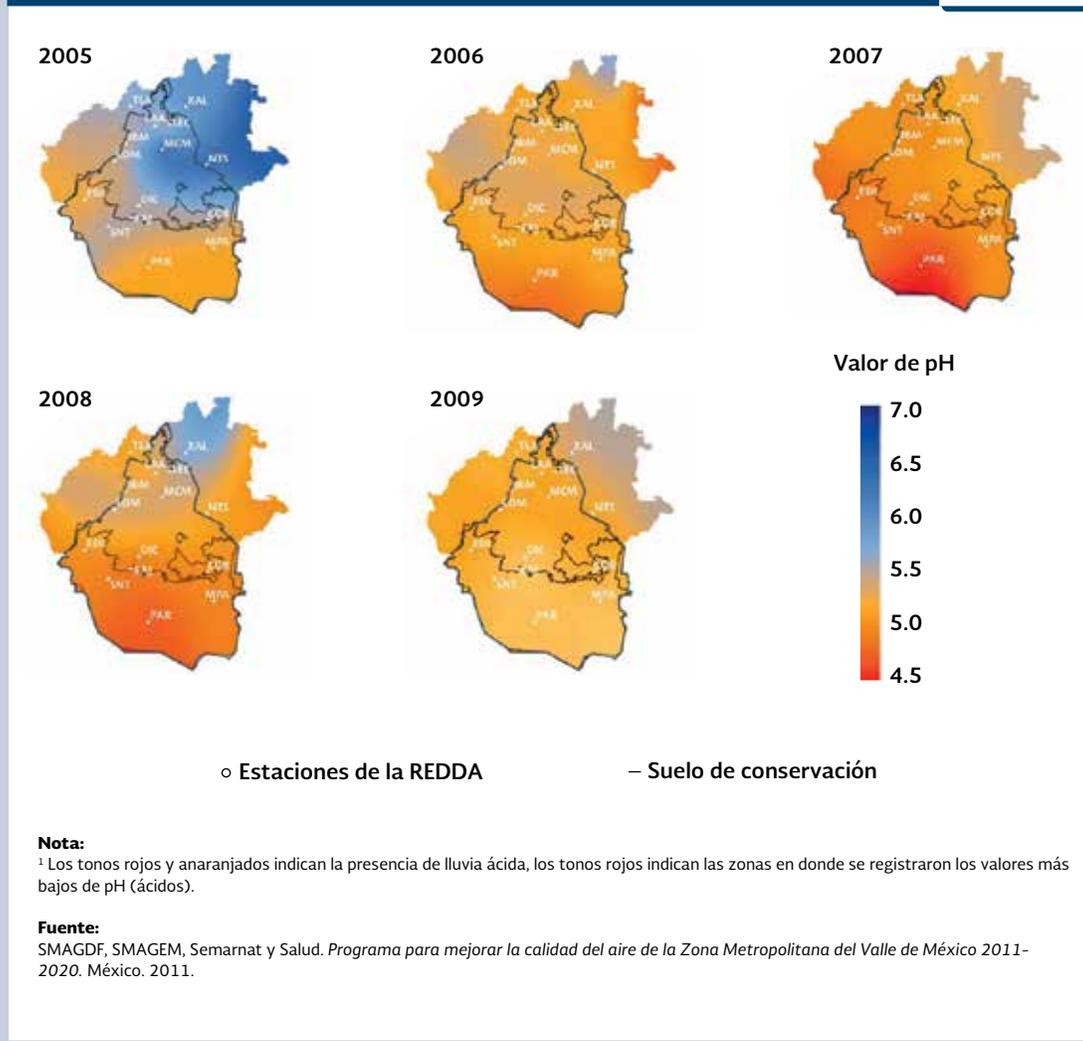
MONITOREO DE LA LLUVIA ÁCIDA EN LA ZMVM

A nivel nacional no hay un programa de monitoreo específico para la lluvia ácida; sin embargo, en la década de los ochenta se realizaron las primeras investigaciones sobre su presencia, caracterización y efectos en la ZMVM. En 1987 comenzó su monitoreo sistematizado, pero es hasta 2001 que se consolidó la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), y posteriormente se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (Simat). Hasta el año 2006, la REDDA estaba formada por 16 estaciones de monitoreo distribuidas en las áreas urbana, rural y de conservación ecológica de toda la ZMVM. En estas estaciones se registra el pH y la concentración de iones presentes en la deposición húmeda (Muñoz *et al.*, 2008).

Aunque en la ZMVM las emisiones de SO₂ y NO_x son mayores en las regiones centro, noroeste y noreste, lo cual se asocia con la afluencia vehicular, los vientos tienen una dirección norte-suroeste, lo que propicia que los contaminantes sean trasladados hacia el sur de la Ciudad de México, donde se acumulan dando lugar a precipitaciones ácidas. Los registros

Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMVM, 2005 - 2009

Figura a



históricos en la ZMVM muestran que en 1989 se registró el valor más ácido (3.4; INE, 2007). En la Figura a se muestra el comportamiento de la lluvia ácida en los últimos años y es evidente que la intensidad del fenómeno varía entre años, la superficie afectada ha aumentado y consistentemente la zona más afectada es la sur-surponiente.

Referencias:

Bouwman, A. F., D. P. Van Vuuren, R. G. Derwent y M. Posch. A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution* 141: 349–382. 2002.

Bravo, H. R. Soto, R. Sosa, P. Sánchez, A. L. Alarcón, J. Kahl y J. Ruíz. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México. *Environmental Pollution* 144: 655-660. 2006.

Calva, V. G., V. C. Flores., R. German., L. V. Ruz, R. M. Sánchez., T. A. Soto y R. Vázquez. Un fenómeno degradatorio de los bosques del Valle de México, la lluvia ácida. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 7: 105. 1991.

EPA. *Acid rain*. 2011. Disponible en: www.epa.gov/acidrain/index.html. Fecha de consulta: abril de 2012.

Graveland, J. Effects of acid rain on bird populations. *Environmental Review* 6: 41-54. 1998.

INE. *Aire*. 2007. Disponible en: www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/16/parte4_17.html. Fecha de consulta: abril de 2012.

Muñoz, R., G. S. López-Venegas y A. Campos-Díaz. *Estado de la lluvia ácida en la zona metropolitana del Valle de México*. 2008. Disponible en: www.sma.df.gob.mx. Fecha de consulta: abril de 2012.

Saavedra-Romero, D. Alvarado-Rosales, J. Vargas-Hernández y T. Hernández-Tejeda. Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa*, en el sur de la Ciudad de México. *Agrociencia* 37: 57-64. 2003.

SMAGDF, SMAGEM, Semarnat y Salud. *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. México. 2011.

Velasco-Saldaña. H. E., E. Segovia-Estrada, M. Hidalgo-Navarro, S. Ramírez-Vallejo, H. García-Romero, I. Romero, A. M. Maldonado, F. Ángeles, A. Retama, A. Campos, J. Montañón y A. Wellens. *Lluvia ácida en los bosques del poniente del Valle de México*. XXVIII Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2002.

Xu, R. K. y G. L. Ji. Effects of H_2SO_4 and HNO_3 on soil acidification and aluminum speciation in variable and constant charge soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 129: 33-43. 2001.



San Juan del Río, Villahermosa y San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez (**IB 1.1-10**). Actualmente se encuentran vigentes ocho Proaires y cinco están en fase de elaboración o actualización (Tabla 5.2). Los Proaires vigentes benefician a 36.5 millones de personas que habitan en las zonas de aplicación de las medidas para mejorar la calidad del aire; por su parte, los Proaires en elaboración beneficiarán a una población aproximada de 5.9 millones de personas (Semarnat, 2013).

Como parte de las medidas para controlar el problema de la contaminación del aire, en enero de 2006 se publicó la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, que establece nuevas especificaciones para los combustibles que se venden en México, principalmente

relacionadas con el contenido de azufre, olefinas y benceno. La comercialización de estos combustibles ha sido paulatina: por ejemplo, en enero de 2005 se introdujo al mercado la gasolina Magna de 300 partes por millón (ppm) promedio de azufre y 500 ppm máximo; en octubre de 2006 se incorporó al mercado la gasolina Premium UBA (ultra bajo azufre) de 30 ppm promedio de azufre y 80 ppm máximo para su consumo en todo el país. Además, a principios de 2007 se inició la comercialización, en la frontera norte, del diesel UBA de 15 ppm máximo, el cual desde 2009 se distribuye también en la zona metropolitana de Monterrey, mientras que desde finales del mismo año se usa en el Metrobús de la Ciudad de México.

Otras acciones emprendidas a nivel local, como la reforestación y pavimentación, los

Proaire/región	Situación	Población (millones de personas)
Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca 2012-2017	Vigente	1.8
Programa para Mejorar la Calidad del Aire, de la Zona Metropolitana de Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito 2012 - 2020	Vigente	1.8
Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012 - 2020	Vigente	5.8
Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020	Vigente	20
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Mexicali 2011-2020	Vigente	0.9
Programa para Mejorar la Calidad del Aire Jalisco 2011-2020	Vigente	4.4
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Región de la Comarca Lagunera 2010-2015	Vigente	1.2
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Durango 2009-2013	Vigente	0.6
Zona Metropolitana de Querétaro - San Juan del Río 2012-2021	En elaboración	1.4
Zona Metropolitana de Villahermosa 2012-2016	En elaboración	0.8
Región de Salamanca 2013- 2022	En elaboración	1.1
León 2013-2022	En elaboración	1.6
Zona Metropolitana de San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez	En elaboración	1
Población total beneficiada		42.4

Fuente: Semarnat. Programas de Gestión de la Calidad del Aire. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/programas.aspx>. Fecha de consulta: enero de 2013.

apoyos para la renovación del parque vehicular y el mayor control sobre las emisiones de las fuentes fijas también han sido importantes. No obstante, se requiere una mayor inversión para controlar y abatir la contaminación del aire. El gasto del sector público destinado a prevenir y controlar la contaminación atmosférica, se incrementó de 69 598 millones de pesos en 2009 (apenas el 0.1% del gasto ambiental

total) a 123 830 millones de pesos, que significaron 2.2% del gasto ambiental total, el cual incluye también actividades en materia de aguas residuales, residuos, suelos, agua subterránea, biodiversidad, paisaje, programas ecológicos de regulación y preservación, infraestructura ecológica, regulación humana de los establecimientos y educación ambiental, entre otras actividades (INEGI, 2011 y 2012).

CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es uno de los principales desafíos ambientales globales en la actualidad, con implicaciones que rebasan al ambiente, ya que sus efectos proyectados podrían tener consecuencias económicas, sociales y políticas importantes que determinarán, en buena parte, las características y condiciones del desarrollo económico en este siglo (Semarnat y SHCP, 2009). Si bien ha sido un tema muy comentado, no es igualmente comprendido, en virtud de que existen interpretaciones equivocadas en las cuales se ha tendido a responsabilizarlo de eventos con los cuales tiene poca o ninguna relación. Para comprender este fenómeno es necesario conocer, de la manera más objetiva posible y basada en fuentes de información sólidas, tanto las bases científicas del problema como las causas y posibles efectos que trae consigo. En este contexto, esta sección describe de manera general el fenómeno del cambio climático, sus causas y consecuencias, así como las medidas de mitigación y adaptación tomadas.

La atmósfera está constituida de manera natural principalmente por nitrógeno y oxígeno que, en conjunto, representan el 99.03% de los gases que la componen. El argón representa 0.93% del total y el porcentaje restante está constituido por otros gases en concentraciones más bajas –bióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, ozono (O_3), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)–, los cuales, por su capacidad de absorber calor, son llamados gases de efecto invernadero (GEI).

El clima, y particularmente la temperatura de la superficie de la Tierra, dependen del balance entre la energía solar que recibe el planeta y el calor (radiación infrarroja) que emite. Los GEI dejan pasar la radiación solar a través de la atmósfera casi sin obstáculo, pero absorben la radiación infrarroja que emite la superficie –incluso irradian nuevamente una parte de calor hacia ella–, produciendo

un efecto neto de calentamiento, de manera similar al que ocurre en los invernaderos. Sin este fenómeno, la temperatura de la Tierra sería en promedio 33°C más fría (IPCC, 2001) y muy probablemente la vida no se hubiera desarrollado o sería muy distinta de la que conocemos hoy día.

El clima es un fenómeno complejo que dista de ser constante, pues aunque existen tendencias de largo plazo, también hay variaciones naturales que se manifiestan en intervalos más cortos de tiempo. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) definió 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). A pesar de que existen varios factores que pueden afectar el clima, el IPCC concluyó en su Cuarto Informe de Evaluación de 2007 que el incremento de la temperatura promedio observado desde mediados del siglo XX a la fecha, se debe *muy probablemente*⁹ al incremento de las concentraciones de GEI de origen antropogénico (IPCC, 2007a).

EMISIONES ANTROPOGÉNICAS DE GEI

Los gases de efecto invernadero se emiten tanto por fuentes naturales como por las actividades humanas, dentro de las cuales la más importante es la quema de combustibles fósiles. A partir de la Revolución Industrial iniciada en el siglo XVIII, se intensificó significativamente la producción de bienes y servicios, la cual trajo consigo una mayor demanda y consumo de combustibles fósiles que generaron emisiones crecientes de GEI que al ser incorporadas a la atmósfera, incrementaron su concentración y, de acuerdo con la evidencia científica disponible, han promovido el calentamiento global y el cambio climático (IPCC, 2007c).

El CO_2 es el GEI más importante en términos de su volumen emitido, su larga vida en

⁹ De acuerdo con el IPCC, muy probablemente corresponde a una probabilidad mayor a 90%.

la atmósfera (entre 5 y 200 años), su forzamiento radiativo¹⁰ (1.3-1.5 Wm⁻²) y el notable incremento de su concentración en la atmósfera (IPCC, 2001). A este gas se le ha asignado un potencial de calentamiento de 1 y es usado como referencia para establecer el potencial del resto de los GEI (IPCC, 2001; NAS, 2001).

EMISIONES MUNDIALES

Debido a que el volumen de emisión mundial de CO₂ es representativo de la emisión total de GEI, ya que equivale a más del 70% de las emisiones totales y a que es el GEI para el cual se cuenta con información más confiable y homogénea a nivel mundial, en esta sección sólo se hará referencia a las emisiones de este gas por consumo y quema de combustibles fósiles como una aproximación a la emisión total de GEI. Cabe señalar que aunque la mayoría de los países que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático cuentan con un

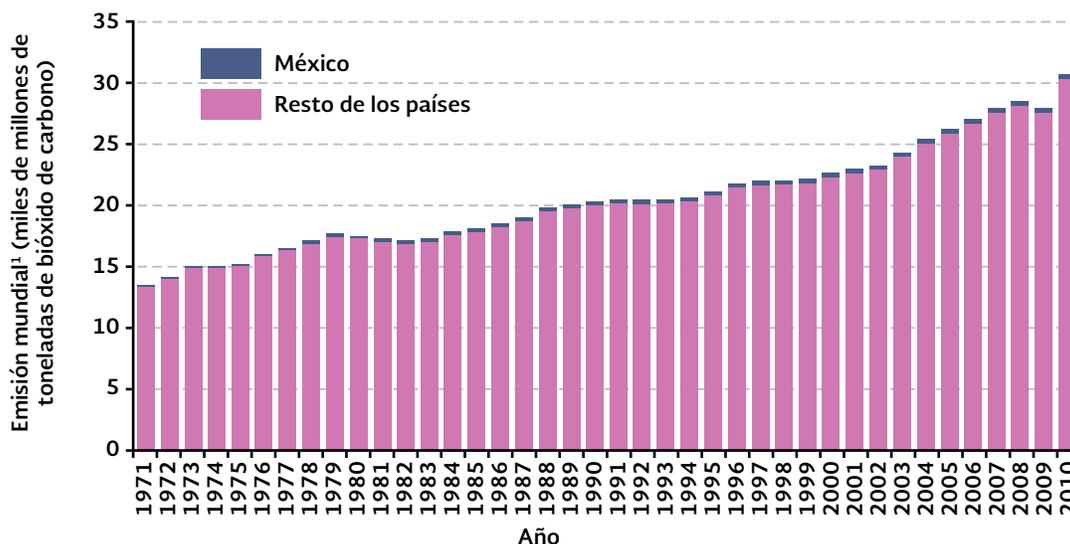
primer Inventario Nacional de Emisiones de GEI, los datos son para diferentes periodos por lo que no son completamente comparables¹¹.

La emisión de CO₂ se ha incrementado de manera directa con la quema de combustibles fósiles. Durante el periodo 1971-2010, la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 115% (Figura 5.14; **IB 1.2-1**). De acuerdo con el último informe publicado por la Agencia Internacional de Energía, en el año 2010, cinco países fueron responsables del 58% del CO₂ emitido a nivel mundial por consumo y quema de combustibles fósiles: Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India, que en conjunto emitieron 16 935.9 millones de toneladas de un total de poco más de 30.2 mil millones de toneladas generadas en el planeta (Figura 5.15). Entre estos países, destacan China y Estados Unidos, responsables de 24.7 y 18.4%, de las emisiones en el planeta en ese año, respectivamente. La contribución de México a las emisiones globales en 2010 fue de 1.4%,



Emisión mundial de CO₂ por consumo de combustibles fósiles, 1971 - 2010

Figura 5.14



Nota:

¹ No incluye las emisiones de bunkers internacionales.

Fuente:

IEA. *CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. 2012 Edition.* France. 2012.

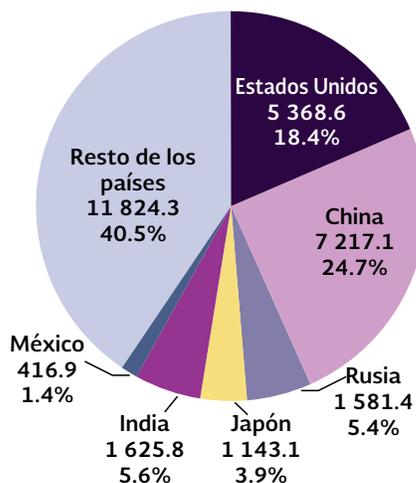
¹⁰ Índice del peso del factor (en este caso el CO₂) como mecanismo potencial de cambio climático. Se refiere al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie terrestre, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.

¹¹ Los inventarios de emisión, incluidos en las Comunicaciones Nacionales de cada país, pueden consultarse en la página electrónica: www.unfccc.int.

Contribución de los principales países emisores y México a la emisión mundial de CO₂ por consumo y quema de combustibles fósiles, 2010.

Millones de toneladas de bióxido de carbono y porcentaje

Figura 5.15



Nota:
No incluye las emisiones de bunkers internacionales.

Fuente:
IEA. CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. 2012 Edition. France. 2012.

ubicándolo entre los primeros quince países por su volumen de emisión (Figuras 5.14 y 5.15). Si se considera la emisión de bióxido de carbono en el contexto regional sobresalen Asia, Norteamérica y Europa (Mapa 5.11).

Si se examinan las emisiones per cápita a nivel mundial en 2010, destacan Qatar (36.9 toneladas de CO₂ por habitante), Kuwait (31.9), Trinidad y Tobago (31.9), Luxemburgo (21) y Brunei Darussalam (20.6) como los cinco principales emisores, con volúmenes que representaron entre 4 y 8 veces la emisión per cápita mundial (4.44 toneladas de CO₂ por habitante; Figura 5.16; IEA, 2012). En el caso de México, el valor puede variar, dependiendo de la fuente de datos, entre 3.63 (INE, Semarnat,

2012) y 3.85 toneladas de CO₂ por habitante (IEA, 2012). Estas cifras lo ubican en el lugar 70 a nivel mundial y como el segundo más bajo dentro de los países de la OCDE (10.1 toneladas por persona), muy por debajo de la cifra de Luxemburgo, Estados Unidos (17.31) y Australia (17; IEA, 2012).

EMISIONES NACIONALES

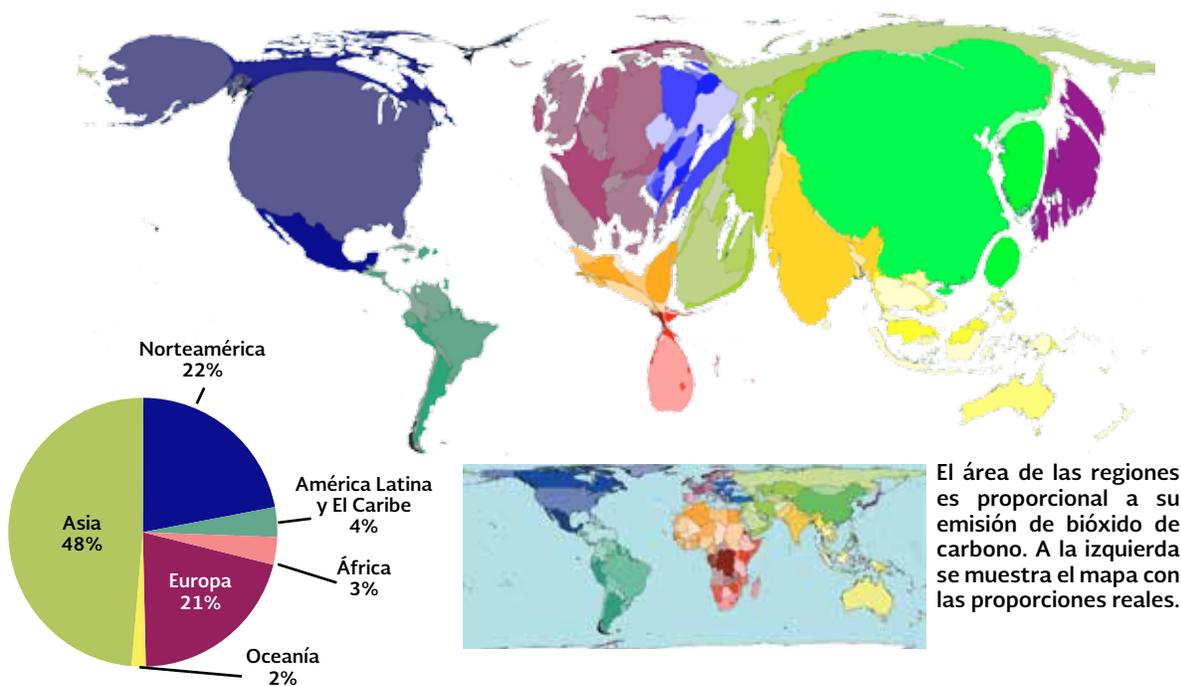
En México, la primera estimación nacional de las emisiones de GEI se publicó en 1995 con datos de 1990. Los resultados se presentaron ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997 como parte de la Primera Comunicación Nacional ante la Convención. Posteriormente, en la Segunda Comunicación Nacional (2001) se calcularon las emisiones de 1994, 1996 y 1998 con la metodología revisada del IPCC de 1996. En el año 2006 se presentó la Tercera Comunicación Nacional, que incluyó el inventario nacional con nuevos cálculos para el periodo 1990-2002. En el 2009 se presentó la Cuarta Comunicación Nacional con datos para el periodo 1990-2006 y a finales de 2012 se publicó la Quinta Comunicación Nacional con datos para el periodo 1990-2010. Cabe señalar que debido al cambio de método, las comparaciones entre inventarios no son recomendables, por lo que en este texto se hace referencia sólo a los datos reportados en el último inventario publicado.

De acuerdo con el último Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI), la emisión total de GEI aumentó aproximadamente 33.4% entre 1990 y 2010 siendo en este último año de alrededor de 748 millones de toneladas de CO₂ equivalente¹² (Figura 5.17). El sector energético, que incluye el consumo de combustibles fósiles¹³ y las emisiones fugitivas¹⁴, emitió en el 2010 poco más del 67% del total de GEI (503.8 millones

¹² CO₂ equivalente: 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 su volumen por su potencial de calentamiento.

¹³ Incluye consumo de combustibles para la generación de energía, manufactura e industria de la construcción y transporte, entre otros sectores.

¹⁴ Aquellas emisiones que se generan en las actividades antes, durante y después del minado del carbón, así como las registradas en la producción, transmisión, almacenamiento y distribución del petróleo y gas natural.



El área de las regiones es proporcional a su emisión de bióxido de carbono. A la izquierda se muestra el mapa con las proporciones reales.

Fuentes:

IEA. CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. 2011 Edition. France. 2011.
 SASI Group y M. Newman. 2006. Disponible en: www.worldmapper.org/textindex/text_index.html. Fecha de consulta: septiembre de 2012.

de toneladas de CO₂ equivalente; Figura 5.17, **IC 7**). Dentro de este sector, el consumo de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones en el país: entre 1990 y 2010 emitió entre 48.6 y 56.2%, respectivamente, del volumen total de GEI.

En el 2010, las emisiones derivadas de los desechos (que incluyen la disposición de residuos sólidos en suelo, manejo y tratamiento de aguas residuales e incineración de residuos) contribuyeron con 5.9% del total de GEI (44.1 millones de toneladas de CO₂ equivalente), mientras que la agricultura, los procesos industriales, y el cambio de uso del suelo y silvicultura fueron responsables del 12.3, 8.2 y 6.3% (92.2, 61.2 y 46.9 millones de toneladas de CO₂ equivalente, respectivamente) del total nacional.

De los seis principales GEI contemplados por el Protocolo de Kioto¹⁵, que incluyen

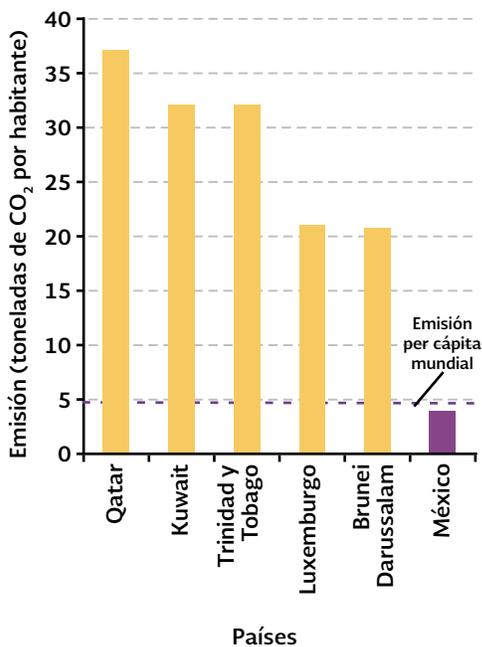
al CO₂, CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), HFC (hidrofluorocarbonos), PFC (perfluorocarbonos) y SF₆ (hexafluoruro de azufre), el CO₂ fue el que se emitió en mayor proporción a nivel nacional (66% del total de GEI emitido), seguido por el metano, con alrededor del 22% del total (Figura 5.18).

De acuerdo con el INEGI, entre 1990 y 2010 se incrementaron las emisiones nacionales de casi todos los gases de efecto invernadero, resaltando por su importancia en volumen las de CO₂, que aumentaron 24%. El CH₄ tuvo un incremento de 60% y el N₂O de 23%. En contraste, se redujeron las emisiones de PFC. Aunque los HFC y el SF₆ muestran un gran crecimiento entre 1990 y 2010 (2 307 y 320%, respectivamente), debe considerarse que sus volúmenes de emisión son muy pequeños comparados con los restantes gases.

¹⁵ Convenio internacional que busca reducir las emisiones de GEI y del que México forma parte.

Emisión per cápita de CO₂ en los principales países emisores y México, 2010

Figura 5.16



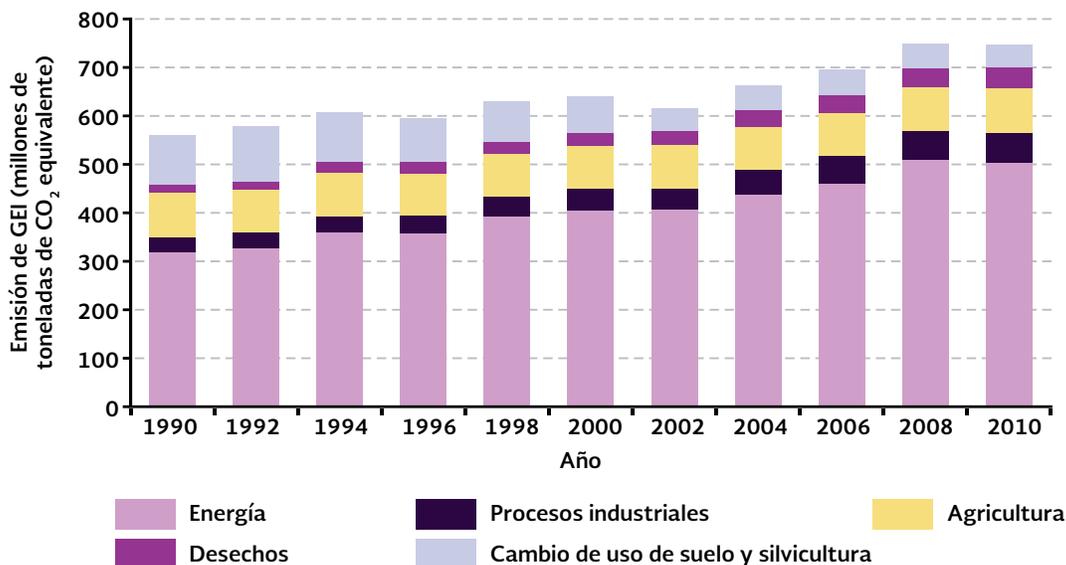
Fuente: IEA. CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights. 2012 Edition. France. 2012.

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 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 de 0.33 Wm⁻², que es equivalente al 13% del forzamiento radiativo de todos los GEI mezclados mundialmente (IPCC, 2007a).

En el contexto internacional, si se examina la generación de CO₂ con referencia al Producto Interno Bruto (PIB) del país, México (0.55 kg de CO₂ por dólar a precio de 2000) ocupó en 2009 el lugar 23 dentro de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), después de Grecia, Nueva Zelanda y Estados Unidos, entre otros (IEA, 2011). A nivel mundial, nuestro país se ubica en el lugar 53, con un valor por

Emisión nacional de gases de efecto invernadero por fuente, 1990 - 2010

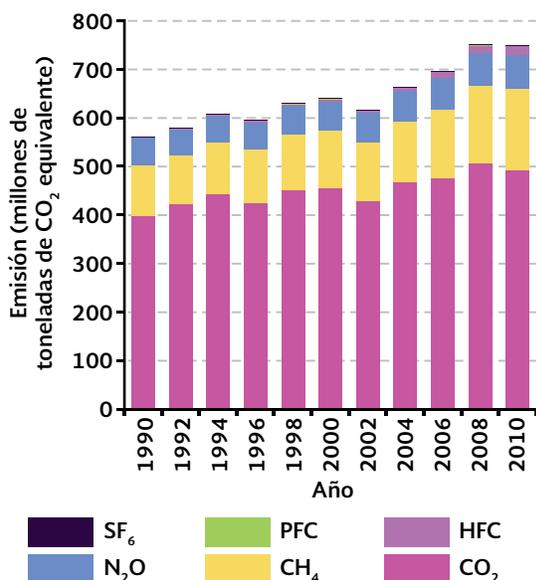
Figura 5.17



Fuente: Coordinación del Programa de Cambio Climático, INE, Semarnat. México. 2012.

Emisión nacional de gases de efecto invernadero, por gas, 1990 - 2010

Figura 5.18



Fuente:
Coordinación del Programa de Cambio Climático, INE, Semarnat.
México. 2012.

los datos recogidos en este lugar se consideran representativos de la dinámica temporal de la concentración global (Keeling y Whorf, 2005). La información de la concentración de CO₂ se complementa con la obtenida por los paleoclimatólogos, que han descrito el clima pasado, a partir de muestras de hielo conocidas como “testigos de hielo”, las cuales 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. De acuerdo con los registros históricos y las estimaciones derivadas de los “testigos de hielo”, la concentración atmosférica de CO₂ se mantuvo relativamente constante durante la época preindustrial, incrementándose de manera clara a partir de la mitad del siglo XVIII y alcanzando una aceleración muy marcada durante la segunda mitad del siglo XX (Figura 5.19; **IB 1.2-4**). Mientras que la concentración preindustrial de CO₂ fue de alrededor de 280 partes por millón (ppm), en el año 2012 alcanzó las 394 ppm, lo que significa un incremento de poco más de 40%.



debajo del promedio mundial de 0.73 kg de CO₂ por dólar a precio de 2000. La intensidad de emisiones de México ha disminuido constantemente desde finales de los ochenta, cuando su valor alcanzaba los 0.64 kg de CO₂ por dólar a precio de 2000, lo que se traduce en una tendencia hacia una menor intensidad de carbono de la economía.

CONCENTRACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA ATMÓSFERA

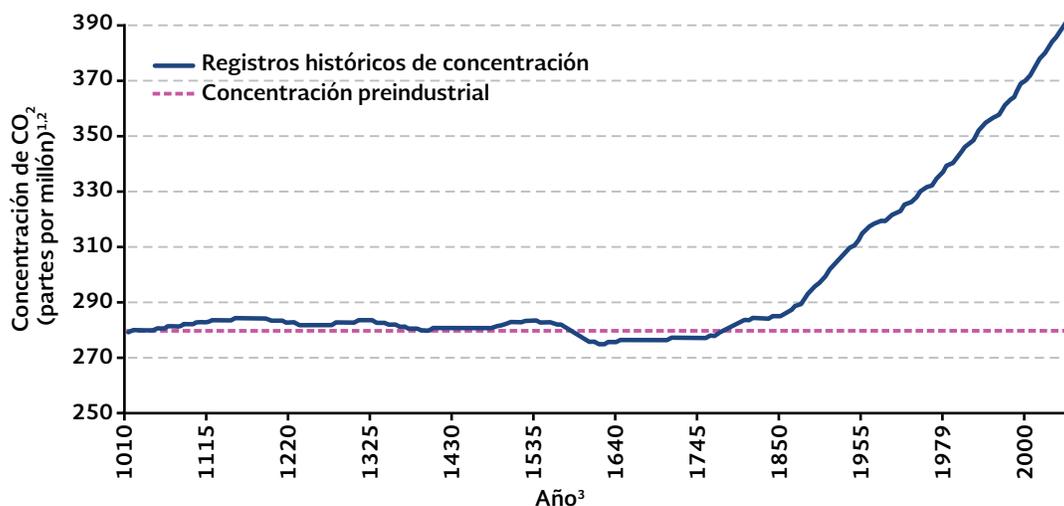
La acumulación de CO₂ en la atmósfera se debe a que los sumideros naturales, como la vegetación y los cuerpos de agua, no han sido suficientes para capturar sus crecientes emisiones, lo que ha traído como consecuencia el aumento de su concentración en la atmósfera. Debido a que el CO₂ se dispersa fácilmente, 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

Otros gases, como el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄) también han aumentado significativamente su concentración en los últimos años. El CH₄ pasó de 715 partes por mil millones (ppmm) en la era preindustrial a 1 747 ppmm en 2010 (Figura 5.20). Por su parte, la concentración de N₂O pasó de 270 a 322 ppmm en el mismo periodo.

En términos generales, se ha estimado que el CO₂ es responsable de aproximadamente 60% del efecto invernadero acumulado desde el siglo XVIII, el CH₄ de 20%, el N₂O de 6% y los halocarbonos de 14% (PNUMA, 2002; IPCC, 2007a). El forzamiento radiativo del CO₂ 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 última evaluación del IPCC, el forzamiento radiativo combinado, debido al incremento de CO₂, CH₄ y N₂O es de 2.30 Wm⁻² 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.

Concentración global atmosférica de CO₂, 1010 - 2012

Figura 5.19



Notas:

¹ La concentración histórica de bióxido de carbono proviene de registros de muestras de hielo (1010-1955) y de mediciones directas de la atmósfera (1959-2010).

² La concentración pre-industrial fue de alrededor de 280 ppm de acuerdo con el IPCC.

³ El promedio anual de 2012 incluye las mediciones hechas de enero a septiembre de ese año.

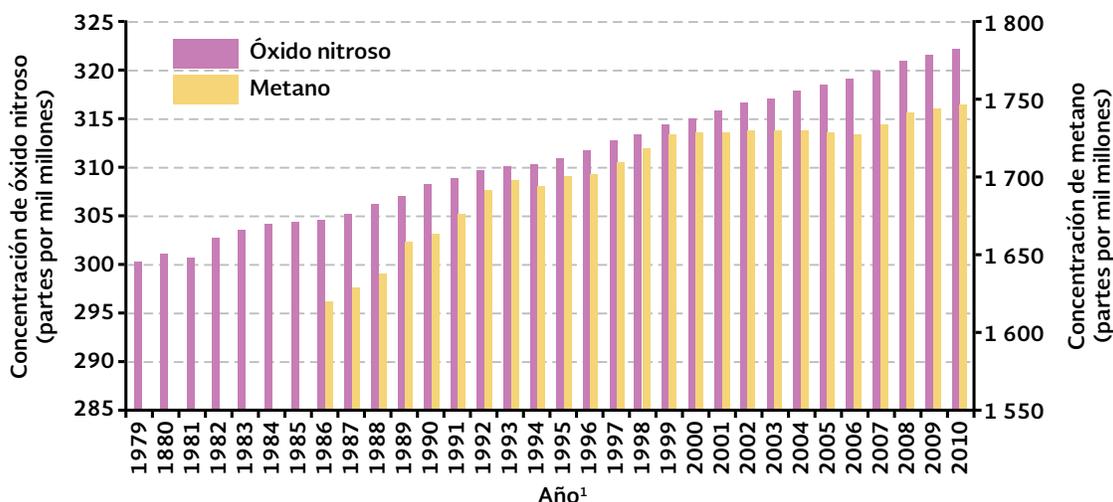
Fuentes:

Etheridge, D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds and R.J. Francey. *Historical CO₂ records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores*. 1998. En: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center. 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 CO₂ and 13CO₂ 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 CO₂ Program. Atmospheric CO₂. Disponible en: http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2.html. Fecha de consulta: octubre 2012.

Concentración global atmosférica de óxido nítrico y metano, 1979 - 2010

Figura 5.20



Nota:

¹ Para 2010, las concentraciones de óxido nítrico y metano corresponden a los meses de enero a septiembre. No se cuenta con datos anteriores a 1986 para el metano.

Fuentes:

CDIAC. *Atmospheric Trace Gas Measurements*. Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/>. Fecha de consulta: enero de 2012.

World Resources Institute. *Climate and Atmosphere Searchable Database*. Earth Trends. The Environmental Information Portal. 2008. Disponible en: <http://earthtrends.wri.org/index.cfm>. Fecha de consulta: noviembre de 2011.

EVIDENCIAS Y CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Temperatura

Las evidencias de cambios en el clima, tanto a escala global como regional, incluyen básicamente incrementos de la temperatura (atmosférica y marina superficial), en la concentración de vapor de agua en la atmósfera, así como cambios en los patrones de precipitación, vientos y pautas de circulación atmosférica y oceánica (estos últimos se manifiestan en una mayor frecuencia, persistencia e intensidad de los fenómenos de El Niño-Oscilación del Sur; NAS, 2001; IPCC, 2007c).

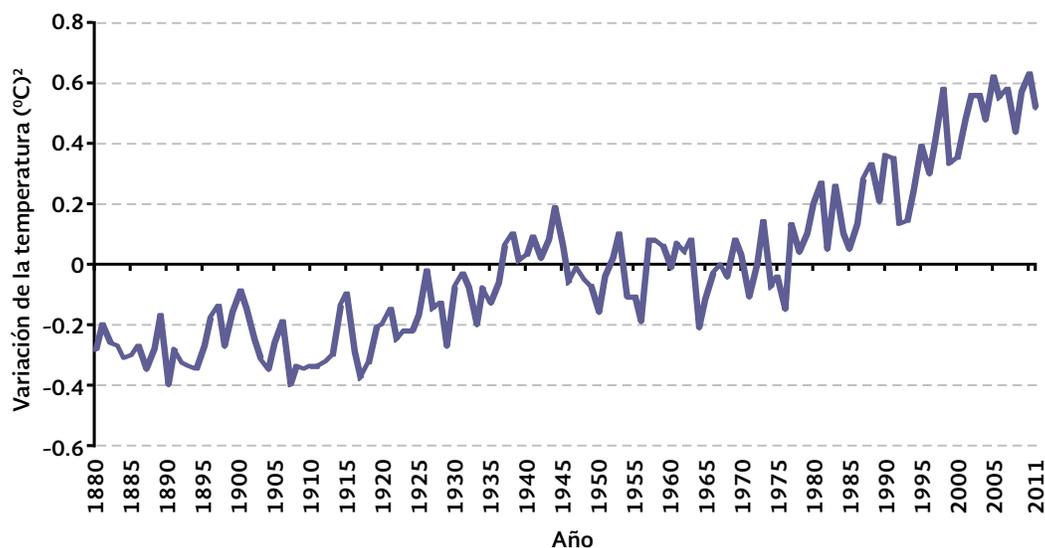
El incremento de temperatura (conocido como “calentamiento global”) es una de las evidencias más contundentes de la existencia del cambio climático. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) indicó que los 13 años más calurosos desde que existen registros de

temperatura se concentraron en los últimos 15 años (OMM, 2011). De acuerdo con el IPCC, el incremento de temperatura del periodo 2001-2005 con respecto al periodo 1850-1899 fue de 0.76°C (IPCC, 2007a). Los registros de temperatura global, en los últimos diez años, indican que la variación promedio fue de cerca de 0.55°C por arriba de la media del periodo 1951-1980; siendo 2010 el año en que se registró la mayor desviación (0.63°C; Figura 5.21; **IB 1.2-5**). 

El aumento de la temperatura no ha sido igual en todas las regiones del globo. La evaluación del IPCC (2007) señala que el incremento de la temperatura ha sido mayor en el hemisferio norte; la tasa de incremento de la temperatura promedio en el Ártico fue casi del doble que la tasa registrada a nivel global en los últimos 100 años. Por su parte, las regiones terrestres se han calentado más rápido que los océanos, siendo más acelerado en Europa, Norteamérica y Asia (Figura 5.22).

Variación de la temperatura global¹, 1880 - 2011

Figura 5.21



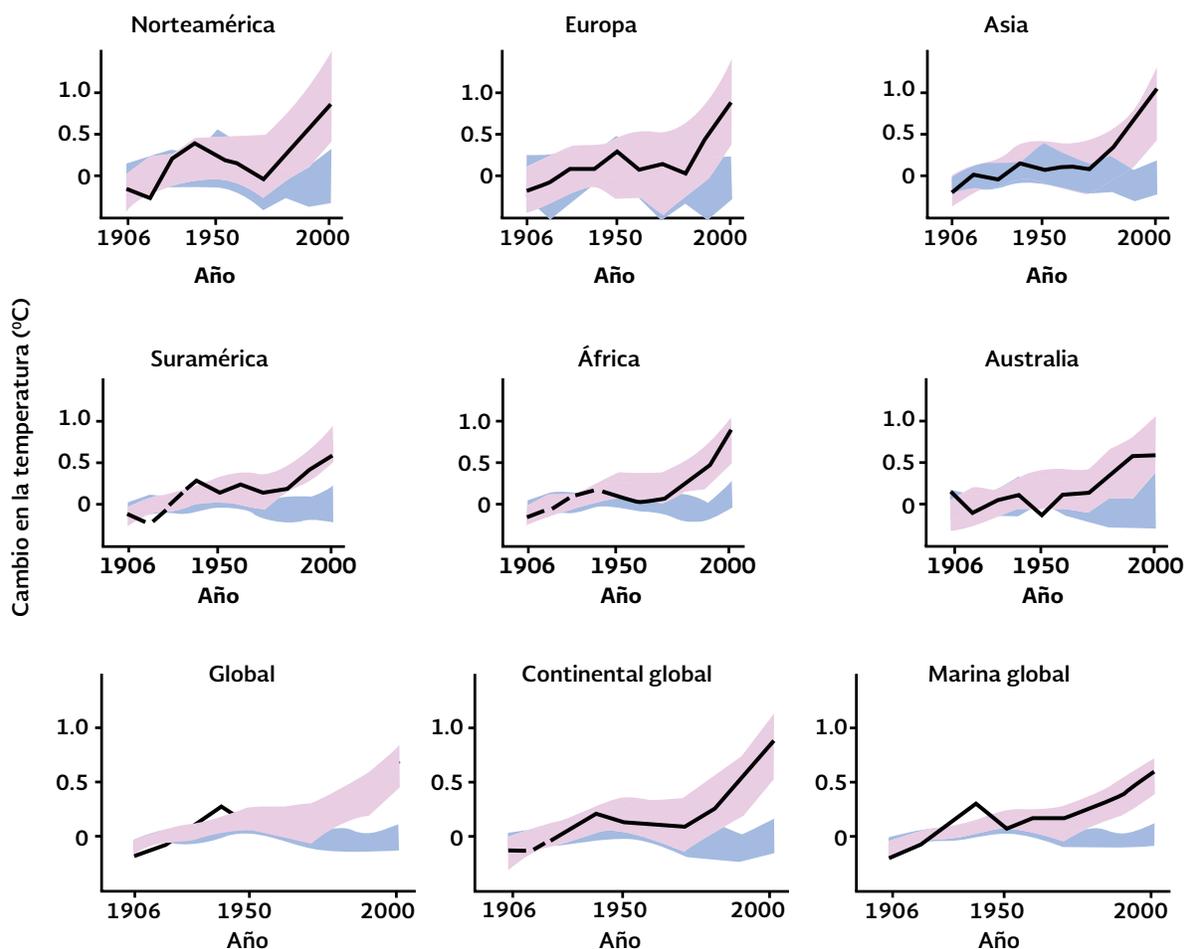
Notas:

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

² El valor de cero representa la temperatura media de 30 años (1951-1980), por lo que los datos se refieren a la variación anual respecto a esa media.

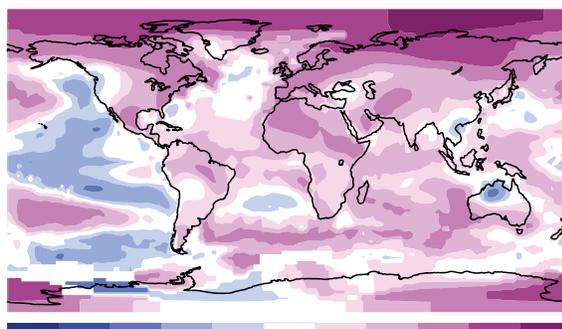
Fuente:

NASA. *GISS Surface Temperature Analysis. Global Annual Mean Surface Air Temperature Change. Global Land-Ocean Surface Temperature Anomaly (Base: 1951-1980)*. 2012. Disponible en: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>. Fecha de consulta: octubre de 2012.



- Mediciones de temperatura
- Modelos que utilizan sólo forzamientos naturales
- Modelos que utilizan forzamientos naturales y antropogénicos

2011



-4.1 -4 -2 -1 -0.5 -0.2 0.2 0.5 1 2 4 4.4
Cambio en la temperatura (°C)

Notas:

¹ 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.

² El mapa muestra el cambio respecto al promedio de temperatura del periodo 1951-1980.

Fuentes:

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

NASA. *GISS Surface Temperature Analysis*. 2012. Disponible en: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps>. Fecha de consulta: octubre de 2012.

En el caso de México, los registros instrumentales del periodo 1971-2008 muestran un incremento en la temperatura media anual de 0.6°C en promedio (Figura 5.23). La media histórica de ese periodo fue de 20.9°C y desde el año 1990 la mayoría de las temperaturas medias anuales registradas han estado por arriba de ese valor. En el periodo 1999-2008, el calentamiento ha sido de 0.7°C (INE, Semarnat, 2009).

El calentamiento observado a nivel nacional y mundial está correlacionado con el aumento, en las latitudes medias, de la cantidad de días cálidos extremos, la disminución de la cantidad de días gélidos extremos y la disminución del número de heladas (IPCC, 2007c). Los registros demuestran que las olas de calor en el mundo aumentaron en frecuencia y duración. Por ejemplo, en el verano de 2003 Europa occidental y central enfrentaron una intensa ola de calor que provocó la muerte de 35 mil personas. Ese verano fue el más cálido

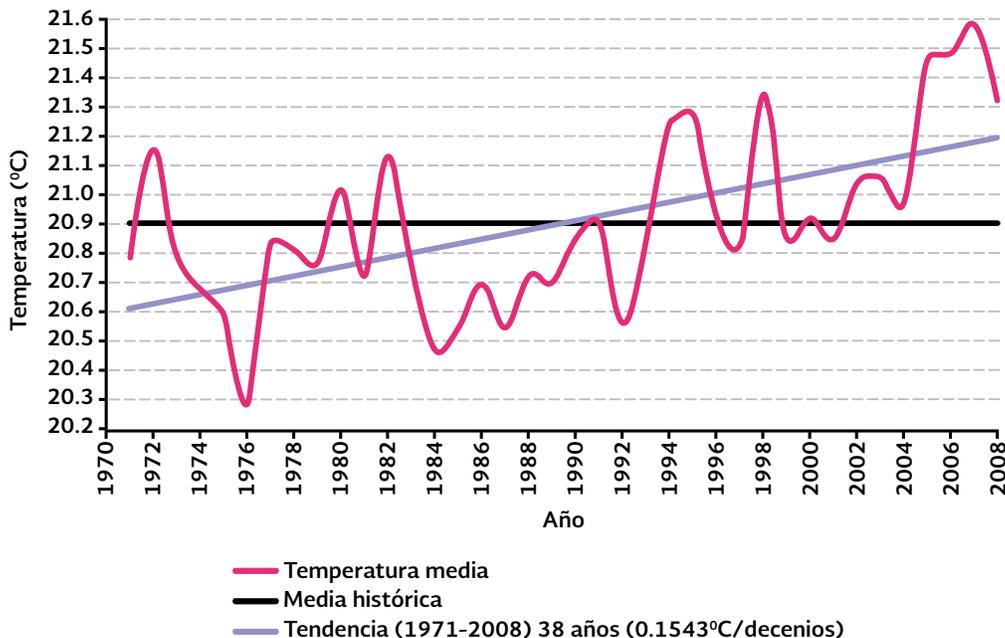
registrado desde 1780 en ese continente. El calentamiento global también ha traído consigo cambios importantes en la biodiversidad (ver Recuadro *Efectos del cambio climático sobre la biodiversidad*).

Precipitación

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, 2007c). Se ha observado un incremento significativo de las precipitaciones en zonas orientales de América del Norte y del Sur, Europa septentrional y en Asia septentrional y central, así como condiciones más secas en el Mediterráneo, África meridional y algunas

Variación de la temperatura promedio en México, 1971 - 2008

Figura 5.23



Fuente: SMN. 2009. En: INE, Semarnat. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. 2009.

La acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, resultado de la intensa actividad humana de los últimos 250 años, ha traído consigo alteraciones importantes en el clima global y a la biodiversidad de muchas regiones del planeta. Esto resulta obvio si se toma en cuenta que el clima es uno de los principales factores que determinan globalmente los patrones de vegetación, estructura, composición florística y faunística y la productividad primaria. Al efecto del cambio climático sobre los ecosistemas deben sumarse aquellos derivados de los cambios de uso del suelo, de la urbanización y de la sobreexplotación de los recursos naturales, entre otros.

Durante la última década se han publicado una cantidad importante de estudios que demuestran los efectos del cambio climático global sobre la biodiversidad de todos los continentes y la mayoría de los océanos (IPCC, 2001; IPCC, 2007). A nivel de ecosistemas, los cambios regionales del clima han ocasionado principalmente: *i*) la modificación de su distribución (p. e., bosques que migran hacia el norte en altas latitudes del hemisferio), *ii*) el remplazo de ecosistemas (p. e., humedales por bosques de coníferas en Alaska), *iii*) la degradación (como la de los arrecifes de coral en todo el mundo por el incremento de la temperatura marina) y *iv*) la modificación de su composición de especies (como se ha observado en bosques, comunidades alpinas y arrecifes

de coral, entre otras). Los ecosistemas también se degradan por los efectos que el incremento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos (p. e., huracanes, sequías, inundaciones, granizadas y rachas de vientos) y la presencia de plagas y enfermedades, han tenido en su estructura, composición y dinámica (IPCC, 2001; IPCC, 2007).

Si se estudian los efectos a nivel de las especies, las evidencias indican alteraciones en la fenología y los patrones morfológicos, fisiológicos y conductuales de un número significativo de ellas. Con respecto a la fenología, se han observado cambios en los tiempos de reproducción (tanto en la floración de las plantas como en la puesta de huevos o el inicio del cortejo en los animales), en la migración y en el desacoplamiento de los ciclos de vida de depredadores y presas. Morfológicamente, se han encontrado alteraciones en los patrones de crecimiento en reptiles (The Royal Society, 2007).

Las consecuencias de las afectaciones a la biodiversidad por el cambio climático podrían ser significativas y tener graves impactos sobre el bienestar humano. Según la última evaluación del IPCC, si el incremento futuro de la temperatura oscila entre 1.5 y 2.3°C, entre el 20 y 30% de las especies de plantas y animales que han sido monitoreadas y para las que existen datos de largo plazo podrían estar en riesgo de extinción (IPCC, 2007; Parmesan y Yohe, 2007). Por ejemplo,

la extinción de especies de algunos grupos, como los anfibios, ya se asocia al cambio climático global. No debe olvidarse que la pérdida de especies no significa tan sólo reducir numéricamente la biodiversidad de una región o país, sino también comprometer la capacidad de los ecosistemas para proveer de todos los servicios ambientales con que benefician y sostienen a las sociedades humanas.

Referencias:

IPCC. *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press. United Kingdom. 2001.

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

Parmesan, C. y Yohe, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across Natural systems. *Nature* 421: 37-42. 2003.

The Royal Society. *Biodiversity-climate interactions: adaptation, mitigation and human livelihoods*. United Kingdom. 2007.

zonas de Asia meridional (Figura 5.24; IPCC, 2007c y 2008).

Aunque en muchas regiones del planeta han aumentado las precipitaciones, también lo han hecho las zonas de sequía, así como su duración e intensidad. La mayoría de los estudios que miden la sequía utilizan los cambios en las precipitaciones unidos a la temperatura, como en el caso del Índice de Severidad de Sequías Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés). Con base en este índice, el IPCC indica que se han registrado sequías más intensas y largas en los trópicos y subtropicos a partir de 1970 (IPCC, 2007c). Estos cambios se deben a la intensificación de la falta de humedad debido a temperaturas más altas y a la disminución de las precipitaciones (ver el Recuadro *Fenómenos meteorológicos extremos: el caso de la sequía* en el capítulo *Agua* y la sección *El problema de la desertificación* en el capítulo *Suelos*).

Huracanes

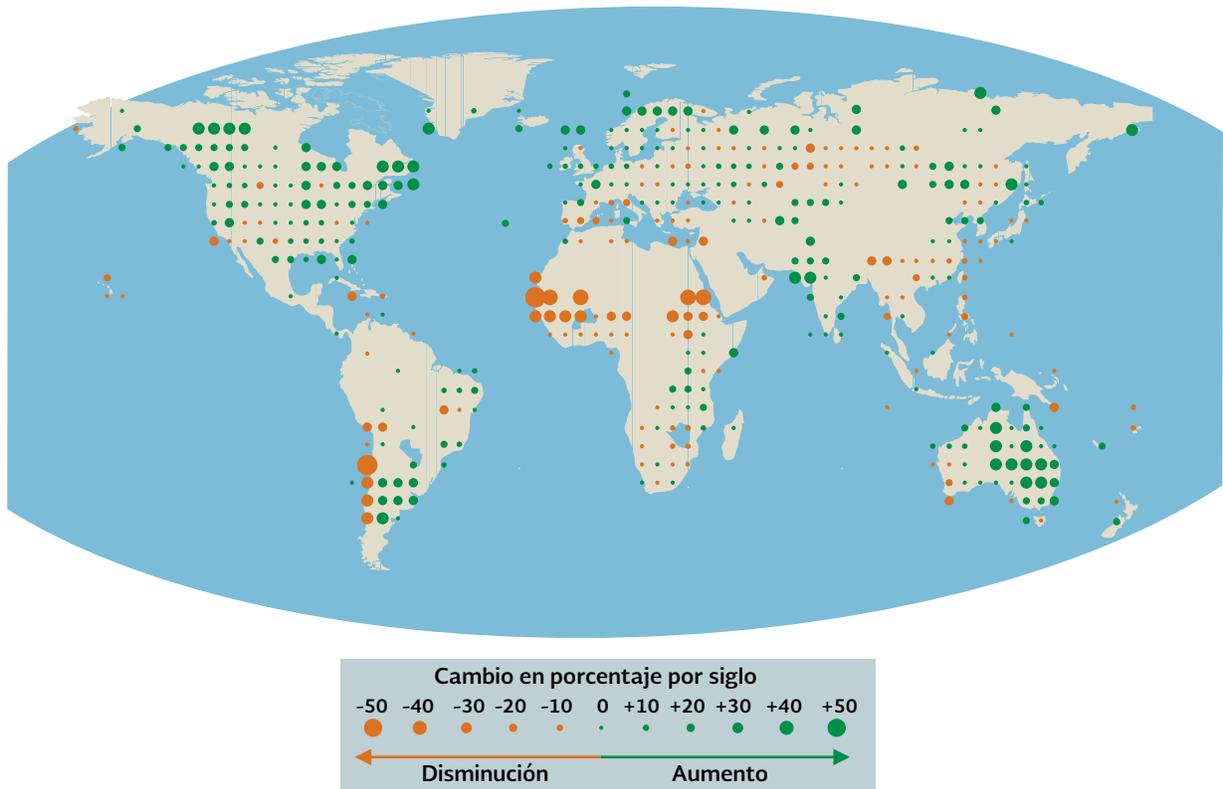
El efecto de la temperatura sobre la actividad ciclónica es un tema polémico. A la fecha no

se ha encontrado una correlación clara entre la temperatura y el número de huracanes; sin embargo, existe cada vez más evidencia de que la intensidad de los huracanes sí ha sido influenciada por la creciente temperatura de los océanos. A nivel global, el número de huracanes de categoría 1¹⁶ ha sido relativamente constante; en contraste, los huracanes de las categorías más fuertes (4 y 5) prácticamente duplicaron su número y proporción respecto al número total de huracanes registrados durante la década pasada (Figura 5.25; Webster *et al.*, 2005). Las proyecciones para el año 2100 indican consistentemente que el incremento de la temperatura hará que aumente globalmente la intensidad media de los ciclones tropicales entre 2 y 11% (Bender *et al.*, 2010; Knutson *et al.*, 2010).

Nivel del mar

El incremento del nivel del mar se debe principalmente a dos factores: la expansión de los cuerpos de agua marina debido a su calentamiento y la contribución del

¹⁶ La escala Saffir-Simpson clasifica a los huracanes de acuerdo con la intensidad del viento; las categorías van de 1 a 5.

**Fuente:**

IPCC. *Resumen Técnico. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Aportes del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.* 2007.

agua que se derrite de los glaciares. Con respecto al primero de ellos, los océanos han absorbido alrededor del 80% del calor que se ha adicionado al sistema climático (IPCC, 2007c). Su expansión térmica aumentó significativamente desde la segunda mitad del siglo XX y contribuyó con alrededor del 25% del incremento del nivel del mar a partir de 1960, mientras que para el periodo 1993-2003 lo hizo en aproximadamente 50% (Nicholls y Cazenave, 2010). Sin embargo, es importante señalar que el incremento de la temperatura del mar no ha ocurrido en todo el planeta: zonas del Atlántico Norte, Pacífico Norte y Pacífico ecuatorial se enfriaron durante los últimos 50 años, siguiendo un patrón opuesto a la tendencia global de calentamiento (IPCC, 2007c).

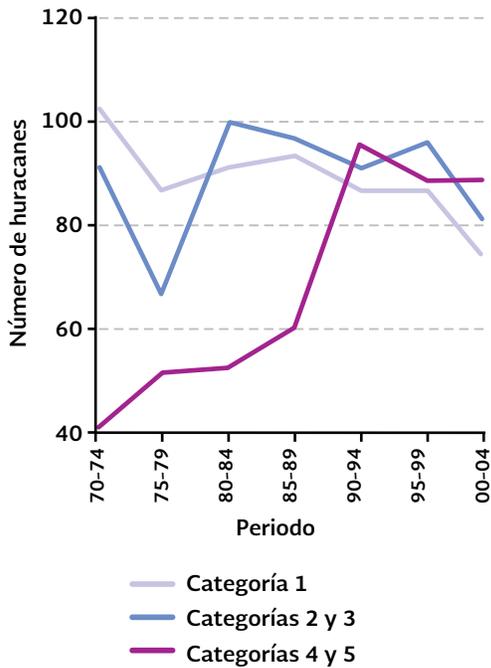
El incremento total del nivel medio del mar para el siglo XX se ha estimado en 17 centímetros,

con un rango entre 12 y 22 centímetros (IPCC, 2007a). El promedio mundial de aumento del nivel del mar fue, en el periodo 1961-2003, de 1.8 milímetros por año (con un rango de 1.3 a 2.3 mm; Figura 5.26). Sin embargo, entre 1993 y 2003, la tasa de incremento promedio alcanzó los 3.1 milímetros (2.4 a 3.8 mm) por año (IPCC, 2007a; Nicholls y Cazenave, 2010). 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 a 4 metros por debajo del nivel del mar), pequeños cambios en el nivel pueden tener efectos importantes.

Por otro lado, el deshielo de los glaciares contribuyó con alrededor del 30% del incremento del nivel del mar de 1993 a 2009 (Nicholls y Cazenave, 2010). De acuerdo con

Ocurrencia global de huracanes por categoría, 1970 - 2004

Figura 5.25



Fuente:

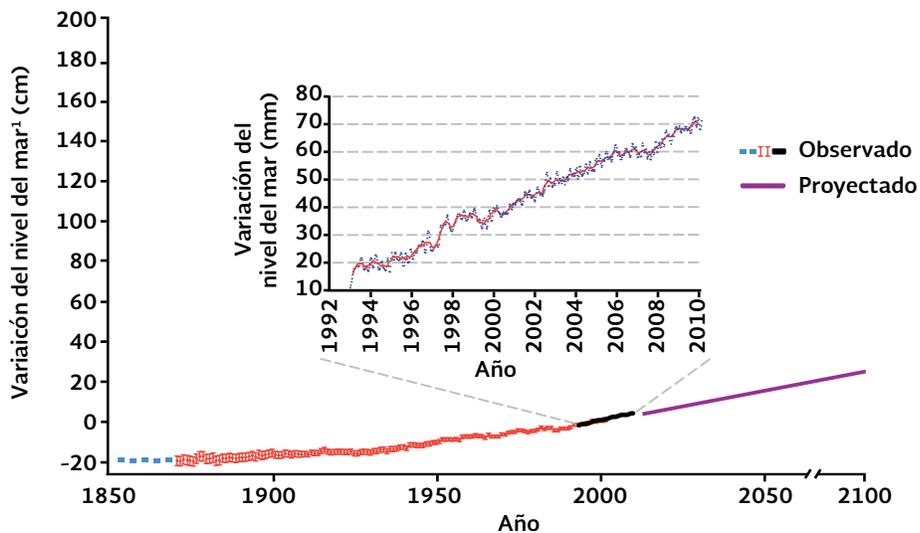
Webster, P.J., G.J. Holland, J. A. Curry y H. R. Chang. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309: 1844-1846. 2005.

el IPCC, el derretimiento de los glaciares y casquetes polares contribuyó con 0.05 metros al incremento del nivel del mar en el periodo 1961-2003 y con 0.077 metros entre 1993 y 2003 (IPCC, 2007c).

México también ha sido afectado por la elevación del nivel del mar. Los registros indican que la mayoría de los 17 sitios estudiados en el Golfo de México y el Pacífico mexicano, entre principios de los años cincuenta y el año 2000, muestran tendencias de incremento en el nivel, excepto Acapulco, Guerrero, cuya tendencia fue negativa debido a un movimiento de la corteza terrestre provocado por un doble sismo (Semarnat et al., 2008). En la Figura 5.27 se observa la tendencia del nivel del mar en algunos de los 17 sitios analizados. En el Golfo de México, el incremento registrado varió de 1.79 milímetros por año en Alvarado, Veracruz, hasta 9.16 milímetros en Ciudad Madero, Tamaulipas; no obstante, debe considerarse que los periodos de datos para ambos sitios son diferentes. En el Pacífico mexicano sobresalen Guaymas (Sonora) y Manzanillo (Colima) con

Variación del nivel medio global del mar, 1850 - 2100

Figura 5.26

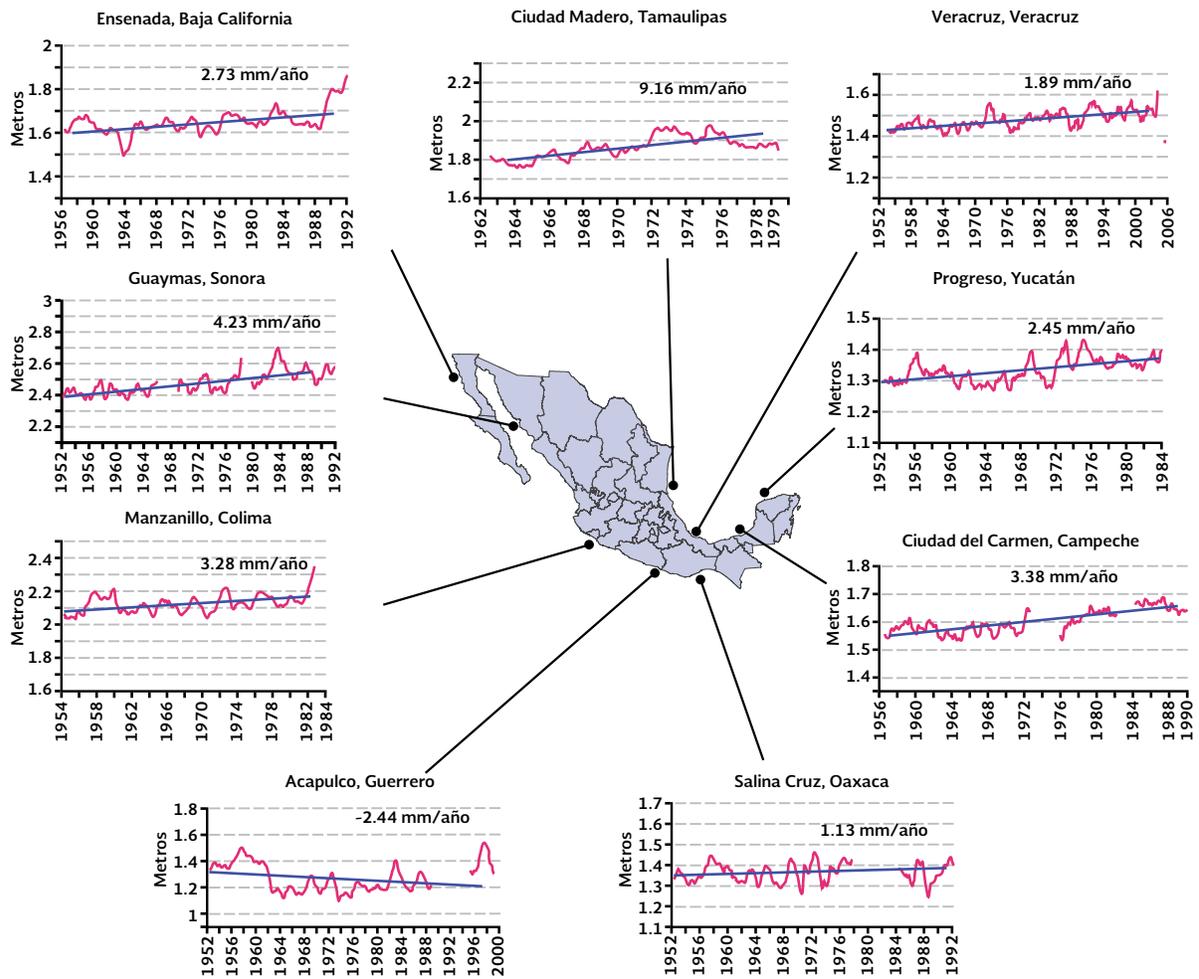


Nota:

¹ Para los datos observados, las curvas azul y roja se basan en mediciones con mareógrafos y la curva negra en registros de altimetría. Acercamiento para el periodo 1993-2009.

Fuente:

Nicholls, R. J. y A. Cazenave. Sea-Level Rise and its Impact on Coastal Zones. *Science* 328: 1517-1520. 2010.



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

incrementos anuales de 4.23 y 3.28 milímetros, respectivamente (Semarnat et al., 2008).

Deshielos

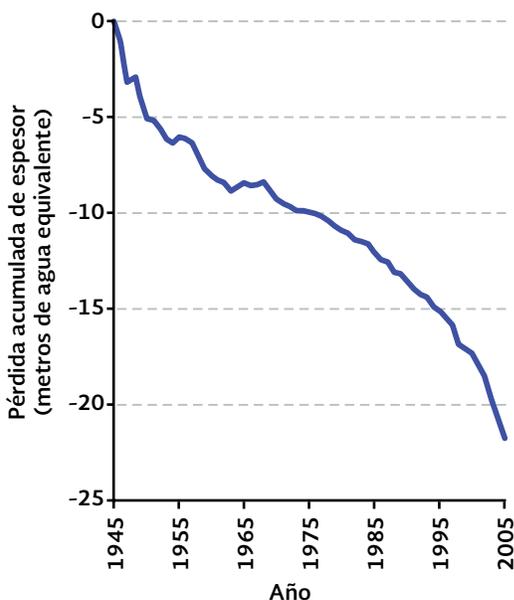
Los glaciares y casquetes polares que cubren actualmente alrededor del 10% de la superficie terrestre del planeta, experimentaron una amplia pérdida de masa y contribuyeron al aumento del nivel del mar durante el siglo XX (UNEP y WGMS, 2008). De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el

Desarrollo (UNEP, 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 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)¹⁷ respecto al año 1980 (Figura 5.28; UNEP y WGMS, 2008).

¹⁷ El balance de masa se expresan en metros de agua equivalente, que representa el espesor medio perdido (valor negativo) o ganado (valor positivo) del glaciar durante ese año en particular.

Balance global de masa promedio de los glaciares, 1945 - 2005

Figura 5.28



Fuente: UNEP y WGMS. *Global Glacier Changes: facts and figures*. 2008.

Por otro lado, las mediciones de la longitud de algunos glaciares en el mundo han estado disponibles desde finales del siglo XIX, lo que muestra un retroceso general con respecto a su tamaño en la Pequeña Edad de Hielo, que abarcó desde comienzos del siglo XIV hasta mediados del XIX (UNEP y WGMS, 2008).

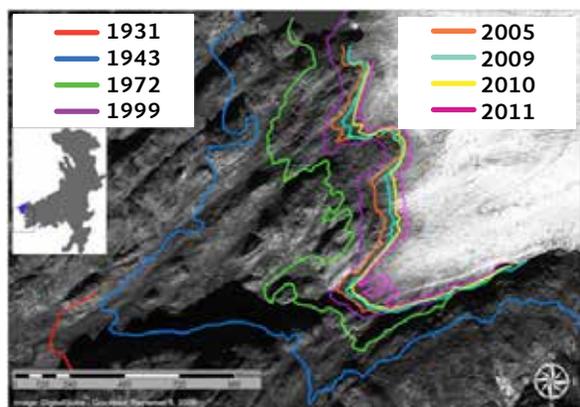
De acuerdo con un estudio de la NASA, las capas de hielo de Groenlandia y Antártica están perdiendo masa a un ritmo muy acelerado: en el año 2006 cada una de estas capas de hielo perdió, en promedio, una masa de 475 gigatoneladas¹⁸, lo cual sería suficiente para elevar el nivel del mar 1.3 milímetros por año. En 2011, el deshielo en Groenlandia fue de alrededor de 430 gigatoneladas, es decir, el tercer deshielo más importante registrado en el mundo desde 1979 (NOAA, 2011b).

La Figura 5.29 muestra el retroceso del glaciar Mittivakkat, al sureste de Groenlandia, en el periodo 1931-2011. El límite del glaciar ha retrocedido alrededor de 1 600 metros

Pérdida de hielo en Groenlandia y el Ártico

Figura 5.29

Retroceso del glaciar Mittivakkat en Groenlandia

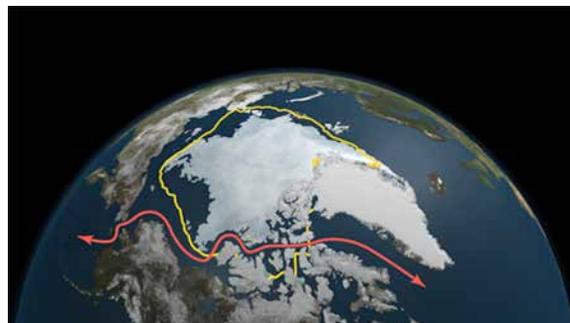


El hielo retrocedió 1 300 metros desde 1931.

Fuentes:

NOAA. *Arctic Report Card: Update for 2011. Greenland Ice Sheet*. 2011. Disponible en: www.arctic.noaa.gov/reportcard/greenland_ice_sheet.html. Fecha de consulta: octubre de 2012.
 NASA. *Arctic Sea Ice Continues Decline, Hits 2nd-Lowest Level*. 2011. Disponible en: www.nasa.gov/topics/earth/features/2011-ice-min.html. Fecha de consulta: octubre de 2012.

Retroceso del hielo en el casquete polar Ártico



En el 2011 el hielo marino se redujo a un nivel mucho menor que el promedio de 30 años (línea amarilla), con lo que se abrieron rutas de navegación al noroeste (línea roja).

¹⁸ Una gigatonelada equivale a mil millones de toneladas métricas.

en total desde 1900 y 1 300 metros desde 1931 (NOAA, 2011a). En la misma Figura se observa la reducción de la extensión del hielo en el casquete polar Ártico: en septiembre de 2011 alcanzó el segundo nivel más bajo registrado (4.61 millones de km²) con respecto al promedio de treinta años registrado entre 1970 y 2000 (7.04 millones de km²; NASA, 2011).

Los deshielos también han afectado a los glaciares de montaña: en el 2006 perdieron 402 gigatoneladas al año en promedio (NASA, 2011). Los glaciares de los Alpes suizos, en el periodo 1850-1980, perdieron un tercio de su superficie y al menos la mitad de su masa, y de seguir esta tendencia, para el 2050 el 75% de ellos habrá desaparecido (EEA, 2004). En América Latina, durante los próximos 15 años, es muy probable que los glaciares intertropicales desaparezcan (IPCC, 2007c). En el caso particular de México, los glaciares del Iztaccíhuatl sufrieron reducciones de hasta el 40% de su extensión entre 1960 y 1983, mientras que el Pico de Orizaba y el Popocatepetl mostraron una tendencia similar (aunque en este último la reducción se aceleró por su actividad volcánica). Si se mantienen las tasas actuales de reducción de los glaciares mexicanos, es posible que desaparezcan por completo en menos de 30 años (Delgado, 2007; Delgado *et al.*, 2007).

Las consecuencias de los deshielos no solo se observan en el incremento del nivel del mar. Más de un sexto de la población mundial, que vive en cuencas fluviales alimentadas por los glaciares o por la nieve derretida, será afectada al reducirse la disponibilidad de agua y la generación de energía hidroeléctrica por la disminución en la extensión de los glaciares y la nieve (IPCC, 2007c).

EL CLIMA DEL FUTURO Y SUS CONSECUENCIAS

Impactos futuros globales

La gran cantidad de factores que intervienen para determinar el clima hacen compleja y

difícil la tarea de proyectar el clima del futuro. A pesar de la incertidumbre asociada, los escenarios más conservadores con cambio climático, proyectan serias consecuencias sobre aspectos tan importantes para el bienestar social como la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de los recursos hídricos, lo que ha promovido que a nivel mundial se tomen acciones decididas para evitar que las actividades humanas alteren más el clima del planeta.

De acuerdo con el IPCC, la concentración de CO₂ en el año 2100 podría ser de entre 540 y 970 ppm, muy superiores a las 280 ppm registradas en el periodo 1000-1750 y entre 1.4 y 2.5 veces superior a la concentración actual (392 ppm). Como consecuencia de la concentración prevista para el 2100, el aumento de la temperatura media superficial del planeta podría ser de entre 1.8 y 4°C para finales de este siglo. Si se considera la incertidumbre asociada a los distintos escenarios de emisiones modelados, la temperatura podría variar de 1.1 a 6.4°C. Es importante decir que dicho calentamiento será diferencial, mayor sobre la superficie terrestre y en latitudes más boreales y menor sobre el océano Antártico y el norte del Atlántico, estimándose su incremento de 0.2°C por década en los próximos veinte años. Para América Latina se ha proyectado un incremento de temperatura de entre 1 y 6°C para finales del siglo XXI, así como anomalías en la precipitación con incrementos en las zonas tropicales y disminuciones en el sur.

El aumento de la temperatura podría traer consigo que a finales del siglo XXI el hielo marino del Ártico prácticamente desaparezca durante el verano. Las proyecciones a nivel global indican que para fines del presente siglo, como consecuencia del derretimiento del hielo, el nivel medio del mar se elevará entre 18 y 59 centímetros, aunque con importantes variaciones regionales (IPCC, 2007a). También se prevé que el derretimiento de la placa de hielo de Groenlandia continúe contribuyendo con la elevación del nivel del mar, por lo menos hasta el año 2100 (IPCC, 2007a).

En algunas regiones del planeta, es probable que los ciclones tropicales sean más intensos, con mayor cantidad de lluvia y velocidad del viento y que las ondas de calor sean más frecuentes (IPCC, 2007a). Las precipitaciones se incrementarán muy probablemente en latitudes altas, mientras que en regiones subtropicales disminuirán hasta en un 20% hacia el año 2100 (IPCC, 2007a). También es probable que aumente la frecuencia e intensidad de los huracanes en el Caribe, así como la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (Figura 5.30; IPCC, 2007c).

En el caso de la biodiversidad, se ha planteado por ejemplo, la reducción e incluso la pérdida de las poblaciones de numerosas especies y ecosistemas; mayores tasas de blanqueamiento en los arrecifes de coral; la reducción o expansión de las áreas de distribución de diversas especies de invertebrados, peces, insectos, aves y plantas; el adelanto de la floración en muchas especies de plantas y el anticipo en la llegada

y reproducción de aves migratorias. Los científicos han previsto que los bosques tropicales puedan convertirse gradualmente en sabanas a mediados de siglo en el este del Amazonas y en los bosques tropicales de México central y meridional. También prevén que la vegetación semiárida sea árida en el noreste de Brasil y en una gran parte de México central y septentrional debido al incremento de temperatura y a la disminución del agua en el suelo. Es muy probable que en el 2050 el 50% de las tierras agrícolas enfrenten desertificación y salinización. Además, puede haber una pérdida significativa de biodiversidad debido a la extinción de especies en muchas zonas tropicales de América Latina (IPCC, 2007c).

En la cuestión social, se ha proyectado que puede ocurrir un incremento del número de muertes de personas en el mundo por efecto de las ondas cálidas y que enfermedades como el paludismo y el dengue se conviertan en un problema de salud pública mundial, ya que el área de distribución de sus vectores podría

Impactos previstos del cambio climático en América Latina

Figura 5.30



Fuente:
IPCC. Resumen Técnico. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Aportes del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Francia. 2007.

extenderse (IPCC, 2001; NAS, 2001; Townsend *et al.*, 2002; CBD, 2003; Smith *et al.*, 2003).

Impactos futuros en México

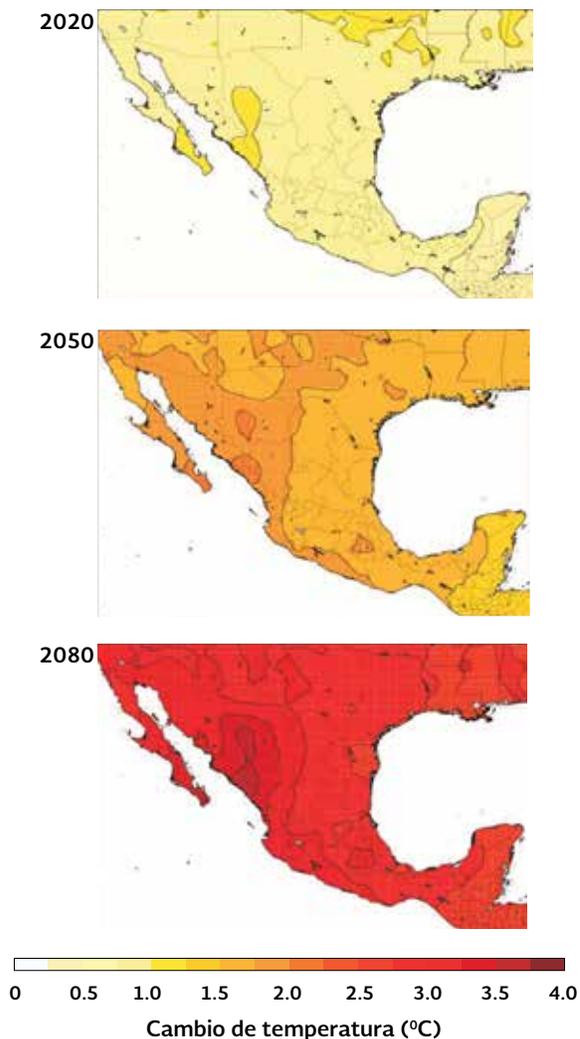
Existen diversas estimaciones de los efectos que el cambio climático podría tener en México para diferentes sectores. En este texto se hará mención de algunos de ellos y se recomienda consultar, para mayores detalles, los estudios específicos o bien la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En la Cuarta Comunicación se incluyen proyecciones sobre los sectores pesquero, forestal, agrícola, ganadero, turístico y de salud humana, entre otros.

De acuerdo con la Cuarta Comunicación Nacional, el escenario¹⁹ para el que se proyectan los mayores aumentos de temperatura, prevé que los cambios más importantes ocurran en el noroeste de México y la zona del Golfo de California, mientras que en el sureste se prevén los menores incrementos (Figura 5.31; INE, Semarnat, 2009).

En lo que se refiere a las precipitaciones en este mismo escenario, las proyecciones indican que, hacia mediados y finales de este siglo, las lluvias disminuirán en gran parte del país (Figura 5.32), siendo la región noroeste de México, en la parte alta del Golfo de California, la más afectada. El promedio anual nacional de precipitaciones podría disminuir entre 11 y 30% en la región noroeste para finales de este siglo (INE, Semarnat, 2009).

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

Cambios proyectados en la temperatura media nacional con respecto al periodo 1970 - 1999 Figura 5.31

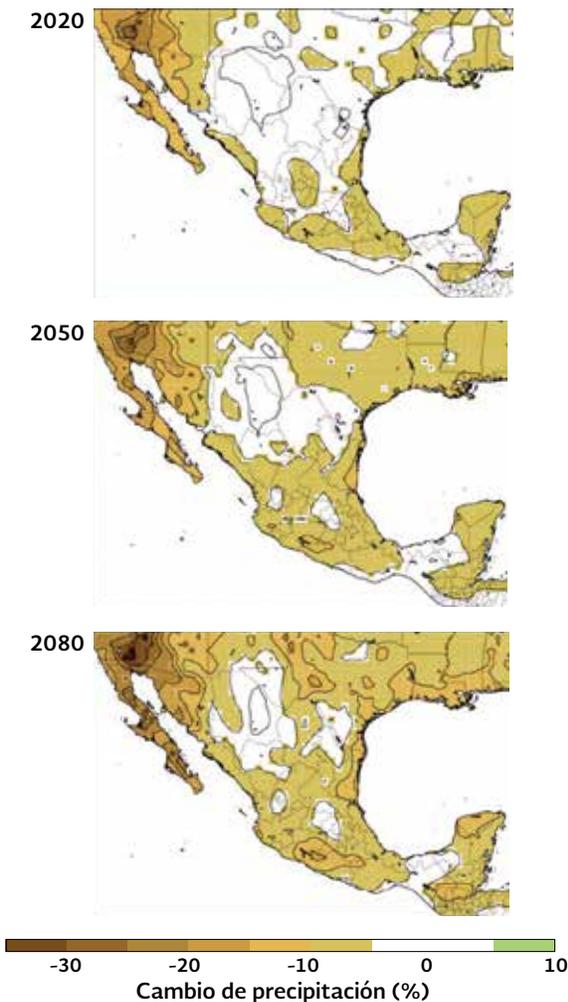


Incremento de temperatura proyectado a nivel nacional, 2020 - 2080		
Década	Norte del país	Sur del país
2020	1.3±0.8°C	0.5±0.5°C
2050	2.3±1.0°C	1.3±0.3°C
2080	3.5±1.3°C	2.5±0.3°C

Fuente:
INE, Semarnat. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. 2009.

¹⁹ El escenario empleado (llamado A2) es uno de los que contempla la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y considera un alto crecimiento económico, elevadas emisiones de GEI, así como un desarrollo económico diferencial por regiones (Nakicenovic *et al.*, 2000).

Cambios proyectados en la precipitación anual con respecto al periodo 1970 - 1999 **Figura 5.32**



Cambios proyectados en la precipitación a nivel nacional, 2020 - 2080

Década	Centro y norte del país	Centro y noroeste del país	Sur y sureste del país
2020	-5%	-10%	-5%
2050	-5%	-5 y -10%	-5%
2080 ¹	-5%	-10%	-5%

Nota:
¹ Para la década 2080 las precipitaciones serán similares a las de 2020 y 2050, pero intensificadas.

Fuente:
 INE, Semarnat. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México. 2009.

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 sería de 29 622.6 km², siendo Campeche, Sinaloa y Quintana Roo los estados más afectados en términos absolutos. En términos relativos a su superficie, Tabasco (14%) sería el más afectado, seguido por Quintana Roo (11.9%), Campeche (9.5%) y Sinaloa (8.9%; Figura 5.33). 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 vulnerables²⁰, la vulnerabilidad crecerá en condiciones de cambio climático, siendo las regiones hidrológico-administrativas más afectadas la Noroeste y Río Bravo, seguidas de Cuencas Centrales del Norte, Baja California y Valle de México (Mapa 5.12; INE, Semarnat e IMTA 2008).

Con respecto a los efectos sobre la biodiversidad nacional, y en el caso particular de los ecosistemas, las proyecciones realizadas por un estudio del Instituto Nacional de Ecología (2009) indican que los cambios más notables se observarán en el norte del país, con reducciones potenciales en la superficie de los bosques de coníferas. Se estima también que con una elevación de un metro en el nivel del mar, se perderán superficies de humedales en las costas del Pacífico Sur, de la Península de Baja California, El Caribe y el Golfo de México. El mismo estudio sugiere que el incremento en

²⁰ El estudio definió un índice de vulnerabilidad, que considera la presión o intensidad de uso del recurso, sobreexplotación, intrusión salina y grado de contaminación, además de los efectos del cambio climático.

Zonas afectadas ante un escenario de incremento de dos metros del nivel del mar en México¹

Figura 5.33



Estados costeros más impactados		
Estado	Superficie afectada (km ²)	Superficie relativa ² (%)
Campeche	5 503.0	9.50
Sinaloa	5 106.6	8.90
Quintana Roo	5 058.0	11.94
Veracruz	3 806.0	5.30
Tabasco	3 463.0	14.00
Tamaulipas	2 886.0	3.60
Yucatán	2 484.0	6.27
Nayarit	1 316.0	4.73

Notas:

¹ Las áreas en rojo corresponden a las afectadas por el incremento del nivel del mar.

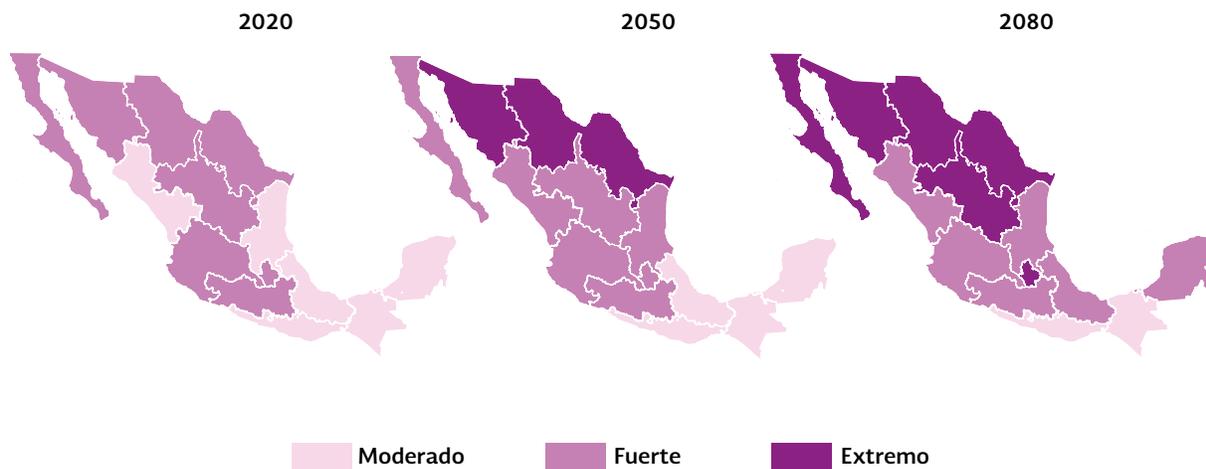
² La superficie relativa está en función de la superficie total del estado.

Fuente:

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

Índice de vulnerabilidad por cantidad y calidad de recursos hídricos¹

Mapa 5.12



Nota:

¹ El índice de vulnerabilidad considera la presión o intensidad del uso del recurso, sobreexplotación, intrusión salina y grado de contaminación, además de los efectos del cambio climático. El escenario empleado (llamado A2) es uno de los que contempla la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y considera un alto crecimiento económico, elevadas emisiones de GEI, así como un desarrollo económico diferencial por regiones.

Fuente:

INE, Semarnat e IMTA. *Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria*. México. 2008.

la intensidad de los huracanes provocará una mayor erosión de playas y dunas en la Riviera Maya en Quintana Roo, donde ya se notan los efectos en algunas zonas de manglar que han quedado expuestas a la erosión directa por el oleaje. A nivel de grupo taxonómico, el trabajo del INE prevé que para mediados del presente siglo, 30 de las 61 especies de mamíferos que consideraron en el estudio pierdan 50% o más de su área de distribución actual y que, por lo menos para nueve de ellas, se reduzca en más del 80%.

MEDIDAS PARA ENFRENTAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Como respuesta a esta problemática mundial, en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro de 1992, 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 UNFCCC surgió, en 1997, el Protocolo de Kioto, que estableció como obligación para los países desarrollados y las economías en transición (pertenecientes al Anexo I) la reducción en 5% de sus emisiones de GEI tomando como base sus emisiones de 1990 para el periodo comprendido entre 2008 y 2012. Para los países en desarrollo, el Protocolo no estableció metas cuantificables de reducción de emisiones de GEI, pero sí compromisos particulares, entre ellos la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de GEI y de comunicaciones nacionales, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático. México firmó este Protocolo en 1997 y lo ratificó en el 2000 como país No Anexo I (países en desarrollo; CICC, 2007).

A marzo de 2012, 192 países habían ratificado, aprobado o aceptado el Protocolo, los cuales, en conjunto, emiten el 63.7% del

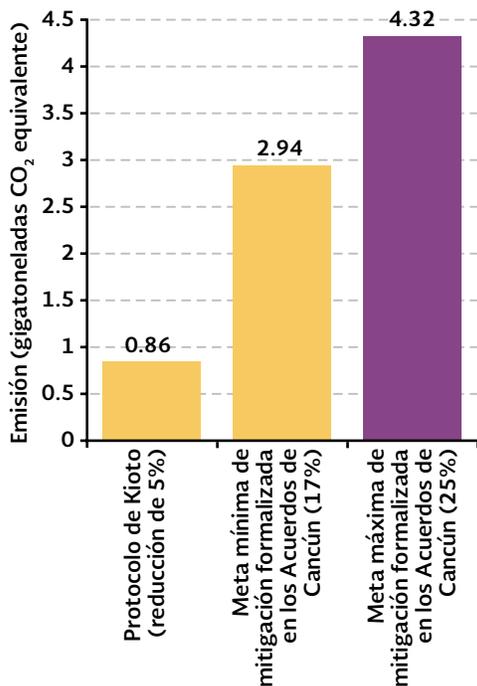
total de gases de efecto invernadero de los países desarrollados o con economías en transición (UNFCCC, 2012). Algunos de los países que más GEI emiten a la atmósfera se han negado a ratificar el Protocolo de Kioto, entre ellos Estados Unidos, responsable de aproximadamente el 18% de las emisiones globales de CO₂ en el 2009. Cabe destacar que a pesar de que el Protocolo surgió en 1997, no fue sino hasta el año 2005 que entró en vigor, ya que requería ser aceptado por un grupo de países Anexo I que en conjunto hubieran emitido el 55% de los GEI de 1990. Esta cifra se alcanzó a finales de 2004, cuando Rusia, responsable del 17.4% de las emisiones totales de los países Anexo I (a nivel mundial contribuye con el 6%), ratificó su adhesión al Protocolo.

Dado que el Protocolo contempla compromisos de reducción para el periodo 2008-2012, se han realizado negociaciones para darle continuidad al término de su vigencia, habiéndose aceptado en la COP 17 de Durban, en Sudáfrica, en 2011, un segundo periodo de compromisos con una duración que no ha sido definida, pero que podría ser a 2018 o 2020. En la Conferencia de las Partes celebrada en el año 2010 en Cancún, México, se formalizaron los compromisos de mitigación de los países desarrollados. Las reducciones esperadas son mayores a las contenidas en el Protocolo de Kyoto; en el caso de los países desarrollados, para 2020, están entre 17 y 25% por debajo de sus emisiones de 1990 (Figura 5.34; Semarnat, 2011).

En el marco de estos acuerdos internacionales, México ha impulsado distintas medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. El país ha destacado a nivel internacional como una de las naciones que más esfuerzos dedica a enfrentar este problema. Sobresalen el impulso a la propuesta de la creación, a nivel global, del Fondo Verde Climático como mecanismo financiero de la Convención, para apoyar las acciones de adaptación y mitigación de los países en desarrollo (Semarnat, 2011) y la elaboración del Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2009-2012. Como resultado de las metas establecidas en el PECC, a junio de 2012 se habían reducido

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

Figura 5.34



Fuente: Semarnat. COP 16. CMP6 México 2010. Las conferencias de Cancún un espacio sobre cambio climático para todos. México, 2011.

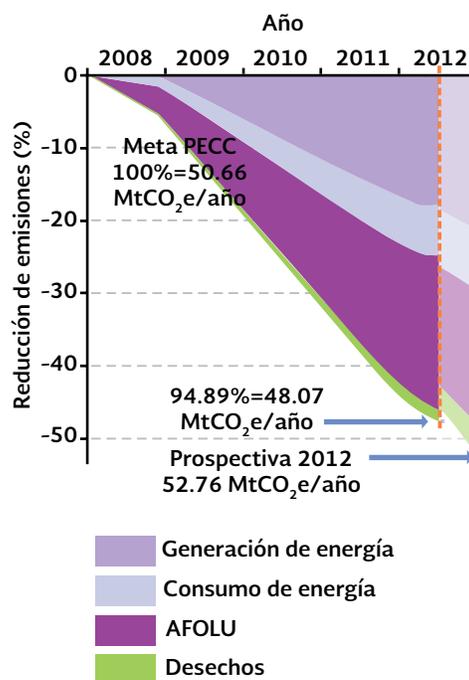
48.07 MtCO₂e/año a nivel nacional, lo que equivale a 94.89% de avance respecto a la meta a 2012 (50.66 MtCO₂e/año; Figura 5.35). Algunas otras de las medidas tomadas por México en materia de cambio climático se presentan en la Tabla 5.3.

De acuerdo con el Informe Stern (*Stern review: the economics of climate change*), si no se toman medidas efectivas desde ahora, el costo total por los impactos del cambio climático podría ser equivalente a cuando menos el 5% anual del PIB global. Es importante destacar que si se consideran los riesgos y costos de escenarios menos optimistas de cambio climático, el costo estimado asciende a más de 20% del PIB global. En contraste, si se toman medidas para reducir las emisiones globales de GEI, el costo podría ser de alrededor del 1% anual del PIB global (Stern, 2007).

Ante este escenario, México presentó, en el año 2009, su propio estudio sobre las implicaciones económicas del cambio climático. En él se destaca que este fenómeno global tendrá consecuencias económicas negativas para nuestro país: 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 de 50% de las emisiones representarían el 0.70% y 2.21% del PIB, a 10 y 30 dólares la tonelada de carbono respectivamente" (Semarnat y SHCP, 2009). Esto significa que los costos de la inacción son más elevados que los de mitigación.

Avance a junio de 2012 en la mitigación de emisiones derivado de las acciones del PECC

Figura 5.35



Fuente: Dirección General de Políticas de Cambio Climático, Semarnat. Avances y Perspectivas de Cumplimiento al Tercer Bimestre 2012. México, 2012. Disponible en: www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/es/publicaciones.html. Fecha de consulta: agosto de 2012.

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
<p>Ley General de Cambio Climático</p>	<p>En junio de 2012 se publicó el decreto de esta ley que busca:</p> <ul style="list-style-type: none"> I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la cooperación entre la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas en la materia; II. Regular las emisiones de gases de efecto invernadero para lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático; III. Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático; IV. Reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país y crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno; V. Fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación; VI. Establecer las bases para la concertación con la sociedad, y VII. Promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono.
<p>Programa Especial de Cambio Climático (PECC)</p>	<p>Este programa, planteado para el periodo 2009-2012, se basa en la Estrategia Nacional de Cambio Climático. El programa describe las acciones de reducción o mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero y presenta políticas públicas para la adaptación al cambio climático mediante 294 metas específicas planteadas por la Administración Pública Federal. El PECC plantea alcanzar una reducción de 50.6 MtCO₂e/año en el año 2012 y una visión de largo plazo al año 2050.</p>
<p>La Economía del Cambio Climático en México</p>	<p>Publicado en el 2009, este estudio estima los costos económicos que el cambio climático antropogénico generará para nuestro país, en especial para aquellos sectores de la población que, por su condición de pobreza, son los más vulnerables. Una de sus principales conclusiones señala que los costos de las acciones para combatir el cambio climático y mitigar sus efectos son muy inferiores a los daños económicos que pueden evitarse.</p>
<p>Comunicaciones Nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático</p>	<p>México ha asumido el compromiso internacional de presentar Comunicaciones Nacionales y es el único país en desarrollo que ha presentado su Cuarta Comunicación Nacional (2009). La Comunicación informa sobre las acciones realizadas a nivel nacional y subnacional en materia de mitigación de emisiones de GEI y adaptación e incluye la actualización del inventario. También integra un capítulo de las circunstancias nacionales y hace un análisis de las necesidades, carencias y obstáculos para entender y atender los problemas relacionados con el cambio climático. La Quinta Comunicación Nacional fue presentada durante la Conferencia de las Partes 18, en Doha, Qatar, a fines del 2012 e incluye el inventario actualizado a 2010. Las Comunicaciones Nacionales se pueden consultar en: www.inecc.gob.mx/cclimatico/comnal.html.</p>
<p>Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero</p>	<p>El último inventario (1990-2010) incluye las emisiones antropogénicas por fuente y sumidero de todos los gases de efecto invernadero. Los inventarios se elaboran usando metodologías de comparación aceptadas y promovidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y con ellos se cumplen los compromisos adquiridos ante ella. Los inventarios pueden ser consultados en: www.inecc.gob.mx/cclimatico/inventario.html.</p>

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
<p>Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC)</p>	<p>En mayo de 2007 se publicó la ENACC cuyos objetivos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificar oportunidades de reducción de emisiones y desarrollar proyectos de mitigación. - Reconocer la vulnerabilidad de los respectivos sectores y áreas de competencia e iniciar proyectos para el desarrollo de capacidades nacionales y locales de respuesta y adaptación. - Proponer líneas de acción, políticas y estrategias que sirvan de base para la elaboración de un Programa Especial de Cambio Climático.
<p>Programa GEI México</p>	<p>Es un programa nacional voluntario de contabilidad y reporte de GEI y de proyectos de reducción de emisiones. El Programa es coordinado por la Semarnat y la Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (CESPEDES), con el soporte técnico del Instituto Mundial de Recursos (WRI, por sus siglas en inglés) y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD, por sus siglas en inglés).</p> <p>Las empresas reportan anualmente sus emisiones de GEI. Los resultados del Programa para el año 2010 son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Empresas inscritas: 155. - Inventarios corporativos de GEI entregados: 100. - Total de emisiones contabilizadas por los reportes entregados: 121 millones de tCO₂e. - Porcentaje de emisiones respecto al total del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: 18%.
<p>Comisión Intersecretarial de Cambio Climático</p>	<p>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. Está integrada por los titulares de las Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (quien la preside y tiene a su cargo el Secretariado Técnico); Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; Comunicaciones y Transportes; Economía; Desarrollo Social; Energía; Relaciones Exteriores, Hacienda y Crédito Público, Gobernación, Salud, Turismo y Marina, así como por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Se apoya en siete Grupos de Trabajo: Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero; Mitigación; Adaptación; Programa Especial de Cambio Climático; REDD+ (actividades que reducen las emisiones por evitar la deforestación y degradación forestal y contribuyen a la conservación, manejo sostenible de los bosques y mejoramiento de los acervos de carbono forestal); Negociaciones Internacionales y Vinculación con la Sociedad Civil.</p>
<p>Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de Gases de Efecto Invernadero</p>	<p>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. A finales de junio de 2012, el Comité había otorgado 292 cartas de aprobación de proyectos. Los proyectos mexicanos registrados ante el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) sumaban 144 hasta finales de julio de 2012 y habían recibido 16.03 millones de Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE), lo que coloca a México en el 5° lugar mundial de RCE recibidas.</p>

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
<p>Impulso a la eficiencia y tecnologías limpias para la generación de energía eléctrica</p>	<p>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. Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha instrumentado proyectos de eficiencia energética, cogeneración, reducción de emisiones de metano, recuperación mejorada con bióxido de carbono y disminución de la quema de gas. Estos proyectos se encuentran en diferentes etapas del proceso de gestión de proyectos considerados Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) ante la Organización de las Naciones Unidas (ONU) con la intención de ser presentados como actividad de proyecto en el marco del MDL.</p> <p>La Comisión Federal de Electricidad (CFE) elaboró desde 2007 un portafolio de 27 proyectos viables bajo el esquema de MDL, con una contribución estimada de 6.5 millones de toneladas evitadas de bióxido de carbono al 2012.</p>
<p>Promoción al uso eficiente de energía en el ámbito doméstico, industrial, agrícola y de transporte</p>	<p>Programa de Eficiencia Energética Busca el ahorro de energía térmica en las instalaciones industriales y ahorro de energía eléctrica en inmuebles de la Administración Pública Federal (APF). En las instalaciones industriales, de enero de 2007 a junio de 2010 el ahorro de energía térmica ha sumado 9.62 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. En los inmuebles de la APF el ahorro eléctrico fue de 119 millones de kilowatts-hora.</p> <p>Desarrollo de vivienda sustentable La Comisión Nacional de Vivienda otorgó, a mayo de 2012, 165 124 hipotecas verdes, acumulando entre 2009 y mayo de 2012 un total de 832 358 hipotecas de este tipo. Se estima que cada vivienda de interés social equipada con ecotecnologías reduce sus emisiones anuales entre 1 y 1.5 tCO₂.</p>
<p>Programas de adaptación al cambio climático</p>	<p>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; Estudio de adaptación en el sector agua urbana en Hermosillo, Sonora; Fomento de las Capacidades para la Etapa II de Adaptación al Cambio Climático en Centroamérica, México y Cuba: sectores agrícola, forestal e hídrico, Modernización del Servicio Meteorológico Nacional, así como la elaboración de los Atlas Regionales de Vulnerabilidad y del Atlas Nacional de Vulnerabilidad.</p> <p>Los programas de la Conafor (especialmente el ProÁrbol), los de conservación de hábitats a través de las Áreas Naturales Protegidas, las Unidades de Manejo Sustentable de Vida Silvestre (Uma), así como las acciones desplegadas junto con la Profepa, el Ejército Mexicano y las autoridades locales para evitar la tala clandestina y los incendios forestales, constituyen importantes esfuerzos del gobierno mexicano para proteger los sumideros de carbono existentes.</p> <p>Los planes de acción climática municipal buscan crear capacidades entre los tomadores de decisiones de los municipios sobre el cambio climático y sus impacto, así como promover políticas públicas a nivel local.</p>

Medidas, compromisos o acciones tomadas	Observaciones
Programas de adaptación al cambio climático	Los Programas Estatales de Acción frente al Cambio Climático (PEACC) apoyan en la planeación y desarrollo de políticas públicas estatales en la materia. Los Programas involucran además de los inventarios y escenarios de emisiones, una revisión sobre la variabilidad climática y cambio climático local y estatal; una evaluación de la vulnerabilidad e impactos en los sectores o regiones de los estados para determinar las estrategias de mitigación y adaptación. Al año 2012 existían ocho PEACC concluidos y 24 en desarrollo.
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: Portal de cambio climático: www.inecc.gob.mx/cclimatico/index.html ; Centro Nacional de Observación Climática de Gran Altitud; Participación en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático y Autoevaluación de Capacidades Nacionales para la Implementación de las Convenciones sobre Diversidad Biológica, Cambio Climático y Combate a la Desertificación. Existen también diversas publicaciones, tanto técnicas como de difusión al público en general, disponibles en las páginas electrónicas de la Semarnat e INECC.
<p>Nota: ¹ 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 el sitio de cambio climático de la Semarnat, disponible en: www.cambioclimatico.gob.mx/ o el Portal de Cambio Climático del INECC, disponible en: www.cambio_climatico.inecc.gob.mx/, así como las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático publicadas en la página del INECC: www.inecc.gob.mx.</p> <p>Fuentes: Conavi. <i>Avances del Sector Vivienda Mayo 2012</i>. México. 2012. Disponible en: www.conavi.gob.mx/documentos/coyuntura/avances-del-sector-mayo-2012.pdf. Fecha de consulta: agosto de 2012. Dirección General Adjunta para Proyectos de Cambio Climático, Semarnat. México. 2012. Semarnat. <i>Acciones de México</i>. México. 2010. Disponible en: www.cambioclimatico.gob.mx/. Fecha de consulta: marzo de 2012.</p>	

OZONO ESTRATOSFÉRICO

El adelgazamiento de la capa de ozono es otro de los problemas ambientales globales más importantes, debido a que dicha capa regula el paso de los rayos ultravioleta²¹ (UV) emitidos por el Sol. La destrucción de la capa de ozono ha sido resultado de la acción de varios agentes, conocidos genéricamente como sustancias agotadoras del ozono (SAO), las cuales pueden existir naturalmente en la atmósfera o generarse como resultado de las actividades humanas; tienen como característica distintiva el contener en su estructura átomos de cloro, flúor y bromo. Las SAO antropogénicas más conocidas son los clorofluorocarbonos (CFC), pero también destacan los hidroc fluorocarbonos (HCFC), halones, bromuro de metilo (MBR), tetracloruro de

carbono (TET) y metil cloroformo (MCF). Las SAO se utilizan comúnmente en los sistemas de refrigeración, aire acondicionado, espuma rígida de poliuretano, solventes, plaguicidas, aerosoles y extintores, entre otros. Al ser emitidas, las SAO alcanzan la estratosfera, donde participan en una serie de reacciones que liberan átomos de cloro y bromo que destruyen la molécula del ozono. Para dar una idea de la capacidad destructiva de estas sustancias, un átomo de cloro o bromo puede destruir hasta cien mil moléculas de ozono (WMO y UNEP, 2003).

Aunque las emisiones de SAO se generan en todo el planeta y el adelgazamiento de la capa de ozono ocurre a nivel global, la circulación atmosférica desplaza la mayoría de las SAO hacia los polos. En particular, las condiciones

²¹ La radiación ultravioleta (UV) es una forma de energía radiante que proviene del Sol y llega a la Tierra en las formas UV-A, UV-B y UV-C. Los rayos UV-A son los menos nocivos y llegan en menor cantidad a la superficie terrestre. Los UV-C son altamente energéticos y los más dañinos, sin embargo, la capa de ozono impide su paso. Por último, la radiación UV-B, también muy dañina, es retenida en su mayor parte por la capa de ozono, aunque una pequeña proporción alcanza la superficie y puede causar daños a las células y tejidos de los organismos.

atmosféricas en el Polo Sur favorecen las reacciones que convierten a las SAO en gases reactivos que destruyen al ozono. Durante dichas reacciones se liberan cloro y bromo en formas activas que se acumulan en las nubes polares. En la primavera, cuando aumenta la temperatura, las nubes se disgregan y liberan cloro y bromo activos, los cuales destruyen rápidamente el ozono. Por esta razón, aunque el problema es global, sus efectos son menores cerca del ecuador y se incrementan con la latitud hacia los polos, en particular hacia el Polo Sur (PNUMA, 2002, 2003; WMO y UNEP, 2003; Manney *et al.*, 2011).

El adelgazamiento de la capa de ozono en Antártica ha producido lo que se conoce como el “agujero de ozono²²”, observado por primera vez a principios de los años ochenta y que presentó su máximo tamaño registrado en el año 2000, cubriendo cerca de 29.9 millones de km² (Figura 5.36). En 2011, el tamaño máximo fue de 26 millones de km², una superficie ligeramente más grande que Norteamérica

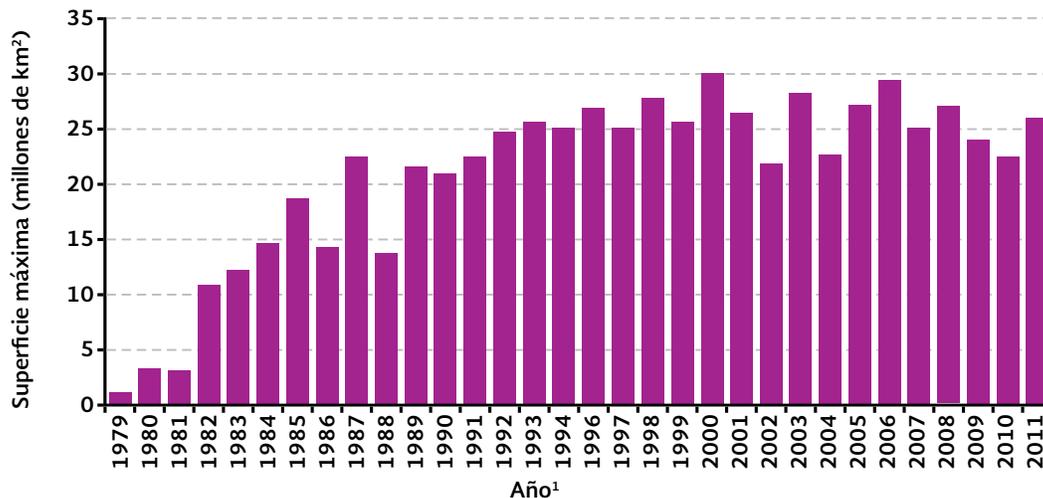
(NASA, 2011). Aunque el agujero de ozono se había registrado exclusivamente en Antártica, en el año 2011 se registró por primera vez en el Ártico. Ese año, las condiciones frías en la estratosfera baja ártica duraron más de lo habitual y fueron más severas, lo que permitió que se liberaran formas activas de cloro que destruyeron alrededor de 80% de las moléculas de ozono entre los 18 y 20 kilómetros de altitud (Manney *et al.*, 2011).

La Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés) monitorea la concentración de ozono en las principales ciudades del mundo, así como en los polos. En la Figura 5.37 se observan las concentraciones promedio anuales de ozono estratosférico global, en la Ciudad de México y Guadalajara y Antártica (en el mes de octubre²³), entre 1979 y 2012. Es evidente la baja concentración que se registra desde principios de los años ochenta en octubre en Antártica, comparada con la concentración global (IB 1.3-3). En esa región



Superficie máxima cubierta por el agujero de ozono, 1979 - 2011

Figura 5.36



Nota:

¹ No hay datos disponibles para el año 1995.

Fuentes:

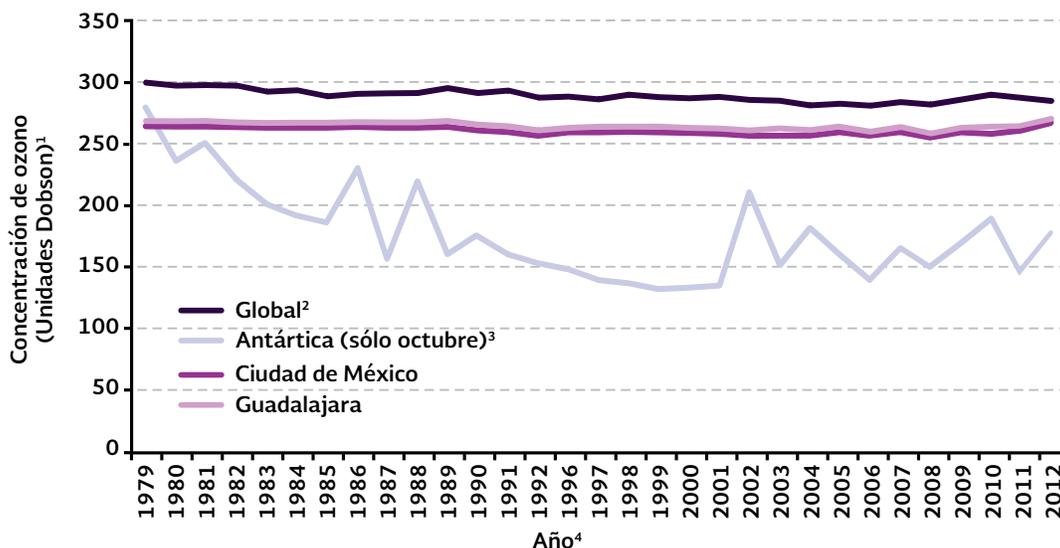
NASA. Ozone Hole Watch. Annual Records. 2011. Disponible en: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.html. Fecha de consulta: marzo de 2012.

²² Se considera que existe un “agujero” en la capa de ozono cuando la concentración de ozono estratosférico es inferior a 220 unidades Dobson (UD), concentración menor a la global de alrededor de 300 UD. 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; WMO y UNEP, 2003).

²³ Se considera que el agujero de ozono en Antártica se forma en el mes de octubre.

Concentración del ozono estratosférico: global, sobre Antártica y sobre dos ciudades mexicanas, 1979 - 2012

Figura 5.37



Notas:

¹ 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).

² La concentración global de ozono en el año 2012 incluye mediciones hechas de enero a agosto; para Guadalajara y Ciudad de México abarca de enero a octubre.

³ Para Antártica, los promedios anuales corresponden a las concentraciones de ozono registradas en octubre. Octubre es considerado el mes en el que se abre el agujero de ozono.

⁴ Datos no disponibles para el periodo 1993-1995.

Fuentes:

NASA. Total Ozone Mapping Spectrometer. 2003.

NASA. Aura Validation Data Center. Disponible en: <http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=677741240>. Fecha de consulta: octubre de 2012.

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. En contraste, tanto la concentración global como la de las dos ciudades mexicanas que se muestran como referencia, aunque presentan cambios en la concentración éstos no son significativos, lo cual refuerza el hecho de que a pesar de que se trata de un problema generado a nivel global, sus consecuencias más evidentes son regionales.

CONSUMO Y CONCENTRACIÓN DE SAO

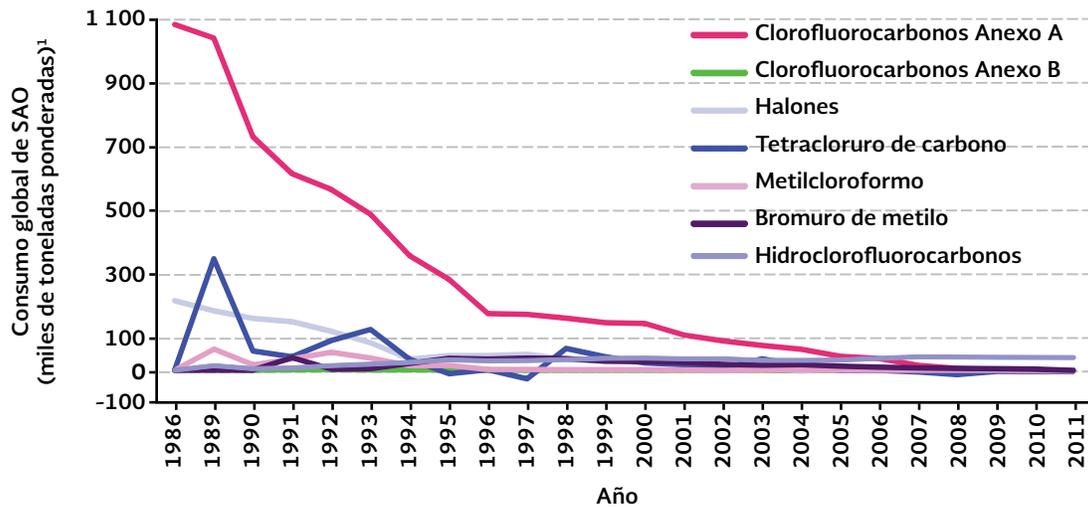
Dado que el impacto de las SAO depende de su potencial de agotamiento del ozono²⁴

(WMO y UNEP, 2003), en este capítulo se presentan el consumo, tanto global como nacional, ponderado por dicho potencial. Cabe mencionar que el consumo ponderado de SAO considera de manera integral el ciclo de vida de estas sustancias (producción, importación y exportación), así como su capacidad específica para destruir el ozono.

A pesar de que el consumo global de SAO disminuyó drásticamente a principios de los noventa con la entrada en vigor del Protocolo de Montreal²⁵ (97% en el periodo 1986-2011), esto no se ha reflejado en su concentración atmosférica (Figuras 5.38 y 5.39; **IB 1.3-1** y **1.3-4**). Aunque se esperaría que sus concentraciones se redujeran casi a la par de la caída en el consumo, éstas se han estabilizado desde principios de los años noventa, lo cual

²⁴ El potencial de agotamiento del ozono (PAO) es la capacidad de cada SAO para destruir al ozono y se calcula usando como referencia al CFC-11 (PAO igual a 1).

²⁵ Tratado internacional que establece los compromisos de reducción de la producción y el consumo de SAO con el fin de proteger la capa de ozono. Más detalles sobre este tratado pueden consultarse en la sección de Protección de la capa de ozono en este mismo capítulo.

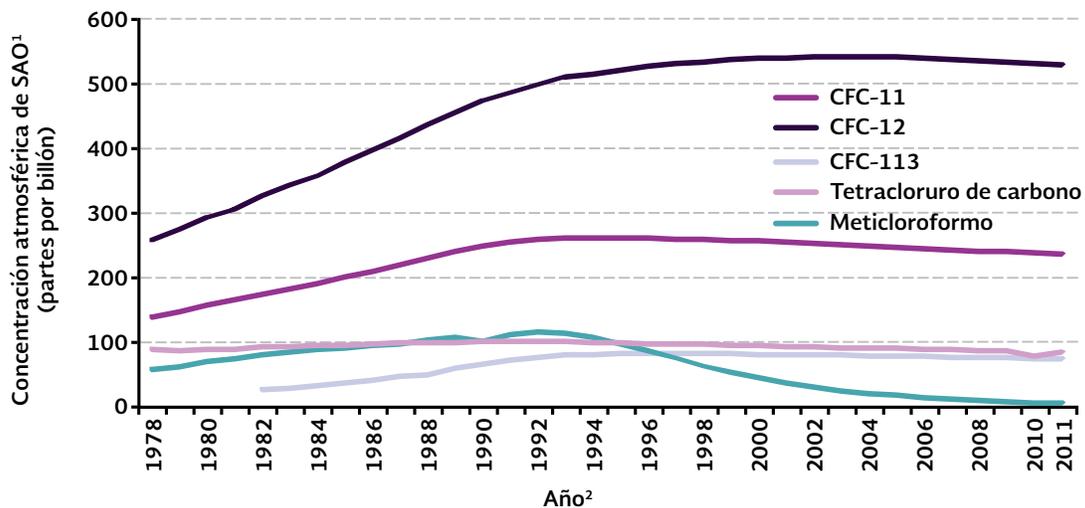


Notas:

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.

Fuente:

UNEP. *Ozone Secretariat. Data Reporting and Access. Data Access Centre: Access data on ozone depleting substances by year(s), party(s) and group(s) of substances.* 2011. Disponible en: http://ozone.unep.org/Data_Reporting/Data_Access/#notes. Fecha de consulta: octubre de 2012.



Notas:

¹ Los datos de concentración corresponden a registros en el hemisferio sur.

² Para 2011, los promedios anuales corresponden a datos de enero a septiembre.

Fuentes:

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

CDIAC. *Atmospheric Trace Gas Measurements.* Disponible en: <http://cdiac.ornl.gov/>. Fecha de consulta: octubre de 2012.

puede explicarse por los tiempos de vida atmosférica de las SAO, que pueden ser largos, variando de los cinco hasta los 100 años (WMO y UNEP, 2003; CDIAC, 2011).

En México, el consumo total ponderado de SAO disminuyó cerca de 95% en 2011 (se consumieron 1 563 toneladas) con respecto al volumen reportado en 1989 (poco más de 29 mil toneladas; Figura 5.40; **IB 1.3-2; IC8**). Esta disminución es debida 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.



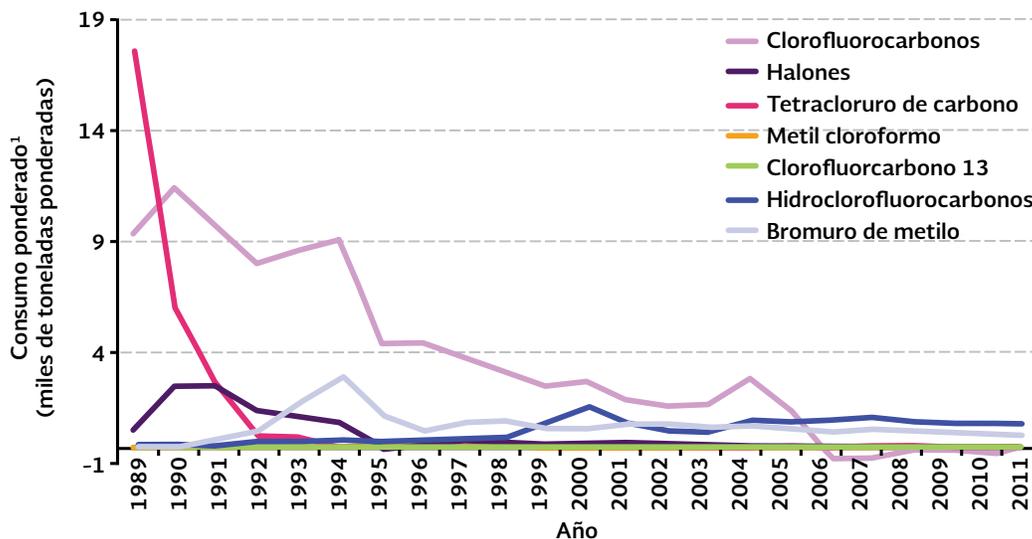
Además de la concentración atmosférica de SAO, existen otros factores que influyen en la destrucción del ozono: la temperatura en la estratosfera, la actividad solar y la concentración atmosférica de gases como el metano, vapor de agua y el óxido nitroso (Weatherhead y Andersen, 2006). No obstante los esfuerzos realizados y los resultados

alcanzados en la reducción del consumo y producción de SAO, las evaluaciones recientes indican que la capa de ozono regresará a los niveles que tenía en 1980 entre los años 2050 y 2075 (PNUMA, 2007 y 2008).

PROTECCIÓN DE LA CAPA DE OZONO

La preocupación de la comunidad científica y de los gobiernos de diversos países por la pérdida del ozono estratosférico llevó a la adopción de la Convención de Viena sobre la Protección de la Capa de Ozono (1985) y del Protocolo de Montreal sobre Sustancias que Degradan la Capa de Ozono (1987), en los cuales se establecieron los compromisos para reducir el consumo y la producción de SAO (PNUMA, 2003; Tabla 5.4). A junio de 2012, 197 países habían firmado y ratificado tanto la Convención como el Protocolo. México firmó estos tratados y adoptó las enmiendas de Londres (1991), Copenhague (1994), Montreal (2006) y Beijing (2007; UNEP, 2011b).

Consumo nacional ponderado de sustancias agotadoras del ozono, 1989 - 2011 Figura 5.40



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 posee cada sustancia.

Fuente:

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

Sustancia	Reducción en países industrializados (porcentaje)	Reducción en países en desarrollo (porcentaje)
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:

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

A partir de 1995, la mayoría de las sustancias agotadoras de ozono incluidas en el Protocolo de Montreal, 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, apoyos financieros que les permitieran enfrentar los costos de eliminación de las SAO.

Dado el éxito en el cumplimiento de las metas establecidas, el Protocolo de Montreal es considerado como uno de los acuerdos internacionales más exitosos. De hecho, algunas estimaciones indican que de no existir

este acuerdo, para el año 2050 la destrucción del ozono podría haber aumentado 50% en el hemisferio norte y 70% 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 evitaron 1.5 millones de casos de cáncer de piel de tipo melanoma, 19 millones de casos de cáncer de tipo no melanoma y 130 millones de casos de cataratas (UNEP, 2009). En la Figura 5.41 se muestra la magnitud de los efectos que

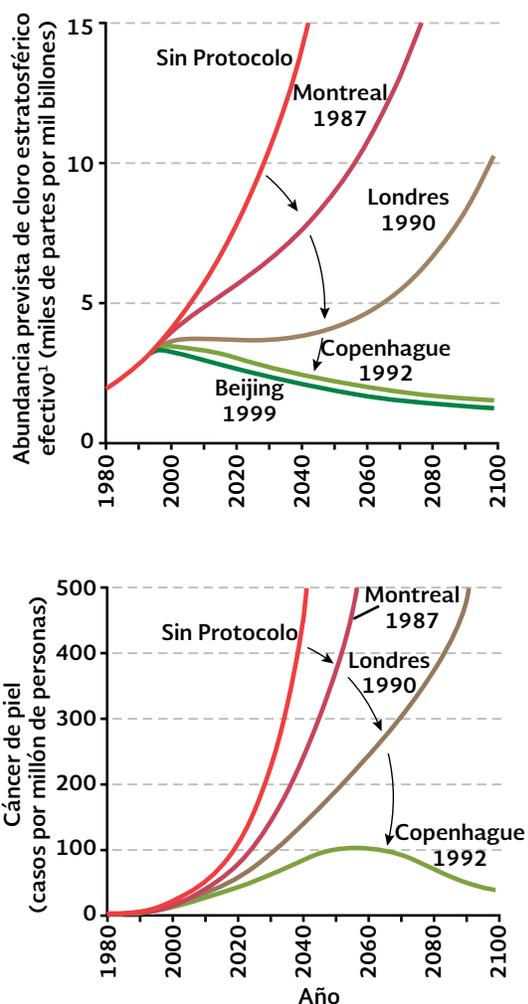
se calcula ha tenido el Protocolo de Montreal y sus enmiendas en las concentraciones estratosféricas de cloro, así como los efectos que hubieran podido registrarse en la salud (específicamente en cuestión de cáncer de piel) en caso de no haber sido adoptado.

México, al igual que otros países en desarrollo, se comprometió a cumplir las metas de reducción de SAO mostradas en la Tabla 5.4. La estrategia de reducción seguida por el país se ha basado en las medidas siguientes: 1) control del consumo y producción de SAO, 2) fomento y asesoría sobre el uso de sustancias y prácticas alternativas que minimicen los impactos en la capa de ozono, 3) introducción de tecnologías limpias que empleen sustancias y prácticas alternativas a las SAO, y 4) capacitación a los usuarios sobre las medidas de conservación de la capa de ozono. Dicha estrategia se enmarca en el calendario de reducción comprometido por los países ante el Protocolo de Montreal.

De las metas comprometidas por México, se cumplieron anticipadamente las planteadas para los CFC, el tetracloruro de carbono (TET), el metil cloroformo (MCF) y los halones. En septiembre del año 2005, nuestro país cerró su única planta de producción de CFC, 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, 2009). 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 (Figura 5.40). En el caso del bromuro de metilo, empleado como plaguicida para la fumigación de suelos agrícolas y sistemas de almacenamiento de granos y harinas, la disminución ha sido progresiva: en el 2005 se cumplió la meta de reducción del 20% a partir de la línea base establecida en 1998 (1 130 toneladas ponderadas) y entre 2008 y 2011

Efectos del Protocolo de Montreal y sus enmiendas

Figura 5.41



Nota:

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

Fuente:

UNEP. Vital ozone graphics 2.0. Climate link. Kenya. 2009.

se eliminaron 370 toneladas ponderadas adicionales, con lo que la reducción total del consumo de esta sustancia en México alcanzó el 53%. Una parte considerable de la reducción en el consumo de esta sustancia se ha logrado con la aplicación de la técnica de injertos en la producción de hortalizas, lo que evita algunas de sus enfermedades y reduce su uso como plaguicida. Asimismo, México adelantó un año su compromiso de eliminación total de esta sustancia, por lo que deberá cumplirlo al año 2014. Para información más detallada sobre producción, importación, exportación y consumo de SAO en México se recomienda consultar los [Cuadros D3_AIRE03_01, D3_AIRE03_02, D3_AIRE03_03, D3_AIRE03_04](#) y [D3_AIRE03_05](#).

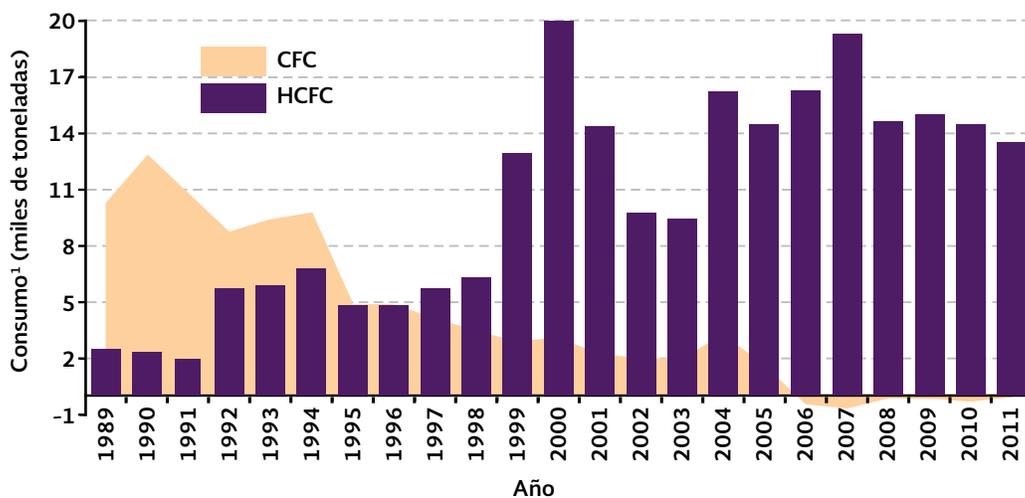
Como parte del fomento al uso de sustancias alternativas a las SAO, se han empleado algunas menos dañinas a la capa de ozono. Por ejemplo, los HCFC poseen un menor potencial de agotamiento: los que se emplean en México poseen potenciales de entre 0.04 y 0.07, en contraste con los reportados para los CFC, que van de 0.6 a 1.0. La Figura 5.42 muestra

los resultados del proceso de sustitución de los CFC: mientras que el consumo de CFC se eliminó totalmente, resultado del apoyo a proyectos de inversión en tecnologías limpias en sectores que emplean estas sustancias, el consumo de HCFC ha ido incrementándose (IB 1.3-5). Cabe señalar que, incluso para los HCFC existen metas progresivas de reducción en su consumo; en 2015 se debe disminuir 15% hasta alcanzar el 100% en 2040 (Tabla 5.4).



Para ayudar a los países en desarrollo a cumplir con las medidas de control adoptadas ante el Protocolo de Montreal, en 1991 se estableció a nivel internacional el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal (UNEP, 2011a). Los recursos de este Fondo se dirigen a impulsar la introducción de tecnologías limpias y la capacitación de los usuarios de las SAO. A noviembre de 2011, este Fondo había destinado alrededor de 2 800 millones de dólares a nivel mundial para apoyar a 145 países en desarrollo en la ejecución de 6 875 proyectos. La inversión ha permitido una reducción en el consumo y producción; por ejemplo, a diciembre de 2010,

Consumo nacional de HCFC como sustancias alternativas a los CFC, 1989 - 2011 Figura 5.42



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.

Fuente:

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

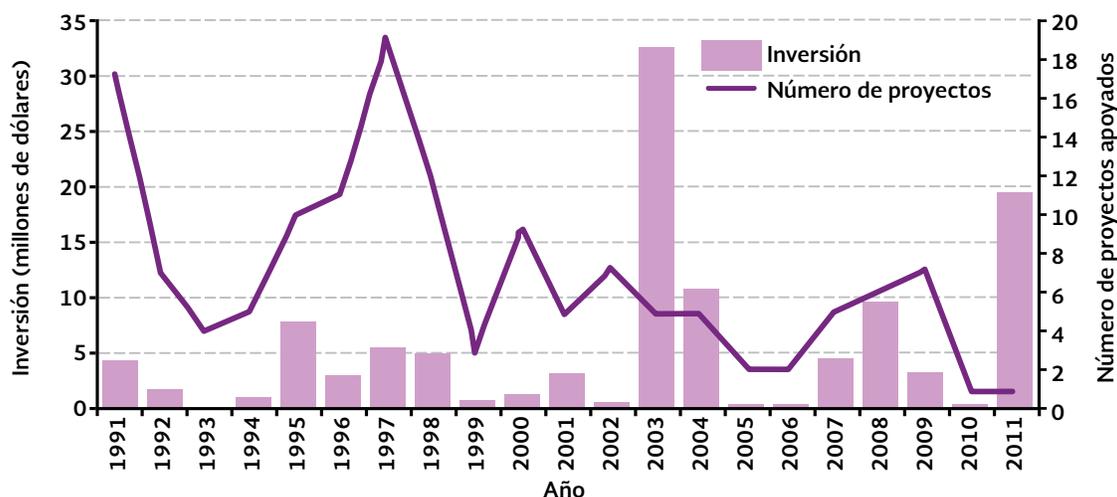
se evitó el consumo de 256 180 toneladas y la producción de 192 628 toneladas, es decir, 448 808 toneladas ponderadas de SAO (UNEP, 2011a). México recibió de este Fondo en el periodo 1991-2011 un total de 113.3 millones de dólares, con lo que apoyó 143 proyectos en sectores como refrigeración, aerosoles, espumas, solventes, agricultura y almacenaje de productos, entre otros (Figura 5.43).

A nivel nacional y con el fin de implementar las medidas necesarias para el cumplimiento de los compromisos de México ante el Protocolo

de Montreal, hace más de veinte años se creó la Unidad de Protección a la Capa de Ozono, dependiente de la Semarnat (Semarnat, 2005). También se desarrolló el Sistema de Información y Seguimiento de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SISSAO) para vigilar la importación y exportación de estas sustancias y contar con un registro estadístico de su movimiento (Semarnat, 2011). Paralelamente, y con la finalidad de reducir el consumo del bromuro de metilo, que se utiliza como plaguicida, están en marcha proyectos para brindar asistencia técnica y capacitación.

Fondos otorgados a México por el Fondo Multilateral para la Implementación del Protocolo de Montreal 1991 - 2011

Figura 5.43



Fuente:

Unidad Protectora de la Capa de Ozono, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, Semarnat México. 2012.

REFERENCIAS

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.

CBD. *Interlinkages between biological diversity and climate change. Advice on the integration of biodiversity considerations into*

the implementation of the United Nations framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol. CBD Technical Series No. 10. Montreal. 2003.

CDIAC. *Atmospheric CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl4 and SF6 histories (1910-2011).* 2011. Disponible en: http://cdiac.ornl.gov/oceans/new_atmCFC.html. Fecha de consulta: marzo de 2012.

CICC. *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Comisión Intesecretarial de Cambio Climático, Semarnat. México. 2007.

Delgado, G. H. *Volcano-ice interactions in Mexico: Extinction of glaciers at Popocatepetl and the fate of the glaciers of Iztaccíhuatl and Citlaltépetl volcanoes*. American Geophysical Union, Spring Meeting. Acapulco, México. 22-25 May, 2007.

Delgado, G. H., J. Miranda, C. Huggel, S. Ortega del Valle y M. A. Alatorre Ibarra. Chronicle of a death foretold: Extinction of the small-size tropical glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico). *Global and Planetary Change* 56: 13–22. 2007.

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, Semarnat. México. 2005.

Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, Semarnat. Programas de gestión de la calidad del aire. México. 2012. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/caliddelaire/Paginas/programas.aspx. Fecha de consulta: abril de 2012.

Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional, INE, Semarnat. México. 2007.

DOF. *Modificación a la NOM-020-SSA1-1993, Salud ambiental*. Diario Oficial de la Federación. México. 2002 (30 de octubre).

DOF. *Modificación a la NOM-025-SSA1-1993, Salud Ambiental*. Diario Oficial de la Federación México. 2005 (26 de septiembre).

EEA. *Impacts of Europe's changing climate*. 2004. Disponible en: www.eea.europa.eu/publications/climate_report_2_2004. Fecha de consulta: noviembre de 2008.

GDF. *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. 2012.

GDF. NADF-009-AIRE-2006. Gaceta Oficial del Distrito Federal. México. 2006.

IEA. *CO₂ emissions from fuel combustion. Highlights*. 2012 Edition. France. 2012.

INE, Semarnat. *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. México. 2011.

INE, Semarnat. *Inventario de emisiones de los estados de la frontera norte de México, 1999*. México. 2005.

INE, Semarnat. *Inventario nacional de emisiones de México, 1999*. México. 2006.

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

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*. México. 2008.

INEGI. *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas Económicas y Ecológicas de México serie 2005-2009*. INEGI. México. 2010.

INEGI. *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas Económicas y Ecológicas de México 2006-2010*. INEGI. México. 2012.

IPCC. *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press. United Kingdom. 2001.

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*. France. 2007a.

IPCC. *Climate change and water*. IPCC Technical Paper VI. Switzerland. 2008.

IPCC. *Resumen Técnico. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Aportes del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático*. Francia. 2007b.

IPCC. *The AR4 Synthesis Report*. France. 2007c.

Keeling, C.D. y T.P. Whorf. Atmospheric CO₂ 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: septiembre de 2012.

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: 157–163. 2010.

Manney, G., M. Santee, M. Rex, N. Livesey, M. Pitts, P. Veefkind, E. Nash, I. Wohltmann, R. Lehmann, L. Froidevaux, L. Poole, M. Schoeberl, D. Haffner, J. Davies, V. Dorokhov, H. Gernandt, B. Johnson, R. Kivi, E. Kyrö, N. Larsen, P. Levelt, A. Makshtas, T. McElroy, H. Nakajima, M. Parrondo, D. Tarasick, P. Gathen, K. Walker y N. Zinoviev. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478: 469–475. 2011.

Nakicenovic, N. et al. *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. United Kingdom. 2000. Disponible en: www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm. Fecha de consulta: octubre de 2012.

NAS. *Climate change science. An analysis of some key questions*. National Academy Press. United States of America. 2001.

NASA. *Arctic sea ice continues decline, hits 2nd-lowest level*. 2011. Disponible en: www.nasa.gov/topics/earth/features/2011-ice-min.html. Fecha de consulta: marzo de 2012.

NASA. *Ozone hole watch. Annual records*. 2011. Disponible en: http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/annual_data.html. Fecha de consulta: marzo de 2012.

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

NOAA. *Arctic report card: Update for 2011. Greenland ice sheet*. 2011a. Disponible en: www.arctic.noaa.gov/reportcard/greenland_ice_sheet.html. Fecha de consulta: febrero de 2012.

NOAA. *Climate Watch Magazine. 2011 melt season on greenland up to 30 days longer than average*. 2011b. Disponible en: www.climatewatch.noaa.gov/article/2011/2011-melt-season-on-greenland-up-to-30-days-longer-than-average-3. Fecha de consulta: febrero de 2012.

OMM. 2011: *el décimo año más cálido en el mundo, el más cálido en un período la Niña, y el de menor volumen de hielo marino en el mar ártico*. 2011. Comunicado de prensa 935 de la Organización Meteorológica Mundial. Disponible en: www.wmo.int/pages/index_es.html. Fecha de consulta: marzo de 2012.

PEF. *Programa Especial de Cambio Climático 2009–2012*. México. 2009.

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*. Costa Rica. 2003.

PNUMA. *Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. Logros en la protección del ozono estratosférico. Informe sobre los adelantos logrados 1987 a 2007*. Kenia. 2008.

PNUMA. *Un éxito en ciernes. El Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono*. Kenia. 2007. Disponible en: http://ozone.unep.org/spanish/Publications/20th_anniversary_info_kit.shtml. Fecha de consulta noviembre de 2012.

Semarnat. COP 16. CMP6 México 2010. *Las conferencias de Cancún un espacio sobre cambio climático para todos*. México. 2011.

Semarnat. Programas de Gestión de la Calidad del Aire. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/programas.aspx Fecha de consulta: enero de 2013.

Semarnat. *Protección a la capa de ozono*. México. 2011. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/pco.aspx. Fecha de consulta: abril de 2012.

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

Smith, J. B., J. L. Jeerey y B. Hurd. The difficulties of estimating global non-market damages from climate change. En: Griffin, J. M. *Global climate change. The science, economics and politics*. United Kingdom. 2003.

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

Townsend, P. A., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. H. Buddemeier y D. R. Stockwell. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626-629. 2002.

UNEP. *Multilateral Fund for the implementation of the Montreal Protocol*. 2011a. Disponible en: www.multilateralfund.org/. Fecha de consulta: abril de 2012.

UNEP. *Status of ratification*. Ozone Secretariat. 2011b. Disponible en: http://ozone.unep.org/new_site/en/treaty_ratification_status.php. Fecha de consulta: agosto de 2012.

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

UNEP. *Vital ozone graphics 2.0. Climate link*. Kenya. 2009.

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

UNFCCC. *Kyoto Protocol. Status of Ratification*. 2012. Disponible en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php. Fecha de consulta: marzo de 2012.

Unidad de Protección a la Capa de Ozono, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Semarnat. *Acciones de México para proteger la capa de ozono*. México. 2009. Disponible en: www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Paginas/pco.aspx. Fecha de consulta: abril de 2012.

Unidad de Protección de la Capa de Ozono, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Semarnat. *Sistema de Información y Seguimiento de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SISSAO)*. 2005. Disponible en: <http://sissao.semarnat.gob.mx>. Fecha de consulta: abril de 2012.

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

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

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

WRI. *A Guide to the global environment 1998-1999*. Oxford, USA. 1998.