



## 5. AIRE

La población y el estado del ambiente están estrechamente relacionados. El hombre siempre ha hecho uso de los recursos naturales y modificado al ambiente para tener mejores condiciones para su desarrollo. Sin embargo, a partir del año 1900, en buena medida debido al crecimiento poblacional explosivo, la industrialización y las pautas de consumo, se ha intensificado la extracción y el uso de los recursos sin que se haya avanzado en la misma magnitud en el manejo de los desechos producidos. Los residuos de las diferentes actividades humanas se han venido descargando al ambiente con la idea de que los ecosistemas tendrían la capacidad de absorberlos o «limpiarlos» sin que se generaran problemas. El resultado es que hoy en día las huellas de la actividad humana son evidentes en prácticamente cualquier lugar del planeta, por más alejado que se encuentre. La degradación del suelo y los problemas con la calidad del agua y el aire están extendidos ampliamente en el mundo.

El crecimiento rápido y la concentración de la población en áreas urbanas frecuentemente están asociados a una mayor presencia de actividades industriales, incremento del parque vehicular y elevado consumo de combustibles, que contribuyen a agudizar el problema de la contaminación atmosférica. La calidad del aire en México es una preocupación permanente, ya que los signos más evidentes de la disminución en su calidad, como la menor visibilidad y el incremento en las molestias y enfermedades asociadas a la contaminación, son ya cotidianos en las principales ciudades del país.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera no sólo tienen efectos a nivel local en la salud de las personas o en el estado de sus pertenencias (como el deterioro de los monumentos arquitectónicos), sino también a nivel regional, como es la afectación de los bosques y ecosistemas acuáticos debido a las lluvias ácidas (como ocurrió en el norte de Europa y está sucediendo actualmente en China) o, incluso, a nivel mundial, como el cambio climático y la reducción

del espesor de la capa de ozono estratosférico que ya afecta severamente la Antártida y otras regiones del mundo (PNUMA, 2002).

Ante este escenario resulta fundamental contar con un diagnóstico de la situación del aire en México que incluya tanto un análisis a nivel local, esto es, de las principales ciudades del país, como una evaluación del papel de nuestro país ante dos de los grandes problemas mundiales: el cambio climático global y el agujero de la capa de ozono. En este contexto, el análisis de la situación del aire en México aquí presentado incluye información sobre el inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera, la normatividad vigente relacionada con los principales contaminantes y una descripción comparativa de la calidad del aire en las principales ciudades y zonas urbanas del país en los últimos diez años. Además, se añade información reciente del problema del cambio climático global y la disminución del espesor de la capa de ozono estratosférico, incluyendo tanto las acciones que ha tomado México al respecto como las posibles consecuencias en el territorio nacional.

### *Inventario de emisiones*

La calidad del aire en una zona determinada, aunque es afectada por factores climáticos y geográficos, tiene una relación directa con el volumen de los contaminantes emitidos a la atmósfera. De ahí que un componente necesario en el diseño y la aplicación de cualquier programa para controlar la contaminación del aire es la información sobre las principales fuentes de contaminantes atmosféricos, así como el peso específico de cada uno de los sectores en el aporte de contaminantes a la atmósfera.

Los antecedentes del inventario de emisiones se remontan al año de 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), este último patrocinado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón. A partir de esa fecha se ha ido ampliando la información sobre emisiones de tal forma que, actualmente, se tiene información relacionada con las emisiones de fuentes fijas para las principales zonas urbanas del país y algunos corredores industriales.

La metodología básica para elaborar el inventario de emisiones fue desarrollada por el Instituto Nacional de Ecología e incluye manuales técnicos que han permitido uniformar los criterios y métodos de estimación de las emisiones, con el fin de que los inventarios sean comparables en el tiempo y entre lugares diferentes.

El inventario está formado por las estimaciones de todas las emisiones de contaminantes que se generan en un área determinada; éstas pueden provenir de fuentes fijas, como las industrias; móviles, como los vehículos automotores, y de fuentes naturales como el suelo y la vegetación. Para fines prácticos se pueden clasificar por tipo de fuente (industria, generación de electricidad, servicios, transporte y fuentes naturales) (**Recuadro III.1.1.2**) o por sector (fuentes puntuales, de área, móviles y de vegetación y suelo), como se hizo para la ZMVM en el inventario más reciente (1998). A mediados de los años noventa se elaboraron los inventarios disgregados de las principales zonas metropolitanas del país: Valle de México, Guadalajara (ZMG), Monterrey (ZMM) y Valle de Toluca (ZMVT), y algunas ciudades como Mexicali, Ciudad Juárez y Tijuana.

Para el caso de la ZMVM se realizó en 1998 un nuevo inventario en el que se aprovecharon las experiencias nacionales e internacionales y se reforzaron los procedimientos de aseguramiento y control de calidad para tener una estimación más precisa de las emisiones. En este último inventario se incorporaron, además de las emisiones de los contaminantes criterio —partículas menores a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )— las emisiones de dos de los gases de efecto invernadero: bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ). La metodología empleada en el inventario de 1998 se utilizó para recalcular las emisiones de los inventarios de 1994 y 1996 de tal forma que se pudieran comparar. Por esta razón, es posible encontrar estimaciones diferentes de las emisiones a la atmósfera generadas en el Valle de México para la misma fecha.

De acuerdo con los inventarios de emisiones realizados a mediados de los años noventa y que todavía reflejan bien la situación de las emisiones en la actualidad, la zona que tiene una mayor emisión es la ZMVM, donde se estimó para 1996 un poco más de 3.1 millones de toneladas/año (2.5 millones de toneladas/año siguiendo la metodología del

inventario de 1998). Las otras zonas metropolitanas que tuvieron emisiones importantes fueron la ZMM con 1.9 millones de toneladas/año y la ZMG con 1.4 millones de toneladas/año.

De manera global, considerando a las seis zonas urbanas examinadas (Cuadro III.I.I.I), el transporte es la principal fuente de contaminantes con el 70% del volumen total de las emisiones a la atmósfera. Las fuentes naturales contribuyeron con cerca del 17% del total de emisiones, siendo éstas básicamente de partículas suspendidas. El sector servicios emitió un poco menos del 5% y la industria un porcentaje inferior al 3% (Cuadro III.I.I.I). El sector transporte fue responsable de la mayor parte de las emisiones de CO a la atmósfera (95%), de NO<sub>x</sub> (70.5%) y de los hidrocarburos (HC) (43%), siendo los vehículos particulares la principal fuente; los camiones, tractocamiones y autobuses que utilizan diesel como combustible contribuyen en mayor medida en la emisión de partículas. Las fuentes naturales y principalmente el suelo desprovisto de vegetación, fueron responsables de cerca del 80% de la emisión de partículas suspendidas. Por su parte, la industria contribuyó con más del 70% del SO<sub>2</sub> y de un poco más del 11% de los NO<sub>x</sub> emitidos a la atmósfera, resaltando por el volumen de emisiones la industria química, la mineral no metálica y la de productos metálicos. El sector servicios produce fundamentalmente HC, siendo sus fuentes principales el consumo de solventes y las fugas que ocurren tanto en las estaciones de servicio de combustibles como durante la distribución y almacenamiento del gas LP de uso doméstico. En la ZMVM los HC no completamente quemados también contribuyen de manera importante a la contaminación atmosférica.

En términos generales, para la ZMG la mayor cantidad de emisiones son de CO con casi 900 mil toneladas/año debido, como en las demás ciudades, a la enorme cantidad de vehículos de uso particular, de transporte de pasajeros y de carga. La emisión de partículas provenientes del suelo también alcanza valores considerables representando cerca del 22% de las emisiones totales. La ZMM tiene, además de una gran cantidad de emisiones asociadas al transporte, la mayor emisión de partículas, que se estimó en un poco más

de 800 mil toneladas/año, valor que supera en más de 20 veces al de la ZMVM y es más del doble de lo estimado para la ZMG. Otro rasgo de la ZMM es que la contribución total de emisiones por la industria es superior también al registrado en la ZMVM y ZMG. La Zona Metropolitana de Toluca, así como Ciudad Juárez y Mexicali, tienen emisiones muy por debajo de las grandes urbes, pero siguen el mismo patrón, esto es, altas emisiones de CO, NO<sub>x</sub> e HC asociados al transporte y de SO<sub>2</sub> a la industria donde ésta se encuentra desarrollada como en la ciudad de Toluca. Resalta el caso de Mexicali por la alta cantidad de partículas que tienen un origen diferente al del suelo desprovisto de vegetación (por ejemplo, caminos sin pavimentar) (Cuadro III.I.I.I).

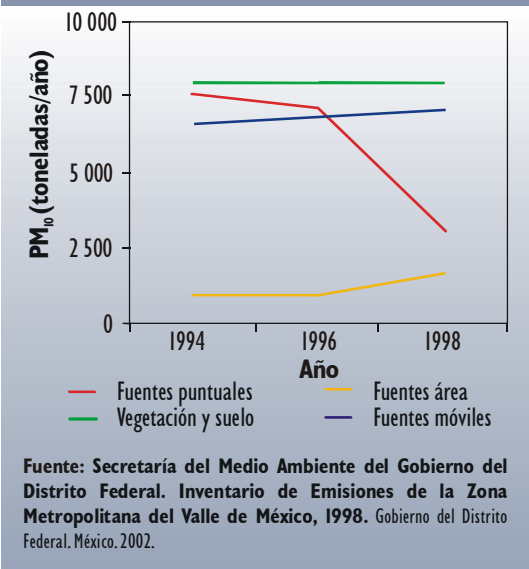
En la ZMVM para 1998 se estimó que las fuentes móviles contribuyeron con poco más de 2 millones de toneladas por año, lo que representó el 84% de las emisiones totales. Le siguen en importancia las fuentes de área con cerca del 12%; las fuentes puntuales y naturales contribuyen, en conjunto, con menos del 5%. Las fuentes móviles fueron responsables del 98% de las emisiones de CO, 80% de NO<sub>x</sub>, 40% de HC y 36% de PM<sub>10</sub>. Los vehículos particulares, debido a su gran número, fueron los emisores principales, aunque también otros vehículos que utilizan gasolina como combustible (taxis, microbuses y camiones) tienen contribuciones importantes. Para el caso de partículas, las principales fuentes fueron vehículos que utilizan diesel (Gobierno del Distrito Federal (GDF), 2000).

Las fuentes puntuales contribuyeron principalmente a la emisión de SO<sub>2</sub> (55%), aunque también tienen emisiones importantes de partículas (16%) y de NO<sub>x</sub> (13%). Las industrias química, del vestido, de madera y derivados, así como la mineral no metálica, fueron las que más contribuyeron a la emisión de SO<sub>2</sub>. Las fuentes de área fueron el origen principal de emisiones de HC (52%), siendo el consumo de solventes y las emisiones asociadas a las labores de limpieza y recubrimientos de superficies las más importantes. La contribución de las fuentes de área en la emisión de SO<sub>2</sub> fue de cerca del 24%, debido a procesos de combustión comercial e institucional. El suelo, principalmente el desprovisto de vegetación, fue el responsable del 40% de las PM<sub>10</sub> que se emitieron a la

atmósfera (Cuadro III.1.1.2). Cabe señalar que las emisiones de HC y  $\text{NO}_x$  son importantes ya que, además de representar cerca del 30% del total, intervienen directamente en la formación del ozono, contaminante que es el principal problema en la ZMVM.

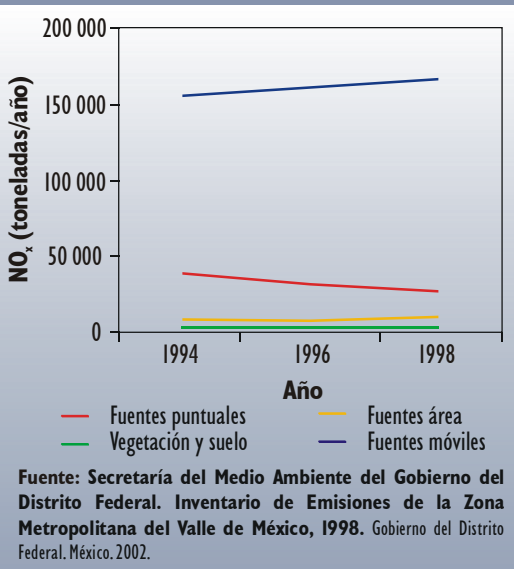
Los cambios más importantes que se dieron durante el periodo de 1994 a 1998 en la ZMVM fueron las reducciones

**Figura 5.1. Emisión de partículas menores a  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) por tipo de fuente en la ZMVM, 1994-1998.**

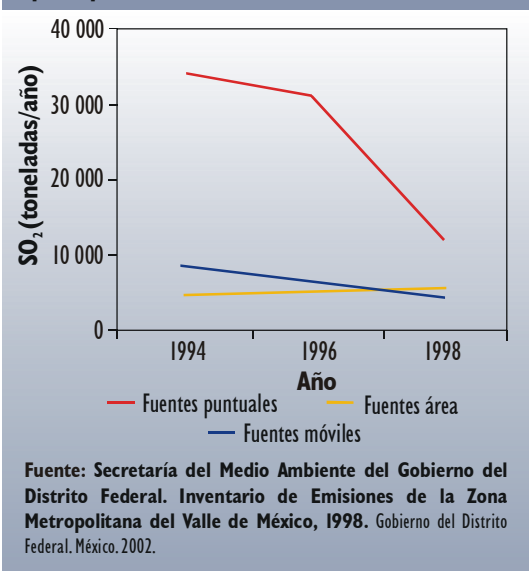


superiores al 50% que han tenido las fuentes puntuales, tanto de  $\text{PM}_{10}$  (Figura 5.1) como de  $\text{SO}_2$  (Figura 5.2) y de cerca del 30% de  $\text{NO}_x$  (Figura 5.3). Las emisiones de las fuentes móviles no han cambiado de manera importante, con excepción del  $\text{SO}_2$ , que disminuyó cerca del 45% debido fundamentalmente a la mejora de las gasolinas y los combustibles industriales. Las fuentes de área han incrementado significativamente sus emisiones de CO y de

**Figura 5.3. Emisión de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) por tipo de fuente en la ZMVM, 1994-1998.**



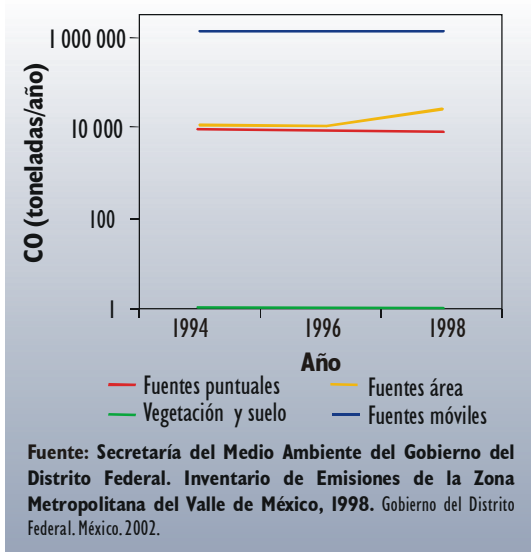
**Figura 5.2. Emisión de bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) por tipo de fuente en la ZMVM, 1994-1998.**



partículas, aunque todavía están muy por debajo de los valores que registran las fuentes móviles para el caso del CO (Figura 5.4) y del suelo para el caso de  $\text{PM}_{10}$ . No obstante, este último contaminante es importante, ya que la ZMVM frecuentemente presenta valores que están por encima de la norma de calidad, como se describe con más detalle en el apartado de calidad del aire.

Con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero, los valores preliminares estimados para  $\text{CO}_2$  en 1998 fueron de entre 16.7 y 37.5 millones de toneladas/año. Dependiendo del método de cálculo, el primer valor se obtuvo siguiendo el método de EPA (Environmental Protection Agency) y el segundo con el método del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Las principales fuentes fueron la combustión de gas natural por la industria y de gasolina por vehículos automotores. Para el caso del  $\text{CH}_4$  los valores

**Figura 5.4. Emisión de monóxido de carbono (CO) por tipo de fuente en la ZMVM, 1994-1998.**



estimados van de 388 (IPCC) a 172 012 toneladas/año (EPA), siendo las principales fuentes la combustión de gas natural y LP por la industria y las emisiones generadas en los rellenos sanitarios (Gobierno del Distrito Federal, 2000).

### **Normatividad y monitoreo del aire**

En nuestro país se registran los siguientes contaminantes atmosféricos:  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{NO}_2$ , ozono ( $\text{O}_3$ ),  $\text{PM}_{10}$ , partículas suspendidas totales (PST) y plomo (Pb). Para cada uno de estos contaminantes se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire donde se establecen las concentraciones máximas que no debieran sobrepasarse en un periodo definido (frecuentemente una vez por año), para que pueda garantizarse la protección adecuada de la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles (Recuadro III.1.1.5).

Con el fin de hacer más comprensible el nivel de contaminación, en México se utiliza 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 que indica el nivel de contaminación de una manera fácil de entender (Recuadro III.1.1.6). En la escala utilizada por este índice, los valores de la Norma de Calidad del Aire le corresponden

a 100 puntos Imeca y es el límite de lo que se considera como calidad de aire satisfactorio. Los múltiplos de 100 Imeca se han desarrollado por medio de algoritmos sencillos que toman en cuenta criterios de salud ambiental (Recuadro III.1.1.7). La calidad del aire se considera buena o satisfactoria cuando el valor Imeca no rebasa los 100 puntos, de 101 a 150 es regular o no satisfactoria, de 151 a 200 mala y de 201 en adelante se considera muy mala.

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. Éstas señalan 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, especificaciones de los combustibles que se utilizan (Recuadro III.1.1.3) y los valores que se consideran adecuados para la protección de la salud en materia de contaminantes atmosféricos (Recuadro III.1.1.5).

En una situación ideal, los límites que establecen las normas deberían estar basados en estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, tanto en animales como en seres humanos, que identifiquen los niveles del contaminante que son capaces de causar un efecto negativo en la salud de algún grupo de la población con un cierto margen de seguridad. Sin embargo, en nuestro país, debido principalmente a la falta de recursos e infraestructura suficiente para realizar todos los estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición necesarios para fundamentar el establecimiento de estándares de calidad del aire y a la gravedad del problema que se tenía a principios de los años noventa, las normas de calidad del aire mexicanas tuvieron como base fundamental la revisión de normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y por Estados Unidos. No obstante, recientemente la Secretaría de Salud, por medio del Centro Nacional de Salud Ambiental (Censa), ha realizado estudios tanto epidemiológicos como otros encaminados a establecer relaciones dosis-respuesta para contaminantes como el  $\text{O}_3$  y las  $\text{PM}_{10}$  que permitirán, en un futuro cercano, contar con información suficiente para ajustar las normas oficiales a las características de la población mexicana.

Actualmente se cuenta con registros de contaminantes atmosféricos en 23 ciudades y zonas metropolitanas (Figura 5.5). En todas ellas los contaminantes se miden aplicando procedimientos estandarizados a nivel internacional. La red más completa y más antigua se localiza en la ZMVM, que hoy en día tiene 32 estaciones de monitoreo automático (EMA) y 19 estaciones de monitoreo manuales (no todas funcionan de manera permanente) que registran  $O_3$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  y PST, considerados como contaminantes básicos y de los cuales se tiene más información acerca de sus efectos sobre la salud (véase **Principales contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre la salud**).

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 otras ciudades se concentran en evaluar alguno o varios contaminantes que les resultan importantes, como es el caso de Cananea, Cumpas y Nacozari, en el estado de Sonora, que registran principalmente  $SO_2$  y las ubicadas en Querétaro y San Luis Potosí que se concentran en  $SO_2$  y partículas suspendidas. La lista completa de las estaciones de monitoreo y los contaminantes registrados se pueden consultar en el Cuadro III.1.1.3.

## Calidad del aire en ciudades mexicanas

Existen diversas formas de enfocar el análisis de la calidad del aire. La descripción y el análisis de la calidad del aire en las principales ciudades del país que aquí se presentan se realizaron utilizando como información base el Imeca máximo anual por contaminante, la proporción de días en un año en que se iguala o excede la norma y las tendencias de cambio en el promedio de los Imecas máximos mensuales.

Los valores máximos anuales de cada uno de los contaminantes es una medida directa del posible cumplimiento de las normas oficiales mexicanas respectivas, ya que en éstas la frecuencia que se considera aceptable no debe exceder de una vez al año. En este sentido, el registro de un valor máximo de cualquier contaminante que esté por arriba del valor de la norma (equivalente a 100 puntos Imeca) indicaría que se sobrepasaron los límites descritos. El análisis de las excedencias permite evaluar la magnitud del problema, ya que muestra la frecuencia con la que se sobrepasan los límites marcados en la norma. Por último, la descripción de las tendencias de cambio permite tener una visión de la dinámica temporal de la calidad del aire y, sobre todo, permite evaluar con mayor objetividad la efectividad de las medidas que se toman para controlar el problema de

Figura 5.5. Ciudades con estaciones de monitoreo en México.



Fuente: Semarnat, Dirección General de Calidad del Aire y Registro de Contaminantes. México. 2002.



## Principales contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre la salud

**Ozono (O<sub>3</sub>).** Es un contaminante secundario formado por una compleja serie de reacciones químicas de los contaminantes primarios o precursores (por ejemplo, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) en presencia de oxígeno atmosférico y luz solar. Los principales efectos a la salud están asociados con el daño que ocasiona a las células en las vías respiratorias causando, entre otros problemas, inflamación y reducción de la capacidad del aparato respiratorio tanto para combatir infecciones como para remover las partículas externas, por lo que se incrementa la incidencia de infecciones respiratorias, tos, flemas, atrofia de la mucosa nasal, irritación de ojos, disminución de la función respiratoria y visitas de emergencia por ataques de asma. Otros estudios indican que la exposición al ozono puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar, además de efectos sistémicos en órganos blandos distantes del pulmón, como el hígado. Los efectos observados en seres humanos saludables expuestos a concentraciones urbanas típicas de ozono son un decremento de la capacidad respiratoria, una broncoconstricción moderada y síntomas subjetivos de tos y dolor al inspirar prolongadamente.

Las evidencias de la asociación entre mortalidad y exposición a ozono son más débiles que aquellas para partículas suspendidas (ver siguiente sección). El estimador compuesto, calculado a partir de los resultados de estudios en tres ciudades, una de ellas la ZMVM, indica un aumento en la mortalidad diaria de 0.5% por un aumento de  $10 \mu\text{m}^3$  (0.005 ppm) en la concentración de ozono.

**Partículas en suspensión (menores a 10 y 2.5  $\mu\text{m}$ ).** Las partículas en suspensión comprenden un amplio espectro de sustancias sólidas o líquidas, orgánicas o inorgánicas, dispersas en el aire, procedentes de fuentes naturales y artificiales. Los elementos presentes en las

partículas varían según las fuentes locales pero, en general, los principales componentes son carbono, hidrocarburos, material soluble en agua (como el sulfato de amonio), material insoluble que contiene pequeñas cantidades de hierro, plomo, manganeso y otros elementos, así como material biológico (polen, esporas vegetales, virus y bacterias).

Según su tamaño las partículas se dividen en *gruesas* que incluyen a partículas con diámetro entre 2.5 y 10 micrómetros y *finas*, que tienen tamaños menores a 2.5 micrómetros. Las partículas gruesas, como las que generalmente se levantan del suelo, difícilmente penetran hasta los alveolos pulmonares pues, en su mayoría, son retenidas por las mucosas y cilios de la parte superior del aparato respiratorio. En contraste, partículas provenientes de las quemadas agrícolas forestales, así como las generadas por la combustión de vehículos a gasolina y diesel son en su mayoría partículas finas que sí penetran hasta los alveolos pulmonares.

Las partículas pueden tener efectos tóxicos debido a sus características físicas o químicas inherentes, o bien pueden afectar de manera indirecta al hombre tanto por la interferencia de mecanismos del aparato respiratorio como por actuar como vehículo de una sustancia tóxica absorbida o adherida a su superficie.

El aumento de las concentraciones de las partículas en suspensión se ha relacionado con el aumento de visitas a servicios de urgencias, hospitalizaciones por incremento de los padecimientos respiratorios, bronquitis aguda en niños y muerte prematura, principalmente en menores de edad y personas de la tercera edad.

Estudios de series de tiempo realizados en más de 100 ciudades del mundo, incluida la ciudad de México, han encontrado incrementos de entre 0.5% y 2.6% en las tasas de mortalidad promedio diarias por cada incremento de  $10 \mu\text{m}^3$  en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$ .

## Principales contaminantes atmosféricos y sus efectos sobre la salud (continuación)

Un estimador compuesto calculado a partir de los resultados de los estudios realizados en la ZMVM indica que el incremento en la mortalidad diaria es de 1.4% con un aumento en la concentración de  $PM_{10}$  de  $10\mu\text{m}/\text{m}^3$ .

**Monóxido de carbono (CO).** Es un gas incoloro, inodoro e insípido, ligeramente menos denso que el aire. En la naturaleza se genera CO en la producción y degradación de la clorofila, mientras que su origen antropogénico se sitúa en las combustiones incompletas, por lo que es emitido casi en su totalidad (98%) por fuentes móviles (principalmente vehículos particulares). Dado que la afinidad de la hemoglobina por el CO es unas 250 veces mayor que por el oxígeno, el monóxido de carbono se combina con la hemoglobina en los glóbulos rojos de la sangre y forma carboxihemoglobina (COHb) que disminuye la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, además de interferir en su liberación en los tejidos, por lo que produce hipoxia y alteraciones del funcionamiento celular en las neuronas, en las células del corazón y en las de otros músculos. La exposición crónica a CO induce la aparición de fenómenos de aclimatación como el aumento del número de glóbulos rojos, del volumen sanguíneo y el tamaño del corazón.

**Bióxido de azufre ( $SO_2$ ).** Es un gas incoloro que en altas concentraciones puede ser detectado por su sabor y por su olor cáustico e irritante. Se disuelve con facilidad en el agua para formar ácido sulfuroso ( $H_2SO_3$ ), el cual se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con el oxígeno del aire. El  $SO_2$  también puede formar trióxido de azufre ( $SO_3$ ), vapor muy reactivo que se combina rápidamente con vapor de agua para formar un aerosol ultra fino de ácido sulfúrico, de gran importancia desde el punto de vista de efectos en la salud. En altas concentraciones en individuos normales y más bajas en individuos asmáticos, puede producir broncoconstricción.

**Bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ).** Junto con el óxido nítrico (NO) se produce de forma natural en cantidades muy superiores a las generadas por la actividad humana. La mayoría de las combustiones liberan óxido nítrico, el cual se convierte fácilmente en bióxido de nitrógeno en la atmósfera. La oxidación del NO a  $NO_2$  por oxidantes atmosféricos como el ozono ocurre rápidamente, siendo una de las principales rutas de producción de  $NO_2$ . El bióxido de nitrógeno es un contaminante del aire en ambientes interiores, debido al tabaco y a fuentes de combustión de gas inadecuadas o mal ventiladas.

**Compuestos orgánicos volátiles (COV).** Estos compuestos son motivo de preocupación tanto por su papel como precursores de ozono y otros oxidantes, como por la alta toxicidad de algunos de ellos. Debido a su gran variedad, no se conocen completamente sus efectos, sin embargo, para algunos de ellos, como el benceno, se ha reconocido su papel cancerígeno. Cuando las personas se exponen por periodos largos a concentraciones altas de benceno pueden sufrir edemas y hemorragias bronquio alveolares. Los efectos cardiovasculares producto de los mismos se expresan como extrasístoles o taquicardia ventricular. Los efectos gastrointestinales dependen de la dosis ingerida, pero pueden producir desde gastritis tóxica hasta estenosis pilórica. De los efectos a la salud producidos por los COV, los hematológicos son los más ampliamente documentados, dado que los componentes celulares de la sangre son muy susceptibles a estas sustancias produciendo pancitopenia, anemia aplásica y leucemia.

**Fuentes:** PNUMA. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO-3*. Grupo Mundi-Prensa. España. 2002.

Aránguez, E., J. M. Ordóñez, J. Serrano, N. Aragonés, R. Fernández-Petier, A. Gandarillas e I. Galán. Contaminantes Atmosféricos y su Vigilancia. *Revista Española Salud Pública*. España. 1999.

Instituto Nacional de Salud Pública, Centro Colaborador de Salud Ambiental, [www.insp.mx](http://www.insp.mx).

INE. Dirección de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2003.



la contaminación del aire. En el presente trabajo se utilizaron los promedios de los máximos mensuales para describir la dinámica temporal, debido a que permiten tener una idea de los cambios en la calidad del aire en sus valores más críticos.

El problema de la contaminación del aire es importante en todas las ciudades que se reportan (Figura 5.6). De 1994 a la fecha todas presentan valores máximos anuales de Imeca superiores a 100 (límite de la norma). La ZMVM y la ZMG son las que consistentemente mantienen los valores más altos, aunque en esta última han disminuido significativamente de 1999 a la fecha, manteniéndose por debajo de los 200 puntos Imeca. También resalta el caso de la ciudad de Mexicali, que fue la que mostró el mayor incremento en los valores máximos de Imeca, al pasar de 189 en 1997 a casi 400 en 1999, debido a la alta concentración de partículas ( $PM_{10}$ ); desafortunadamente no se cuenta con registros actualizados que permitan conocer la calidad del aire en esta ciudad al día de hoy (Cuadros III.I.I.9, III.I.I.10, III.I.I.11, III.I.I.12 y III.I.I.13).

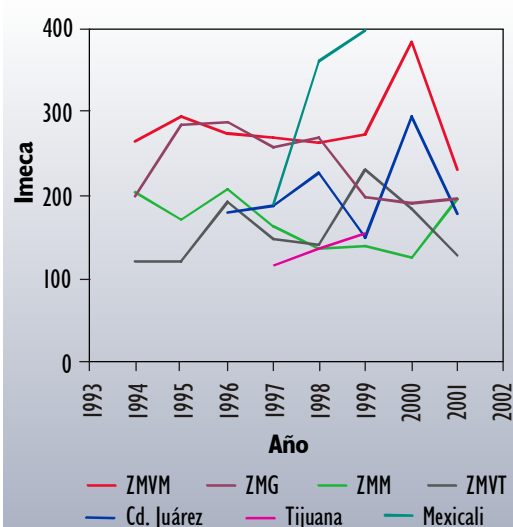
En cuanto al número de días en que se rebasan las normas de calidad del aire, es evidente que el problema en

la ZMVM continúa siendo grave: no han disminuido del 80% de 1988 a la fecha, aunque cabe señalar que se observa una ligera tendencia a reducirse en los últimos años, ya que pasó de un 95% en 1994 a un promedio de 85% en los últimos tres años. En la ZMG, aunque aún tiene una alta frecuencia de días en que se rebasó la norma, es claro que ha experimentado una disminución importante: en 1994 se tuvieron 270 días (74%) y bajó a menos del 40% en promedio de 1999 a 2001. En la ZMM la situación es menos severa, sin embargo, en los últimos años tuvo un incremento en la proporción de días en que se excedió la norma, alcanzando un 27% en 2001, valor muy semejante a los registrados a principios de los noventa y muy por encima de los registrados entre 1995 y 1998, cuando no se superó el 20%. Las ciudades fronterizas de Mexicali y Tijuana mostraron un incremento durante el periodo de 1997-1999, sobre todo en Mexicali, donde el último registro con que se cuenta alcanzó un valor superior al 30% de días con excedencia. La ZMVT mostró un incremento en los días que se rebasó la norma durante el periodo de 1995-1998, pero ha disminuido consistentemente desde entonces a valores cercanos al 10% en los últimos años (Figura 5.7).

Si se examinan los valores promedio (Figura 5.8), resulta evidente que la ZMVM es la que registra mayores niveles de contaminación, sin embargo, éstos muestran una clara tendencia a la baja a partir de 1990. La ZMG también presenta una reducción consistente de 1994 a la fecha, incluso registrando valores promedio inferiores a 100 puntos Imeca en los últimos tres años. Las demás ciudades actualmente muestran valores promedio inferiores a los 100 puntos Imeca.

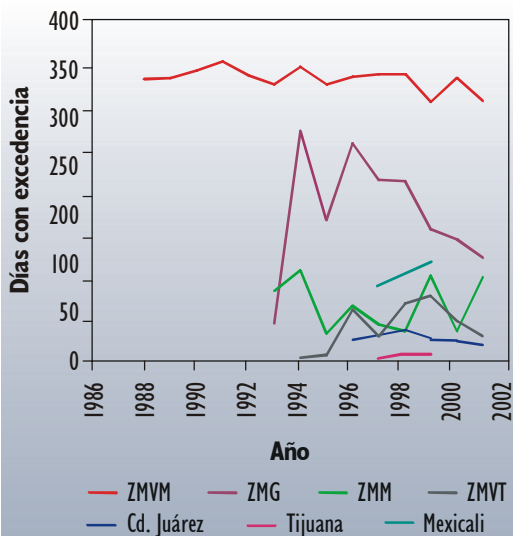
Los dos principales contaminantes a nivel nacional son el  $O_3$  (Figura 5.9) y las partículas (Figura 5.10), ya que todas las ciudades rebasaron al menos una vez al año las concentraciones máximas permitidas. El  $O_3$  es el principal problema en la ZMVM: el porcentaje de días iguales o mayores a la norma aún es superior al 60%, aunque ya es considerablemente más bajo si se compara con los registrados en el periodo de 1990 a 1994, cuando se mantuvieron por arriba del 85%, llegando en su momento más alto a cerca de 97% en 1991. La ZMG ha disminuido las excedencias de  $O_3$  de cerca del 60% en 1996 a menos del 20% en promedio de

**Figura 5.6. Imeca máximo anual en algunas de las principales ciudades, 1994-2001.**



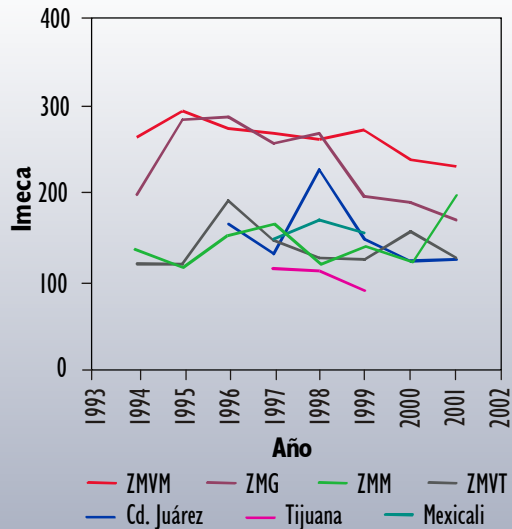
Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México, 2002.

**Figura 5.7. Días con excedencia de algún contaminante en algunas de las principales ciudades, 1988-2001.**



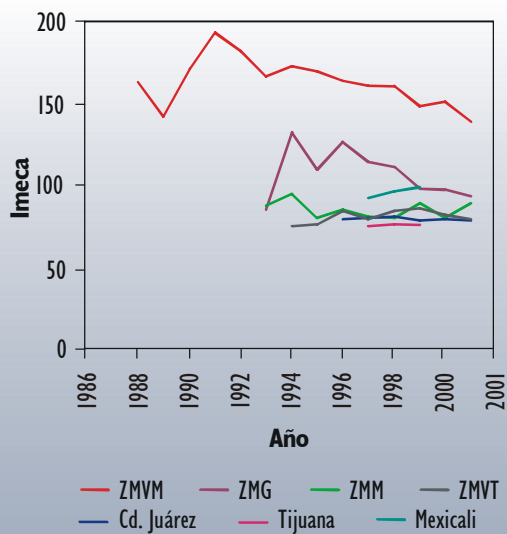
Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

**Figura 5.9. Imeca máximo anual de ozono (O<sub>3</sub>) en algunas de las principales ciudades, 1994-2001.**



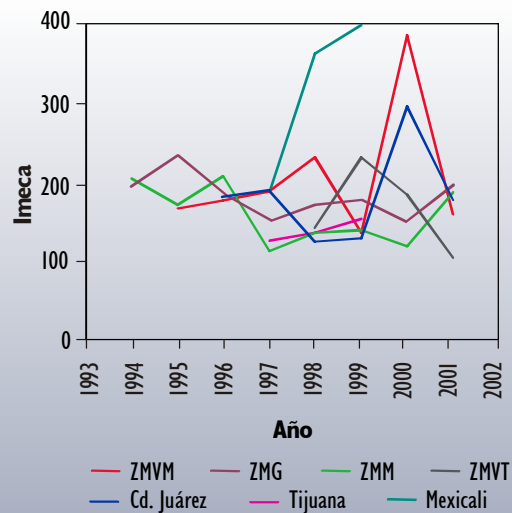
Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

**Figura 5.8. Imeca máximo promedio en algunas de las principales ciudades, 1988-2001.**



Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

**Figura 5.10. Imeca máximo anual de partículas menores a 10µm (PM<sub>10</sub>) en algunas de las principales ciudades, 1994-2001.**

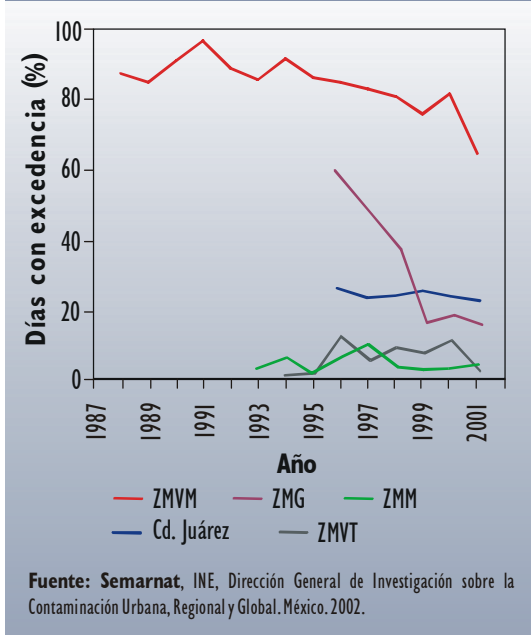


Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

1999 a la fecha. Las demás ciudades mantienen valores inferiores al 10% de días en que se iguala o excede la norma de ozono en los últimos cinco años (Figura 5.11).

En el caso de las PM<sub>10</sub>, la ZMVM ya no es la que registra con más frecuencia días con valores iguales o mayores a la norma, ya que se ha reducido su ocurrencia de cerca del

**Figura 5.11. Días con excedencias en ozono (O<sub>3</sub>) en algunas de las principales ciudades, 1988-2001.**

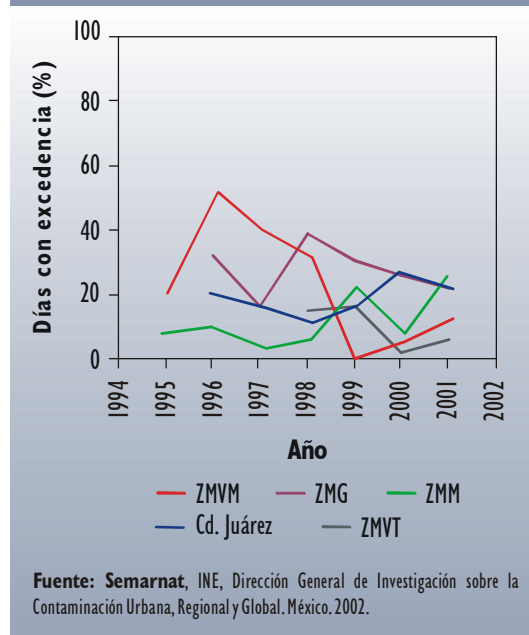


50% en 1996 a menos del 12% en los últimos tres años, en contraste con las zonas metropolitanas de Guadalajara y Monterrey, que superaron el 20% en el año 2001. La ZMM muestra la tendencia más preocupante, ya que tiene un crecimiento de los días con excedencia de PM<sub>10</sub> más o menos sostenido de 1997 a la fecha (Figura 5.12). De hecho, esta zona es la que emite más partículas a la atmósfera de acuerdo con los datos del inventario de emisiones realizado en 1995.

La contaminación por CO parece estar bajo control, a pesar de los valores tan altos de emisión (véase «Inventario de emisiones»), ya que en 2001 prácticamente todas las ciudades estuvieron por debajo del valor de 100 puntos Imeca (Figura 5.13). El SO<sub>2</sub> que se había mantenido por debajo de los 100 puntos Imeca en la mayoría de las ciudades y también parecía controlado —debido en gran parte a la mejora de los combustibles que suministra Pemex—, en los dos últimos años mostró un repunte en las concentraciones en la ZMVM y la ZMG, de tal forma que se registraron días en los que se rebasó con mucho el valor de la norma (Figura 5.14, Cuadro III.1.1.11).

El problema de la contaminación por NO<sub>2</sub> ha disminuido de manera importante y constante en la ZMVM desde 1996,

**Figura 5.12. Días con excedencia en partículas menores a 10µm (PM<sub>10</sub>) en algunas de las principales ciudades, 1995-2001.**

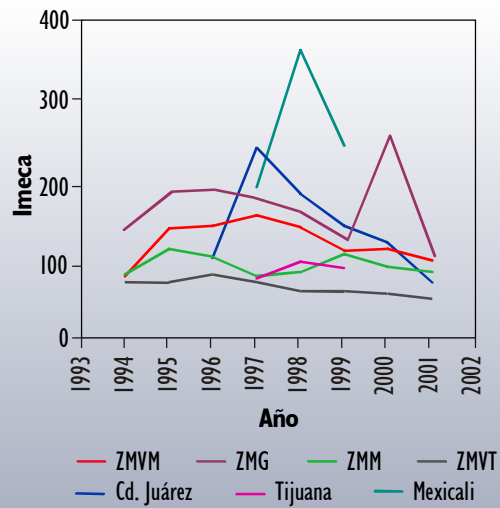


aunque en los últimos años aún se han presentado días donde la concentración iguala o excede la norma. Caso contrario a lo que se observa en la ZMG, donde los valores han aumentado con respecto a los registrados antes de 1997.

En algunas otras ciudades se han registrado monitoreos de los principales contaminantes (Cuadro III.1.1.3) pero, debido a problemas en su operación, no se cuenta con datos suficientes para una evaluación completa.

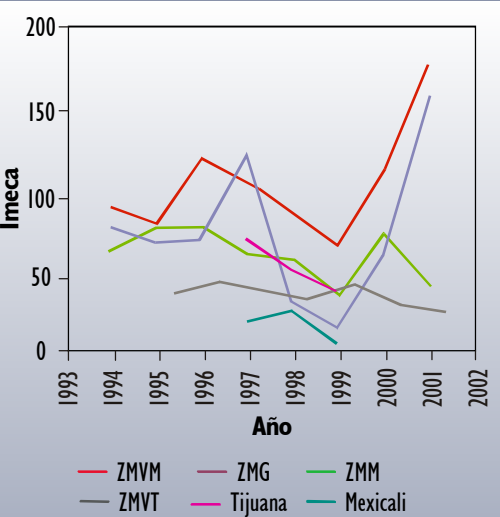
Otra forma de examinar la calidad del aire es por medio de la distribución de los días con una calidad de aire determinada (Cuadro III.1.1.14). En la ZMVM es notoria la disminución en el número de días con valores de Imeca iguales o mayores a 200, reduciéndose de 162 días en 1991, que fue un año muy crítico en términos de la calidad del aire, a sólo 15 en el año 2001. La frecuencia de días extremadamente contaminados, con valores de Imeca superiores a 300, es muy baja en la actualidad, de hecho sólo se ha registrado un día desde el año de 1994 (en enero del año 2000), el cual fue motivado por una alta concentración de partículas restringida a la zona de Tláhuac, por lo que sólo en dicha zona se aplicó el plan de contingencia. Si se toma como referencia el comportamiento de los días

**Figura 5.13. Imeca máximo anual de monóxido de carbono (CO) en algunas de las principales ciudades, 1994-2001.**



Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

**Figura 5.14. Imeca máximo anual de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en algunas de las principales ciudades, 1994-2001.**



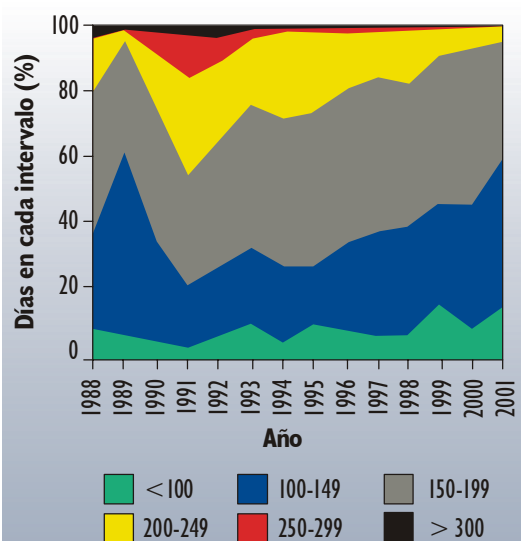
Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

que presentan calidad satisfactoria (valores de Imeca inferiores a 100), éstos se han ido incrementando lentamente en los últimos años, alcanzando una frecuencia del 16% en 2001, valor muy superior al 4% de 1991. La calidad del aire

en los últimos años ha tendido a pasar de mala a regular, presentando valores de Imeca comprendidos en el intervalo de 101 a 150.

En 1991 la mayor frecuencia de días estaba en la categoría de mala (151-200 Imeca) o muy mala (mayores a 200) (38 y 29% respectivamente), mientras que en 2001 los días con calidad regular (Imeca entre 101 y 150) fueron los más frecuentes (44%) (Figura 5.15). En la ZMG también se muestra un claro aumento de la frecuencia de días con calidad satisfactoria, pasando de sólo 95 en 1994 (26%) a más del 61% en promedio entre 1999 y 2001 (Figura 5.16). De hecho, en este último periodo (1999-2001) únicamente se han presentado dos días con valores de Imeca superiores a los 200 puntos. Aunque la ZMM aún mantiene una elevada frecuencia de días con calidad satisfactoria (79% en promedio en el periodo 1999-2001), éstos han disminuido con respecto a los tres años anteriores (1996-1998), cuando se tenían valores de 87% en promedio (Figura 5.17). En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca la frecuencia de días con calidad satisfactoria muestra una tendencia a aumentar en los dos últimos años, alcanzando frecuencias superiores al 90% en el año 2001.

**Figura 5.15. Comportamiento del Imeca durante el periodo 1988-2001 en la ZMVM.**

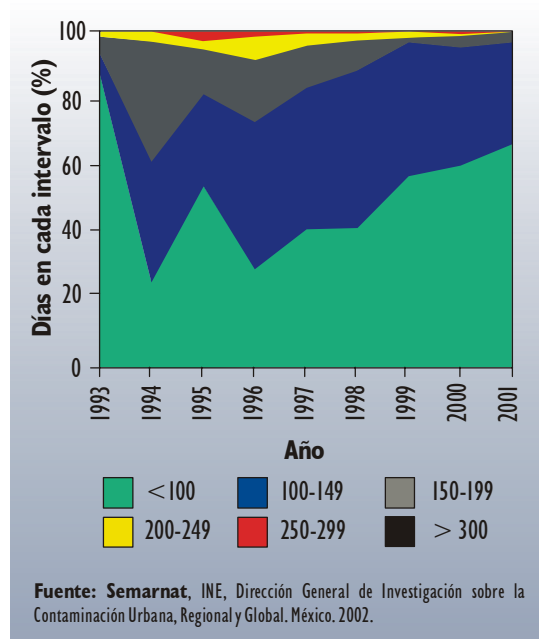


Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

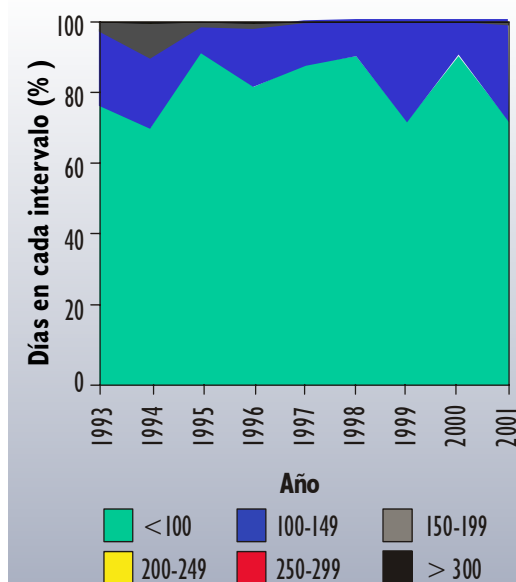
Al examinar las tendencias de los principales contaminantes, se puede concluir que la calidad del aire en las principales ciudades, incluida la ZMVM donde el problema de la contaminación continúa siendo grave, ha mejorado en la última década gracias a las acciones tomadas tanto a nivel federal como local. Debido a que el transporte es la principal fuente de emisiones, la mejora en la calidad de las gasolinas, en particular la eliminación del plomo con la desaparición del mercado de la gasolina Nova en agosto de 1997, la reducción significativa del azufre en el diesel industrial y vehicular, así como la adopción de tecnologías vehiculares modernas, han contribuido a que el plomo ya no sea un problema de contaminación en el aire y que los niveles de SO<sub>2</sub> y de CO raramente sobrepasen el valor de la norma. Por otra parte, las acciones tomadas a nivel local, como la reforestación y pavimentación, los apoyos para la renovación del parque vehicular y mayor control sobre la emisión de fuentes fijas también han sido importantes.

El gobierno federal ha puesto particular atención a los problemas de contaminación atmosférica en zonas urbanas mediante la elaboración —coordinada con autoridades estatales y municipales y con la participación del sector académico— de programas conocidos como Proaires, que

**Figura 5.16. Comportamiento del Imeca durante el periodo 1993-2001 en la ZMG.**



**Figura 5.17. Comportamiento del Imeca durante el periodo 1993-2001 en la ZMM.**



tienen como objetivo principal mejorar la calidad del aire; estos programas ya operan en las ciudades de México, Monterrey, Guadalajara, Toluca, Ciudad Juárez, Mexicali y Tijuana. Su elaboración tuvo como pilar básico la información de la calidad del aire y de las fuentes de emisiones.

Los Proaires incorporan una visión de mediano y largo plazos que busca revertir, en primera instancia, el deterioro de la calidad del aire y luego mantenerla dentro de las normas. Las acciones contenidas 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 (véase **Programas de gestión de la calidad del aire en las principales ciudades de México**).

### Cambio climático y efecto invernadero

El clima y la temperatura media de la superficie de la Tierra dependen del balance entre la energía solar que recibe el planeta y la energía (radiación infrarroja) que éste emite. La atmósfera que lo envuelve está constituida de manera

## Programas de gestión de la calidad del aire en las principales ciudades de México

**Proaire (Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 1995-2000).** El objetivo principal fue alcanzar menores niveles de contaminación y reducir el número de contingencias anuales como resultado del abatimiento del 50% de las emisiones de hidrocarburos, 40% de óxidos de nitrógeno y 45% de partículas suspendidas de origen antropogénico, así como reducir en 75% la probabilidad de ocurrencia de contingencias. Está formado por 94 acciones y proyectos concretos. Entre las principales estrategias incluye una nueva normatividad de óxidos de nitrógeno y COV; normas de calidad más estrictas para combustibles industriales y de servicios; utilización del Hoy No Circula y Doble No Circula; revisión progresiva de la normatividad para gasolinas; reestructuración y ampliación del transporte público de superficie; vigilancia e información epidemiológica; sistemas de vigilancia vial, industrial y de servicios y del parque vehicular; promoción de la diversificación del uso de suelo, reciclaje urbano, protección de zonas de conservación ecológica y la revitalización de las áreas centrales; recuperación lacustre, reforestación y restauración ecológica en zonas suburbanas.

Recientemente se presentó el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010, que tiene como objetivo principal reducir el número de contingencias anuales y reducir los niveles de los contaminantes criterio. Está formado por 89 medidas que involucran al transporte, servicios, recursos naturales y educación ambiental entre otros temas.

**Aire Limpio (Programa para el Valle de Toluca 1997-2000).** Se dio a conocer el 10 de junio de 1997. El objetivo principal del programa es proteger la salud de la población de la ZMVT mediante la reducción de las emisiones de contaminantes a la atmósfera y la coordinación de las políticas de desarrollo urbano e industrial, fomento económico, transporte, medio ambiente y manejo de recursos. Está formado por seis subprogramas integrados por 45 proyectos, con 185

acciones específicas. Su meta principal es el abatimiento del 40% de las emisiones de hidrocarburos, 50% de óxidos de nitrógeno y 40% de las partículas para el año 2000, para reducir de un 15 a un 10% el número de días en que se exceden las normas de la calidad del aire. Entre las principales medidas que incluye el programa se encuentran: la actualización del programa de verificación vehicular adoptando los límites establecidos en la NOM-041-ECOL-1997; modernización del transporte público; eliminación de las gasolinas con plomo y proveer gasolinas con características similares a las establecidas en la NOM-086-ECOL-1994; uso de combustibles menos contaminantes en la industria; ordenamiento ecológico en la ZMVT y su zona de influencia; cumplimiento por parte de industrias, comercios y servicios de la norma NOM-085-ECOL-1994, relacionada con los niveles máximos permisibles para humos, partículas suspendidas totales, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno; mejorar la vialidad en la ZMVT; autorregulación y auditoría ambiental; control de emisiones en ladrilleras y hornos de alfarería; recuperación de vapores en estaciones de servicio; fomentar los programas de recuperación de suelos y reforestación de áreas erosionadas; establecer un programa de verificación vehicular obligatorio y eficiente.

**Programa para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMG 1997-2001.** Se dio a conocer el 2 de abril de 1997. Incorpora 32 medidas con las cuales se estima que el porcentaje de días con problemas de la calidad del aire pasará de un 70% a alrededor del 50% y el valor promedio del Imeca de 125 a 105 puntos para el año 2001. Se estima que dejarán de emitirse cerca del 50% de las emisiones de partículas y de los óxidos de nitrógeno, y alrededor del 25% las emisiones de hidrocarburos. Entre las principales medidas que incluye el programa se encuentran: la revisión y actualización del programa de contingencias ambientales; establecer convenios con la industria para reducir las emisiones de precursores de ozono; introducción de combustibles más limpios para uso industrial y vehicular; ampliar y modernizar el programa de afinación controlada aplicando la normatividad;



## Programas de gestión de la calidad del aire en las principales ciudades de México (continuación)

limitar el asentamiento de nuevas industrias altamente contaminantes; control de emisiones de partículas y bióxido de azufre en industrias; recuperación de vapores en terminales de recibo y distribución de combustibles y gasolina; promover el reordenamiento y renovación del transporte colectivo con unidades de baja emisión de contaminantes; uso de gas natural por camiones de carga y transporte público de pasajeros; mejorar la vialidad en la ZMG; intensificar programas de pavimentación de calles y avenidas para reducir emisiones de partículas; fortalecer el sistema de vigilancia epidemiológica; reforzar la red de monitoreo atmosférico; programas para la formación y capacitación en cultura ecológica; establecer programas de reforestación de la ZMG y su área ecológica de influencia.

### **PACADAMM (Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 1997-2000).**

Se dio a conocer el 18 de marzo de 1997. El objetivo principal del programa es proteger la salud de los habitantes del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) mediante acciones específicas que prevengan y controlen la contaminación del aire, tanto por agentes químicos como físicos. Incorpora 31 medidas con las cuales pretende alcanzar, como meta principal, la reducción del 10% de las emisiones de hidrocarburos, más del 30% de las de partículas y de las de óxidos de nitrógeno con lo que se estima que el porcentaje de días en que se rebasa alguna norma de calidad del aire bajará de un 18% a alrededor del 10%. Entre las principales medidas incluye: la realización de estudios de evaluación e investigación del problema de la contaminación del aire y por ruido; establecer convenios de cooperación y apoyo financiero con países e instituciones internacionales; promover el uso de gas natural por camiones de carga y transporte público de pasajeros; establecer mecanismos de agilización de tráfico vehicular; promover la ampliación de la red del metro; diseñar e instrumentar el programa de contingencias ambientales; desarrollar reglamentación

específica relacionada con la contaminación atmosférica y por ruido; establecer un sistema de información geográfica referenciado del estado; promover la utilización de combustibles limpios; aumentar la inspección y vigilancia de emisiones industriales y vehiculares a la atmósfera, principalmente de precursores del ozono; establecer convenios con industrias altamente contaminantes en partículas y bióxido de azufre; incorporar la medición de ruido en el programa de inspección y vigilancia a establecimientos industriales; modernizar y reforzar el programa de verificación vehicular y de reducción de emisiones de partículas; establecer una política de autorregulación con el sector industrial; diseñar e instrumentar una campaña de abatimiento de emisión de partículas por erosión del viento.

### **Programa de Gestión de la Calidad del Aire de Ciudad Juárez 1998-2002.**

Se dio a conocer en 1997. Incorpora 40 medidas con las cuales se pretende, a mediano plazo, disminuir la contaminación de la ciudad hasta cumplirse las normas de calidad del aire. Determina responsabilidades tanto de los gobiernos norteamericanos (EPA), estatales de Texas (TNRCC) y Nuevo México (NMED) y locales (condados de El Paso y Doña Ana) y, por la parte mexicana, a nivel federal (Semarnat), el gobierno del estado de Chihuahua y el municipio de Juárez. Entre las principales estrategias del programa se encuentran: programa de verificación vehicular, mejora de la red vehicular y tráfico vial; establecimiento de una red de monitoreo ambiental; programa de industria limpia mediante auditorías ambientales, proyecto piloto de aplicación del sistema integrado de regulación directa y gestión ambiental de la industria para la formulación de políticas ambientales, reducción de emisiones de partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono; promover actividades de soporte, como son las investigaciones científicas y tecnológicas de medidas de control; entrenamiento, capacitación y educación ambiental.

## Programas de gestión de la calidad del aire en las principales ciudades de México (continuación)

**Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Tijuana-Rosarito 2000-2005.** El objetivo principal del programa es señalar acciones encaminadas a proteger la salud de la población y a prevenir y controlar la contaminación del aire generada por fuentes emisoras. La meta general del programa es reducir gradualmente las emisiones generadas hasta conseguir el cumplimiento de las normas de calidad del aire, en un horizonte de aplicación de 2000 a 2005. Plantea cinco áreas de trabajo con acciones específicas, entre ellas: la regulación de emisiones a empresas altamente contaminantes, establecer un programa de empadronamiento y terminales de almacenamiento para la recuperación de vapores; inspección y vigilancia de establecimientos industriales y de servicios; establecer un programa de verificación vehicular; alternativas para el transporte masivo y renovación del parque vehicular; impulsar el cambio de combustible con la Comisión Federal de Electricidad; convenir con Pemex el suministro de gasolina oxigenada; crear programas de reforestación municipal y de pavimentación; operación local de la red de monitoreo atmosférico; revisar de manera periódica el inventario de emisiones; crear un programa de vigilancia epidemiológica asociada a la contaminación; reforzar las acciones del programa Frontera XXI; elaborar programas de concientización y educación ambiental.

**Programa para Mejorar la Calidad del Aire en Mexicali 2000-2005.** Entre sus objetivos están: la reducción de emisiones contaminantes por kilómetro recorrido en vehículos automotores; reducir las emisiones provenientes de las industrias y reducción de partículas en calles no pavimentadas. Plantea cinco áreas de trabajo con acciones específicas, entre ellas reducir las emisiones por parte de las industrias, instalando equipos de control y reingeniería de procesos; recuperación de vapores en terminales de almacenamiento y estaciones de servicio de combustibles; crear un programa de reducción de COV; auditorías ambientales; registro de emisiones y transferencia de contaminantes; utilización de gasolina oxigenada y de baja presión de vapor Reid; programa de verificación vehicular; aplicación de estabilizadores de suelo para controlar emisiones de partículas; establecimiento de una red de monitoreo atmosférico; mejoras al transporte público; diseño de programas de forestación y preservación de zonas arboladas; revisar y actualizar periódicamente el inventario de emisiones y el Proaire; reforzar las acciones del programa Frontera XXI y programas binacionales.

Fuente: INE-Cenica. Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en ciudades mexicanas. México, 2000.

natural por nitrógeno, oxígeno y argón, principalmente, pero también tiene otros gases en más bajas concentraciones (por ejemplo, bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua, ozono ( $\text{O}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )), que se conocen como «gases de efecto invernadero»<sup>1</sup>. Estos gases dejan pasar la radiación solar a través de la atmósfera casi sin obstáculo, pero absorben la radiación infrarroja que emite la superficie de la Tierra e, incluso, irradian nuevamente una parte hacia ella, produciendo un efecto neto de calentamiento, de manera similar a lo que ocurre en los invernaderos (Recuadro III.1.2.1). Este efecto mantiene la temperatura de la superficie del planeta más caliente de lo que sería sin su

existencia y es responsable, en mucho, de la vida en la Tierra. A pesar de que existen varios factores que pueden afectar el clima (véase *¿Qué motiva el cambio en el clima?*) y que existe una variabilidad natural bien documentada, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) concluyó en su informe de 2001 que hay evidencias sólidas de que el calentamiento observado durante los últimos 50 años es atribuible a las actividades humanas (IPCC, 2001);

<sup>1</sup> Un gas de efecto invernadero es cualquier molécula que absorbe radiación en el intervalo de 8-14 mm de longitud de onda.

**Tabla 5.1. Resumen de evidencias de la ocurrencia del cambio climático global.**

Indicador	Evidencia
<b>Concentración de contaminantes</b>	
CO <sub>2</sub> atmosférico	280 ppm en el periodo 1000-1750, para el año 2000 es de 368 ppm (incremento 31 ± 4%).
CH <sub>4</sub> atmosférico	700 ppb en el periodo 1000-1750, para el año 2000 es de 1750 ppb (incremento 151 ± 25%).
N <sub>2</sub> O atmosférico	270 ppb en el periodo 1000-1750, para el año 2000 es de 316 ppb (incremento 17 ± 5%).
Ozono troposférico	Incremento del 35 ± 5% del año 1750 al 2000.
Ozono estratosférico	Disminución del año de 1970 al 2000; varía con la altitud y la latitud.
HCFC, PFCs y SF <sub>6</sub>	Incrementos globales en los últimos 50 años.
<b>Indicadores del clima</b>	
Temperatura superficial media	Incremento de 0.6 ± 0.2°C en el siglo XX. La superficie terrestre se ha calentado más que los océanos.
Temperatura superficial en el hemisferio norte	Se incrementó en el siglo XX más que en cualquier otro siglo en los últimos 1000 años. La década de 1990 fue la más caliente del siglo y posiblemente del milenio*.
Precipitación continental	Incremento del 5-10% en el último siglo en el hemisferio norte, aunque disminuyó en algunas regiones como África y partes del Mediterráneo*.
Eventos de lluvia extremos	Incremento en latitudes medias y altas del norte*.
Frecuencia y severidad de sequías	Se ha observado una mayor incidencia en regiones de África y Asia*.
<b>Indicadores biológicos y físicos</b>	
Nivel del mar	Se ha incrementado a una tasa de 1 a 2 mm por año durante el último siglo.
Duración de la cobertura de hielo en ríos y lagos	Disminución de una a dos semanas en altitudes medias y altas del hemisferio norte*.
Espesor y extensión de los hielos del Ártico	Disminución de 40% del espesor del 10 al 15% de su área.
Cobertura de nieve	Disminución de 10% de acuerdo con imágenes de satélite*.
Eventos de El Niño	Son más frecuentes, persistentes e intensos durante los últimos 30 años en comparación con los 100 años previos.
Blanqueamiento del coral	Incremento en su frecuencia de ocurrencia, principalmente durante los eventos de El Niño.
Migración, reproducción y distribución de especies	Migración a latitudes o altitudes mayores de insectos, aves y peces. Cambios en la temporada de reproducción.
* Las evidencias no son tan claras. HCFC: hidroclorofluorocarbonos; PFC: perfluorocarbonos	
<b>Fuente:</b> IPCC. <i>Climate change 2001: synthesis report</i> . IPCC. 2001.	

en el mismo documento se presentan y documentan las evidencias del cambio climático registrado (Tabla 5.1), siendo quizá las más notables el calentamiento de la superficie terrestre de aproximadamente 0.6°C durante el último siglo y el aumento del nivel del mar de entre 10 y 20 centímetros. Como muestra de lo anterior está el hecho de que 1998 fue el año más caliente de los registrados hasta la fecha y la década de los noventa se considera como la más caliente en el siglo XX y posiblemente del milenio (IPCC, 2001).

A partir del siglo XVIII, la concentración de CO<sub>2</sub> ha aumentado de manera constante debido principalmente a la quema de combustibles fósiles (Figura 5.18). La quema de biomasa (principalmente la asociada a la deforestación),

las emisiones derivadas de la producción de cemento y del cambio de uso del suelo también han contribuido significativamente a su incremento (PNUMA, 2002). La acumulación de este gas en la atmósfera se debe a que los sumideros naturales (por ejemplo, la absorción por la vegetación y su disolución en el agua) no son capaces de capturar su creciente emisión.

Además del CO<sub>2</sub>, otros gases que inducen el calentamiento de la Tierra, debido a su contribución al efecto invernadero, también han aumentado su concentración significativamente en los últimos años (Tabla 5.2). En términos generales, se ha estimado que el CO<sub>2</sub> es responsable de aproximadamente el 60% del efecto invernadero acumulado desde el siglo XVIII,

## ¿Qué motiva el cambio en el clima?

De la energía del sol que alcanza la atmósfera de la Tierra, parte es reflejada al espacio por nubes y aerosoles, parte es absorbida selectivamente por gases de la atmósfera y el resto alcanza la superficie del planeta, donde una fracción es absorbida y otra reflejada. La energía absorbida es posteriormente redistribuida por la circulación de la atmósfera y de los océanos y, eventualmente, es regresada al espacio en forma de radiación de longitud de onda larga (infrarrojo). La superficie de la Tierra y la parte baja de la atmósfera se calientan a una temperatura tal que la radiación infrarroja que se emite es prácticamente igual a la energía solar que se absorbe. De esta forma, cualquier factor que afecte ya sea la radiación recibida, la que se emite o, incluso, que altere la redistribución de la energía en la atmósfera y entre ésta y la Tierra o los océanos, puede afectar el clima.

Los gases de efecto invernadero tienen la propiedad de ser prácticamente transparentes a la radiación que proviene del Sol, pero absorben la radiación infrarroja. Estos gases reducen la eficiencia con que la Tierra emite radiación infrarroja (calor), produciendo un calentamiento en la parte baja de la atmósfera y la superficie del planeta. Este fenómeno se conoce como efecto invernadero y ha operado por millones de años debido a la presencia de gases como el bióxido de carbono, ozono, metano y el vapor de agua que, de manera natural, se encuentran en la atmósfera. De hecho, este efecto es responsable en gran parte de la vida en la Tierra, ya que ha permitido que la temperatura sea significativamente superior a lo que sería sin la presencia del efecto invernadero y que las oscilaciones térmicas entre el día y la noche sean menos severas. Sin embargo, cuando la cantidad de gases de efecto invernadero se incrementa en la atmósfera, se tiende a un balance positivo de la energía ya que aumenta la cantidad de radiación absorbida y, por consiguiente, la temperatura de la superficie de la Tierra.

No obstante, es incorrecto atribuirle el cambio del clima únicamente a la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ya que existen otros factores y procesos que también influyen en el clima de manera local o regional. Por ejemplo, los aerosoles, que son partículas microscópicas o gotas suspendidas en el aire (como las producidas por la quema de combustibles fósiles y de biomasa) si son de colores claros pueden reflejar la radiación que proviene del sol produciendo un efecto de enfriamiento, aunque si son de color oscuro, como las partículas de hollín, absorben la radiación e inducirían un calentamiento. Las erupciones volcánicas también pueden modificar el clima de forma importante durante periodos cortos, ya que incorporan grandes concentraciones de gases con azufre (principalmente  $\text{SO}_2$ ) a la estratósfera, que son transformados en aerosoles de sulfatos que reflejan la radiación y producen un enfriamiento a corto plazo.

Otra causa de variabilidad climática está relacionada con las oscilaciones en la cantidad de radiación que emite el Sol hacia la Tierra. La más conocida es la que tiene un periodo aproximado de 11 años, pero las más importantes se presentan con ciclos de miles de años y son la causa de cambios muy profundos en el clima. Estos ciclos están asociados a variaciones en la órbita terrestre<sup>1</sup> que modifican la cantidad de radiación que recibe un sitio, siendo el resultado más evidente de estas variaciones las glaciaciones que se presentaron recurrentemente en la Tierra durante el Pleistoceno.

Otro fenómeno muy ilustrativo de la variabilidad climática del planeta es el conocido como El Niño<sup>2</sup>, éste es un fenómeno más o menos cíclico que ocurre en

<sup>1</sup> Esta idea fue planteada en 1930 por el matemático Milutin Milankovitch para explicar la ocurrencia de la Edad del Hielo y las glaciaciones y fue demostrada hasta después de 1970 cuando se examinaron depósitos de foraminíferos en el fondo del mar.

<sup>2</sup> El Niño forma parte de un fenómeno más grande conocido como ENSO (El Niño Southern Oscillation) el cual incluye también al fenómeno conocido como La Niña.

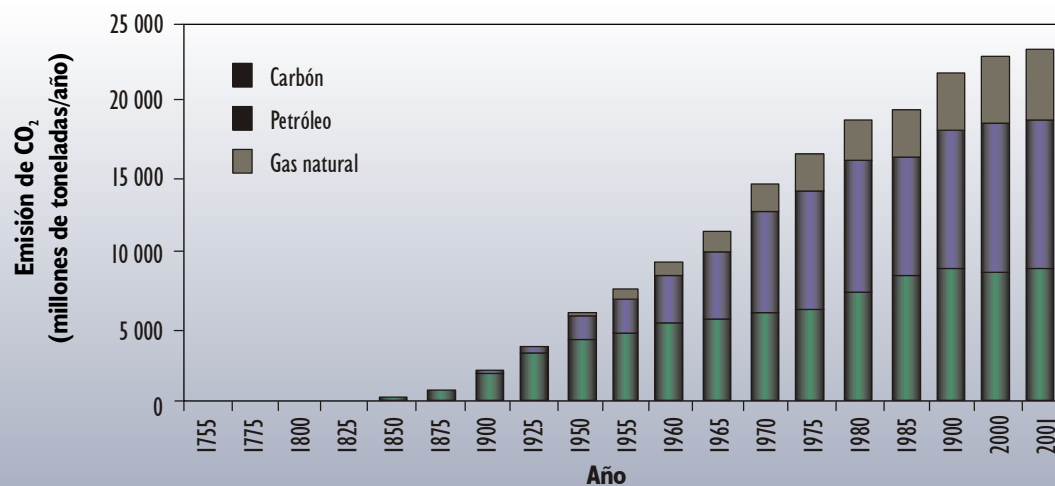
## ¿Qué motiva el cambio en el clima? (continuación)

un periodo que va de tres a siete años. El Niño es resultado de una interacción compleja entre la atmósfera y el océano (en el Pacífico tropical); durante este evento una masa de agua cálida se desplaza de su posición habitual en el oeste hacia las costas del continente americano, ocasionando un incremento en las lluvias en Perú y sequías en los bosques tropicales de Indonesia.

Debido a la diversidad de factores que pueden inducir cambios en el clima, e incluso, a lo complejo que son las interacciones en el mismo sistema climático, es importante que cualquier cambio presuntamente inducido por el hombre se sitúe en el contexto de la variación climática natural y que se identifiquen las señales inequívocas del factor antropogénico.

Fuente: IPCC. Climate change 2001. Technical summary. IPCC. 2001.

Figura 5.18. Emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> producidas por el consumo de combustibles fósiles, 1755-2001.



Fuentes: Elaboración propia con datos de: De 1755 a 1990: WRI. *A guide to the global environment, 1998-1999*. USA. 1998; Para 2000 y 2001: IEA. *Key global statistics*. France. 2003.

el CH<sub>4</sub> de un 20%, el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) de un 6% y los halocarbonos de un 14% (IPCC, 2001; PNUMA, 2002).

En el contexto mundial, en el 2001 se emitieron cerca de 24 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de combustibles (Figura 5.19), siendo los mayores emisores los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) con el 52%, seguido de los países de la ex URSS con un 14% y de China con el 13%. Estados Unidos, con sus más de cinco mil millones y media de toneladas por año es el país que más bióxido de carbono emite, cantidad que representa casi la cuarta parte de las emisiones totales del planeta. México con aproximadamente 360 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año

es el país con la emisión más alta de América Latina y contribuye con cerca del 1% de las emisiones mundiales (IEA-OECD, 2002).

Durante la década de los noventa la emisión de CO<sub>2</sub> en México se incrementó en un 23.1%, casi el doble del aumento promedio de los países miembros de la OCDE que fue del 13% (OECD, 2002). En México, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, en el año de 1998 las emisiones totales de todas las fuentes de energía y emisiones fugitivas fueron de un poco más de 350 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, de las cuales cerca del 60% se produjeron por la generación eléctrica y el sector transporte. Si se examina la generación de CO<sub>2</sub> con referencia al Producto

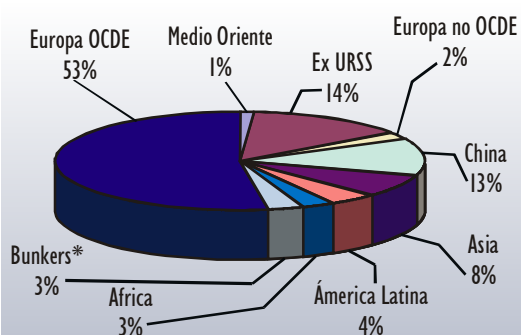
**Tabla 5.2. Concentración atmosférica de los principales gases de efecto invernadero, 1980-1996.**

Año	Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (ppm)	Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) (ppb)	Metano (CH <sub>4</sub> ) (ppb)
1980	338.5	299	
1981	339.8	299	
1982	341.0	301	
1983	342.6	302	
1984	344.3	303	
1985	345.7	304	1 600
1986	347.0	305	1 611
1987	348.8	306	1 619
1988	351.3	306	1 641
1989	352.8	306	1 645
1990	354.0	307	1 657
1991	355.5	307	1 673
1992	356.3	308	1 671
1993	357.0	308	1 666
1994	358.9	309	1 681
1995	360.9	309	1 670
1996	362.6	310	

**Nota:** ppm (partes por millón); ppb (partes por billón)

**Fuente:** WRI. *A guide to the global environment 1998-1999*. Oxford, USA. 1998.

**Figura 5.19. Emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por región, 2001.**



**Nota:** La suma de los porcentajes es superior al 100%, debido al error de redondeo.  
\*Bunkers: depósitos de combustible como los frecuentemente utilizados en embarcaciones.

**Fuente:** IEA. *Key World Energy Statistics*. France. 2003.

Interno Bruto del país, México— con un valor de 0.96 kg de CO<sub>2</sub> por dólar a precio de 1995— ocupa el sexto lugar dentro de los países de la OCDE después de la República Checa, Eslovaquia, Hungría, Polonia y Turquía (OECD, 2002). La emisión de CO<sub>2</sub> por habitante en México fue de 3.7 toneladas/año en 2000, el segundo más bajo de los países de la OCDE y muy por debajo de la cifra de Estados Unidos, Australia y Canadá de 20.5, 17.2 y 17.1 toneladas/año, respectivamente (OECD, 2002). En el contexto latinoamericano, países más pequeños como Trinidad y Tobago y Venezuela superan a México en las emisiones por habitante (WRI, 1998; IEA-OECD, 2002).

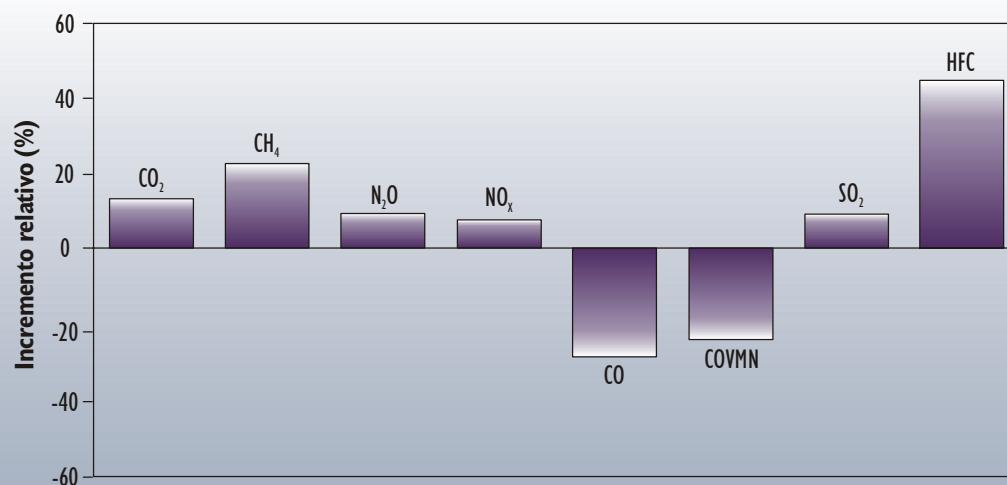
Los otros gases de efecto invernadero, aunque en volumen son considerablemente menores que el CO<sub>2</sub>, contribuyen de manera significativa al calentamiento global, ya que su acción combinada de retención de calor y tiempo de permanencia en la atmósfera hacen que sus efectos sean importantes. Por ejemplo, los clorofluorocarbonos (CFC) pueden permanecer en la atmósfera más de 50 000 años y tener más de 5 000 veces el impacto por molécula sobre el calentamiento global que tiene cada molécula de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2001).

La primera estimación de emisiones de gases de efecto invernadero para México se realizó en 1995 con cifras de 1990 y sus resultados se presentaron ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997. Posteriormente se calcularon las emisiones de 1994, 1996 y 1998 con la metodología revisada del IPCC de 1996. Cabe señalar que debido al cambio de método, las comparaciones del inventario de 1990 con los demás años no son correctas, mientras que las comparaciones entre los valores de los años 1994, 1996 y 1998 son válidas (Recuadro III.1.2.2).

De acuerdo con las estimaciones para 1996 de las emisiones de gases de efecto invernadero en México el CO<sub>2</sub> es el gas que se emitió en mayor cantidad con un poco más de 514 millones de toneladas/año<sup>2</sup> (74.3% del total de las emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>). Las principales fuentes de este contaminante son la quema de combustibles fósiles que se utilizan tanto para la generación de electricidad como para el transporte. El cambio de uso de suelo también es un componente importante tanto por las emisiones que se



**Figura 5.20. Cambios en las emisiones de los diferentes gases de efecto invernadero en México, 1994-1998.**



\*Solo se incluyen las emisiones asociadas a la combustión y fuga de combustibles.  
COVMN: Compuestos orgánicos volátiles, no incluye el metano; HFC: Hidroclorofluorocarbonos.

Fuente: Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.

desprenden directamente del suelo como las que se derivan de la tala y limpia de los terrenos desmontados (Cuadro III.1.2.1). Para 1998, las emisiones de CH<sub>4</sub> fueron de cerca de ocho millones de toneladas, generadas principalmente en los sitios de depósito de desechos sólidos y como consecuencia del tratamiento de aguas residuales; otras fuentes importantes son las emisiones asociadas a las fugas de petróleo y gas natural que contribuyeron con casi el 31% de las emisiones totales y las derivadas de actividades agrícolas, en particular la fermentación entérica, con un 24%. Las emisiones de N<sub>2</sub>O fueron de poco menos de 50 mil toneladas, siendo su fuente primordial las actividades agrícolas. Los NO<sub>x</sub>, CO y compuestos orgánicos volátiles son principalmente emitidos por la quema de combustibles empleados en el transporte. Los CFC son producidos únicamente por la industria y, aunque su volumen es muy pequeño en términos comparativos con los demás gases, son importantes debido a que su efecto como gas invernadero puede ser considerablemente mayor que el CO<sub>2</sub>, ya sea por su mayor tiempo de permanencia o su mayor capacidad de retención de calor<sup>3</sup>.

Entre 1994 y 1998 se incrementaron las emisiones nacionales de casi todos los gases de efecto invernadero resaltando por su importancia en volumen las de CO<sub>2</sub>,

asociadas a la combustión y fugas de combustibles, que aumentaron un 12.3%, y del metano con un 22.2%. En contraste, se redujeron las emisiones de CO en un 28.2% y de compuestos orgánicos volátiles en un 24% (Figura 5.20).

La gran cantidad de procesos que intervienen para determinar el clima de un lugar hace poco confiables las extrapolaciones de las tendencias registradas en el pasado para predecir el clima futuro. Por esta razón, las proyecciones sobre el clima se realizan por medio de modelos numéricos complejos que predicen la respuesta de éste ante diferentes escenarios como, por ejemplo, diferente volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> o cambios en la dinámica de retención por parte de la vegetación. A pesar de la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos en los modelos, los escenarios más conservadores predicen varias consecuencias sobre aspectos tan importantes como la salud humana, los ecosistemas y la disponibilidad de los recursos hídricos, lo que ha provocado

<sup>2</sup> En 1998 no se calculó la emisión de CO<sub>2</sub> asociada al cambio de uso de suelo y silvicultura que en 1996 contribuyeron con cerca del 31% de las emisiones totales de este gas.

<sup>3</sup> Esto también ocurre para otros gases de invernadero, por ejemplo, un gramo de metano, por su capacidad de retener la radiación infrarroja, equivale a 21 gramos de CO<sub>2</sub> y un gramo de óxido nitroso equivale a 310 gramos de CO<sub>2</sub>, considerando un periodo de 100 años, tomando en cuenta su tiempo de residencia.

que a nivel mundial se tomen acciones decididas para evitar que las actividades humanas alteren más el clima del planeta.

De acuerdo con los modelos analizados por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, para el año 2100 se habrá alcanzado una concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de entre 540 y 970 ppm (en el año 2000 la concentración fue de 368 ppm), la temperatura se incrementará entre 1.4 y 5.8°C más de lo registrado en 1990 y el nivel del mar también habrá aumentado entre 9 y 88 centímetros. Dentro de este escenario es muy probable que se incremente el número de muertes en el mundo por efectos de las ondas cálidas y que enfermedades como la malaria y el dengue se conviertan en un problema de salud pública mundial, ya que el área de distribución de sus organismos vectores podría extenderse.

El problema de la disponibilidad de agua, que ya se considera muy serio hoy en día en diversas regiones del mundo, podría agudizarse. Se prevé que ocurrirán cambios en la distribución espacial de las precipitaciones, por lo que habrá zonas que verán disminuida la cantidad de agua que reciben por lluvia, lo que dará lugar a que se intensifiquen las sequías en amplias zonas del mundo. Algunas de las regiones que se espera sufran los efectos más fuertes de la sequía son África y la región del Mediterráneo. Otro factor que contribuirá a la disminución de la disponibilidad de agua dulce será la disminución generalizada en su calidad debido al incremento en la temperatura. Los acuíferos costeros podrían tener problemas de intrusión salina debido a la presión ocasionada por el aumento en el nivel del mar. Asimismo, se predice una mayor ocurrencia de daños asociados a inundaciones o sequías extremas.

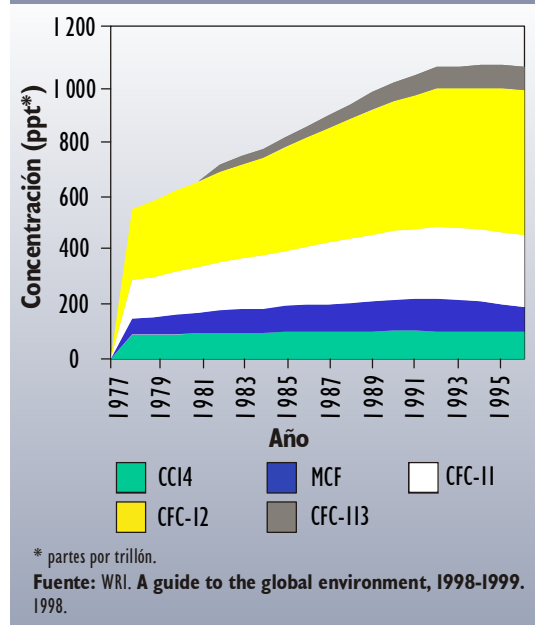
No se tiene una certeza de cómo se verá afectado el territorio mexicano debido al cambio climático. En el *Estudio de país*, que coordinó el Instituto Nacional de Ecología a mediados de los años noventa, se presentó un análisis sobre la vulnerabilidad de México ante el cambio climático. Los resultados obtenidos en este estudio indican que probablemente México sufra modificación en el régimen de distribución espacial y temporal de la precipitación pluvial, trayendo consigo un aumento en la ocurrencia de inundaciones, una agudización de las sequías y de los procesos

de desertificación del territorio, así como una alteración en la recarga de acuíferos. Otros efectos importantes serían daños a los ecosistemas boscosos del país, tanto por los cambios en el clima como por el incremento de los incendios, lo que a su vez profundizaría los procesos de deforestación y erosión del suelo. De acuerdo con estudios de la Conabio los tipos de vegetación más afectados serían los bosques templados, los bosques tropicales y los bosques mesófilos de montaña. En el capítulo que aborda los aspectos de la biodiversidad se describen con más detalle los efectos sobre la misma.

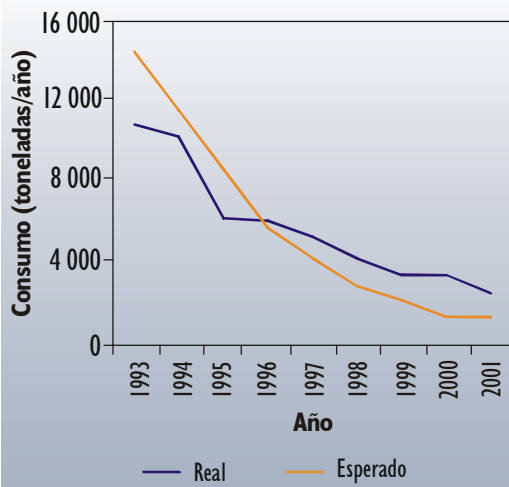
### Agotamiento de la capa de ozono

La reducción del espesor de la capa de ozono es actualmente uno de los problemas ambientales más importantes en el mundo. El agotamiento del O<sub>3</sub> es causado por varios agentes que se conocen genéricamente como sustancias agotadoras de ozono (SAO). Las más conocidas son los clorofluorcarbonos (CFC), que se utilizaban ampliamente en los sistemas de refrigeración, los aerosoles, la limpieza de partes electrónicas, así como agentes esterilizadores y fumigantes, entre otros usos. Los compuestos que contienen un elemento del grupo de los halógenos (flúor, cloro, bromo o yodo) son conocidos

**Figura 5.21. Concentración atmosférica de algunas sustancias agotadoras de ozono (SAO), 1977-1996.**



**Figura 5.22. Eliminación de las sustancias agotadoras del ozono (SAO) en México, 1993-2001.**

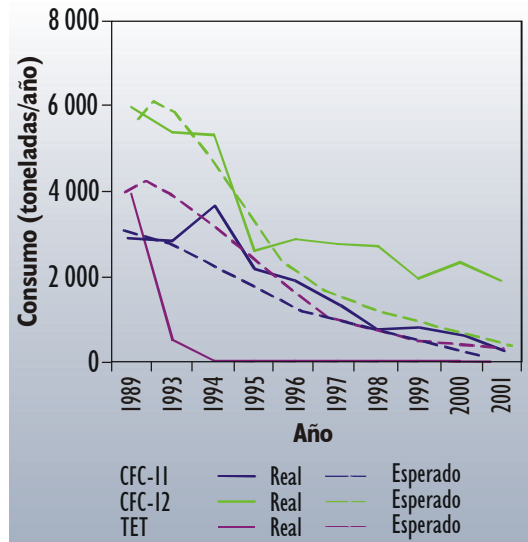


Fuente: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. México. 2002.

como halocarbonos, y de éstos los que contienen cloro o yodo afectan la capa de ozono, por lo que actualmente su producción está controlada bajo el Protocolo de Montreal, firmado el 16 de septiembre de 1987. La reducción de la capa de ozono se refleja muy claramente en la región de la Antártida donde, en 2000 el «agujero» ya había alcanzado un tamaño de 28 millones de kilómetros cuadrados (PNUMA; 2002).

Para el año de 1995 la mayoría de las sustancias agotadoras de ozono incluidas en el Protocolo de Montreal habían dejado de producirse en los países industrializados. En el caso de los países en desarrollo, en el Protocolo se especificó un periodo de gracia de diez años para su eliminación y, además, se les ofrecieron apoyos financieros que les permitirían enfrentar los costos de eliminar las SAO. A pesar de las reducciones observadas en la producción de SAO, su concentración en la atmósfera no se ha reducido (Figura 5.21). De hecho, en los escenarios más optimistas, se predice que la capa de ozono comenzará a recuperarse en 10 ó 20 años y su recuperación plena no llegará antes de la primera mitad del siglo XXI (PNUMA, 2002).

**Figura 5.23. Eliminación de algunas de las principales SAO en México, 1989-2001.**



Fuente: Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes. México. 2002.

México, mediante acuerdos voluntarios, ha favorecido la eliminación de los CFC adelantándose a los controles internacionales y marcando un calendario para la reducción de SAO. La estrategia que ha seguido el país se ha basado en tres puntos: 1) controlar la producción de SAO, 2) fomentar y asesorar el uso de sustancias alternativas que minimicen los impactos en la capa de ozono y 3) capacitar a los usuarios sobre las medidas de conservación de la capa de ozono. El calendario adoptado por México para la eliminación de las SAO se muestra en el [Recuadro III.1.3.2](#).

Considerando a 1989 como año base se propuso reducir la cantidad de SAO de casi 11 000 toneladas/año a poco más de 3 500 toneladas en el año 2000 (Figura 5.22). Algunos de los resultados más notables son la reducción del CFC-11 y CFC-12, que pasaron de 2 993 y 6 000 toneladas en 1989 a 700 y 1 885 toneladas respectivamente en el año 2000, mientras que el Halón-1301 y el tetracloruro de carbono (TET) fueron eliminados por completo (Figura 5.23). No obstante, en algunos otros como el metil cloroformo, los resultados no han sido los esperados a pesar de que a partir de 1995 se ha observado una reducción sostenida.

## Referencias

- Gobierno del Distrito Federal. *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México, 1998*. México. 2002.
- IEA-OECD. *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 1971-2000*. France. 2002.
- IPCC. *Climate Change 2001: synthesis report*. IPCC. 2001.
- OECD. *OECD in figures: statistics on the member countries. Supplement I*. France. 2002.
- PNUMA. *Perspectivas del medio ambiente mundial GEO-3*. Grupo Mundi-Prensa. España. 2002.
- Semarnat, INE, Dirección General de Calidad del Aire y Registro de Contaminantes. México. 2002.
- Semarnat, INE, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. México. 2002.
- WRI. *A guide to the global environment 1998-1999*. Oxford. USA. 1998.