

Claudia Sheinbaum Pardo



Contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México

El presente artículo hace una revisión del conocimiento actual sobre la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México a partir de diversas publicaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico y de publicaciones científicas en el tema, en particular sobre la formación de ozono y de partículas suspendidas. La revisión muestra que la formación de ozono y de un porcentaje importante de las partículas menores de 2.5 micrómetros –conocidas como aerosoles orgánicos secundarios– es producto de complejas reacciones fotoquímicas en la atmósfera de la ZMVM. La emisión primaria y formación secundaria de compuestos orgánicos volátiles es un factor sumamente importante para la presencia de ambos contaminantes, en particular en la zona más urbanizada. De acuerdo con el inventario de emisiones, los vehículos a gasolina siguen teniendo una contribución significativa en la formación de los compuestos orgánicos volátiles, particularmente los más reactivos en la atmósfera; sin embargo, no deben subestimarse las fugas de gas LP y la combustión de biomasa.

Introducción

Los recientes episodios de contingencia ambiental han llamado nuevamente la atención sobre el grave problema de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Por sus características geográficas y la diversidad de actividades económicas y de servicios, esta región presenta mayores dificultades para la reducción de la concentración de contaminantes que otros lugares del país y del mundo.

A pesar de que la calidad del aire que se respira hoy en la ZMVM es mejor que la que se respiraba hace dos décadas, en los últimos años la tasa de decremento de las concentraciones ha disminuido. Aun cuando el último Programa de Calidad del Aire es un documento rico en información y propuestas, no presenta una jerarquización que ayude a diseñar una política pública con mayor eficacia.

Los contaminantes atmosféricos que más preocupan por encontrarse durante varios días al año por encima de las normas de salud son el ozono (O_3) y las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10}). Dentro de estas últimas se encuentran las partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), cuya norma de salud está establecida sobre la base de la concentración anual. Las Figuras 1 y 2 muestran la tendencia en la concentración

de estos contaminantes en la atmósfera de la ZMVM, de 1990 a marzo de 2016, medidas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SIMAT). En ambos casos es claro que la reducción en la concentración de los contaminantes se ha estancado o incluso ha comenzado a aumentar.

El conocimiento actual: un somero resumen

La información acerca de la contaminación atmosférica de la ZMVM proviene principalmente de tres fuentes de información: del SIMAT, del Inventario de Contaminantes Criterio (cuya última publicación fue para el año 2012) –ambos a cargo de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México– y de diversas campañas de medición, entre las que destacan por su magnitud las de los años 2003 y 2006 (esta última denominada MILAGRO; *Megacity Initiative: Local And Global Research Observations*).

El SIMAT mide de manera rutinaria la concentración de los contaminantes: plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$).



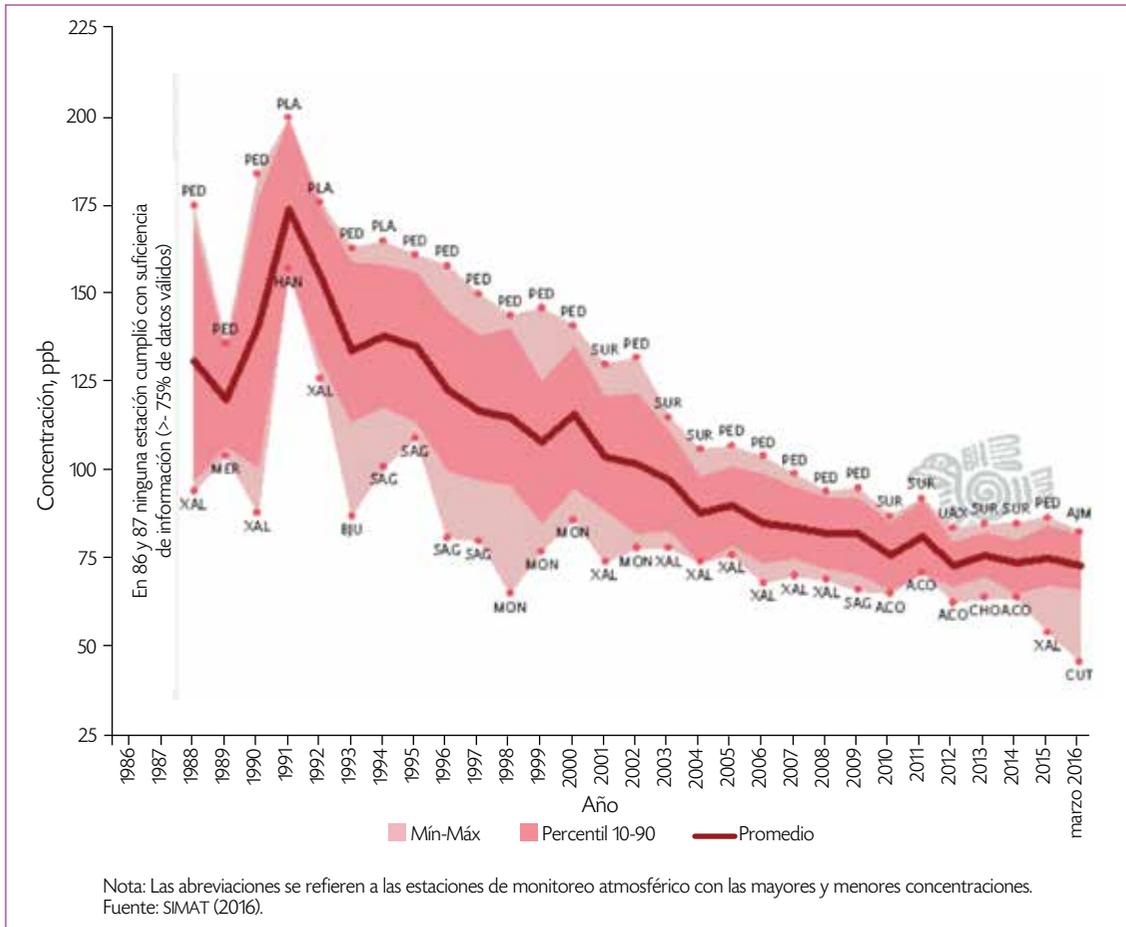


Figura 1. Tendencia en la concentración promedio anual de O₃.

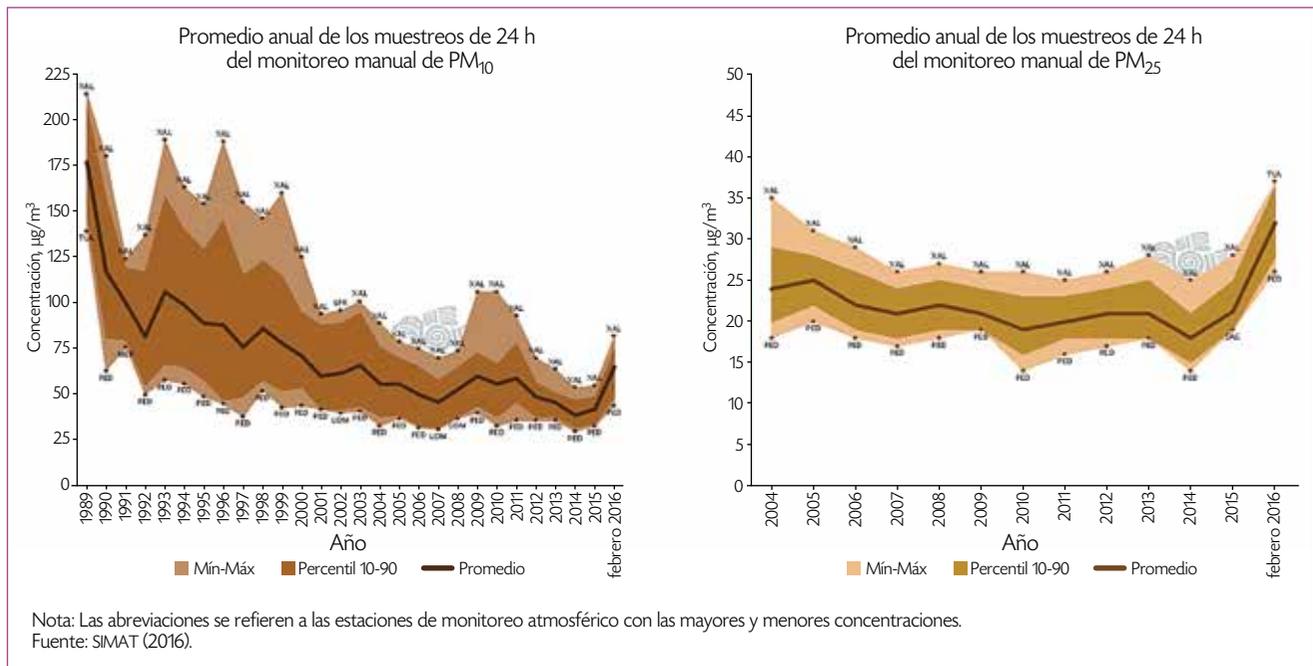


Figura 2. Tendencia en la concentración promedio anual de partículas.

Otro grupo de contaminantes que son causa de preocupación para la salud humana, tanto por su efecto directo –algunos de ellos son tóxicos– como por su reactividad en la atmósfera, son los llamados compuestos orgánicos volátiles (COV). Hasta ahora, estos compuestos no se registran de forma rutinaria en las estaciones del SIMAT (aun cuando comienzan a realizarse algunas mediciones), dado que su medición es sumamente complicada. Se trata de decenas de compuestos de diversa variedad; unos son emitidos directamente por las fuentes y otros se forman por reacciones químicas complejas a lo largo del día. Algunos científicos estiman que la concentración de COV en la atmósfera de la ZMVM es de más del doble, y en algunos casos seis veces mayor, que en diversas ciudades de Estados Unidos (Velasco *et al.*, 2007).

El ozono

El ozono es un contaminante que no se emite directamente; es decir, es un contaminante netamente secundario, resultado de la reacción química entre óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV) –en particular aquéllos diferentes al metano– en presencia de luz solar. El ozono es una molécula poco estable y en condiciones naturales su formación en la parte baja de la atmósfera no es común. Sus altas concentraciones indican que hay una importante y compleja actividad fotoquímica (principalmente entre los NO_x y COV), con su mayor intensidad entre las 12 y las 17 horas.

Uno de los resultados más importantes de las campañas de medición es que la importancia de los NO_x y de los COV en la formación de ozono depende del lugar de la ZMVM. Se estima que en las regiones más urbanizadas, la formación de ozono depende en mayor medida de los COV, mientras que en las regiones más rurales depende en una proporción similar de NO_x y COV (Molina *et al.*, 2010).

Bon y colaboradores (2011) muestran los perfiles horarios de los COV y sus principales fuentes, a partir de las campañas de medición de la ZMVM. De acuerdo con estos autores, los COV provenientes de las fugas de gas licuado de petróleo o gas LP (propano y butano) tienen una concentración casi dos veces y media mayor que los COV provenientes del tráfico vehicular. Tam-

bién, en ambos casos (los COV del gas LP y los del tráfico), la concentración disminuye abruptamente a partir de las 11 horas, principalmente por su transformación en ozono y otros compuestos (véase la Figura 3).

Sin embargo, existe una gran variedad de COV, algunos de los cuales no provienen de emisiones directas, sino que se forman debido a reacciones químicas en la atmósfera. Inclusive, de todos estos compuestos, algunos tienen mayor reactividad para la producción de ozono. Tal es el caso del formaldehído (HCHO), el acetaldehído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) y el eteno (o etileno); no obstante, este último reacciona rápidamente para formar formaldehído (Molina *et al.*, 2010; Lei *et al.*, 2009). La fuente principal de estos compuestos es la combustión de gasolina. Esto significa que aun cuando los COV de mayor presencia son los provenientes de las fugas de gas LP, los más reactivos para la formación de ozono son los provenientes de la combustión de gasolina.

Molina y colaboradores (2010) reportan que en una de las campañas de medición se observó que la tasa de formación de ozono es de cerca de 50 ppb/hora (partes por billón por hora), la cual es la más alta que se haya observado en cualquier lugar del mundo. Se cree que estos resultados son consistentes con la altísima reactividad de los COV observada en la ZMVM, comparada

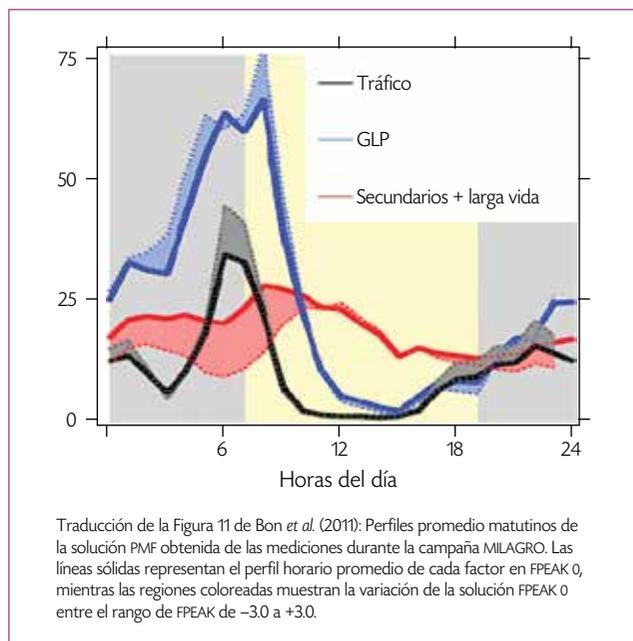


Figura 3. Perfil horario de compuestos orgánicos volátiles (COV). Fuente: Bon *et al.*, 2011.



con otras ciudades donde se han hecho mediciones (Wood *et al.*, 2009; Molina *et al.*, 2010).

Sin embargo, la importancia de los COV en la formación de ozono no debe implicar la subestimación del control de la emisión de NO_x . Inclusive, las reacciones químicas son tan complejas que los propios COV también son un factor importante en la formación de compuestos con nitrógeno, que a su vez aumentan la producción de ozono. Molina y colaboradores (2010) describen, por ejemplo, la importancia de los COV en la formación del ácido nítrico (HNO_3) a partir de su reacción con el dióxido de nitrógeno (NO_2), lo cual aumenta la producción de ozono y de aerosoles secundarios (Li *et al.*, 2010).

En el inventario de emisiones de contaminantes primarios para 2012 se estima que en el caso de los COV las fuentes de área representan 36.6% (solventes y pinturas, 20%; fugas e hidrocarburos no quemados de gas LP –probablemente subestimados–, 11%), las fuentes móviles representan 32% (vehículos a gasolina, 29%) y las fuentes puntuales (industrias) representan 28% de las emisiones. En el caso del formaldehído y acetaldehído en su forma primaria, las fuentes móviles producen 89%. Por su parte, la fuente primaria más importante de los NO_x (entre los que se encuentran principalmente los NO_2) son los vehículos a gasolina, con 61% de las emisiones totales, seguidos por los vehículos a diésel, con 27% de las emisiones totales.

Las partículas finas

Uno de los resultados más importantes de la campaña MILAGRO fue el de conocer que en promedio las $\text{PM}_{2.5}$ representan cerca de la mitad de las concentra-

ciones de PM_{10} . Otro de los resultados más significativos fue conocer la composición de las partículas. La Figura 4 (publicada en Molina *et al.*, 2010, basada en los resultados de Querol *et al.*, 2008) muestra la composición de las partículas gruesas, que están entre los 2.5 y 10 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10}), y de las partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$), para la zona urbanizada (T0) y la menos urbanizada (T1) de la ZMVM.

Como se muestra en la figura, el polvo (material mineral) es el principal componente de las partículas más gruesas en ambos sitios, mientras que el material orgánico (compuestos que contienen carbono) adquiere mayor importancia en las partículas finas, sobre todo en la región urbanizada. En el caso del material orgánico, la mayor parte está compuesta por los llamados aerosoles orgánicos (carbonáceos), que a su vez pueden dividirse en aerosoles primarios y secundarios (POA y SOA, por sus siglas en inglés, respectivamente). Se estima que los POA representan cerca de 15% de las $\text{PM}_{2.5}$ y sus fuentes de emisión más importantes incluyen: combustión de fuentes móviles, combustión de otras fuentes fósiles, combustión de biomasa y otras fuentes presumiblemente industriales (Molina *et al.*, 2010). Por su parte, los SOA son resultado de reacciones químicas complejas y representan cerca de 50% de la masa de los compuestos orgánicos. Por su origen, los SOA están vinculados también con los COV primarios y secundarios (Molina *et al.*, 2010).

El perfil horario promedio de concentración de las partículas PM_{10} (véase la Figura 5) muestra dos picos importantes: a las 9 y a las 19 horas, que pueden estar asociados a la circulación de vehículos, ya que los polvos de las vialidades pavimentadas y no pavimentadas representan 50% de las PM_{10} , de acuerdo con el inven-

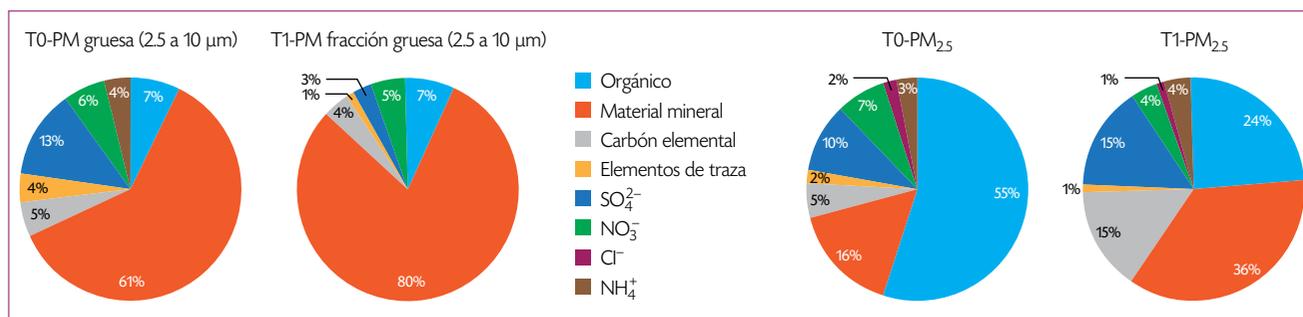


Figura 4. Composición de las partículas en la región urbanizada (T0) y la región menos urbanizada (T1). Fuente: Molina *et al.*, 2010.

tario de emisiones. Por su parte, el perfil horario de concentración de $PM_{2.5}$ (véase la Figura 5) muestra un pico a las 13 horas, que bien puede estar asociado a la fotoquímica atmosférica y la formación de SOA.

Por otro lado, Li y colaboradores (2012) han investigado la contribución de la quema de biomasa en la formación de aerosoles y de carbón elemental. Se estima que durante los episodios de incendios (enero a mayo), éstos contribuyen con 34% de los POA, 22% de los SOA y 9% del carbón elemental en el sitio T0; y con 63% de los POA, 24% de los SOA y 29% del carbón elemental en el sitio T1.

Perfil diario de concentración de contaminantes y visibilidad

El ozono es un compuesto incoloro y no tiene un impacto importante en la disminución de la visibilidad. Sin embargo, ya se mencionó que durante las reacciones fotoquímicas en la atmósfera se producen también los SOA, que por su tamaño son capaces de dispersar la luz, lo que provoca una bruma blanquecina. El perfil de los NO_x (el NO_2 tiene un color cercano al café) y de las PM_{10} sugiere que estos contaminantes son responsables de la falta de visibilidad matutina (una capa color café). Sin embargo, es probable que la neblina blanca del mediodía hasta la tarde se deba a los SOA.

Medidas para disminuir la contaminación atmosférica

En resumen:

- Las altas concentraciones de ozono y de partículas finas siguen representando un problema de salud para los habitantes de la ZMVM. Aun cuando la tendencia general de la concentración de estos contaminantes es a la baja, en los últimos diez años la tasa de reducción ha sido muy lenta, o incluso las concentraciones han aumentado.
- La formación de ozono y de un porcentaje importante de las $PM_{2.5}$ —conocidas como SOA (que representan cerca de 26% de la concentración de $PM_{2.5}$)—es producto de complejas reacciones fotoquímicas en la atmósfera de la ZMVM. La emisión primaria y formación secundaria de los COV tiene un papel sumamente importante en la presencia de ambos contaminantes, en particular en la zona más urbanizada.
- La mayor contribución de los COV a la atmósfera de la ZMVM son las fugas de gas LP. Sin embargo, los COV con mayor reactividad en la atmósfera son el formaldehído y el acetaldehído. En ambos casos, los vehículos a gasolina contribuyen con 89% de su emisión primaria. Además, el formaldehído puede formarse por reacciones fotoquímicas de compuestos como el etileno, cuya principal fuente de emisión son los vehículos a gasolina.

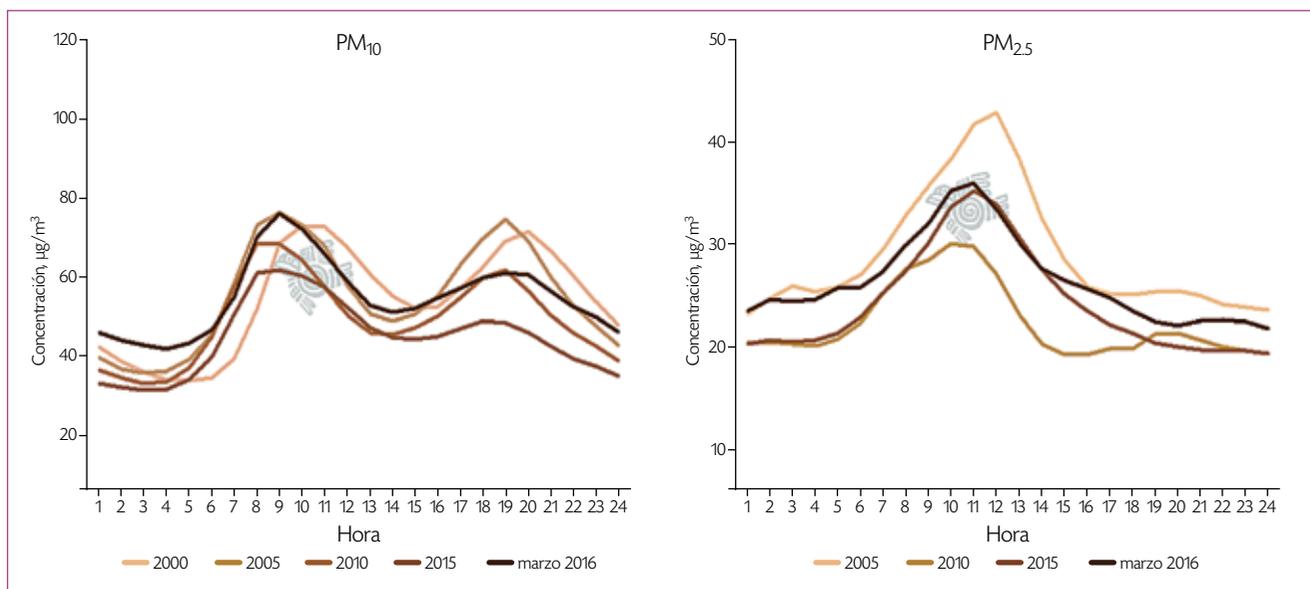


Figura 5. Distribución horaria de la concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Fuente: SIMAT, 2016.



- De acuerdo con el inventario de emisiones, los vehículos a gasolina siguen teniendo una contribución muy importante en la emisión primaria de los precursores de ozono. Representan 61% de las emisiones de NO_x y 24% de las emisiones primarias de COV.
- Se estima que la quema de biomasa (principalmente incendios forestales, agrícolas y quema de basura) contribuye con 60% a la carga de POA, 30% a los SOA y 25% al carbón elemental.

De acuerdo con lo presentado, parece lógico orientar la política de calidad del aire hacia los siguientes ejes, en orden de importancia: 1) reducción de COV (en particular, los más reactivos que provienen de los vehículos a gasolina), que conjuntamente impacta en la reducción de ozono y de $\text{PM}_{2.5}$; 2) reducción de NO_x (vehículos de gasolina y diésel); 3) reducción de las emisiones provenientes de las fugas de gas LP, desde su almacenamiento, distribución y hasta su uso; 4) reducción de las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$ por quema de diésel; 5) reducción de las emisiones por quema de biomasa; 6) reducción de PM_{10} a partir de su contribución más importante, que es el polvo.

● Reducción de emisiones de los vehículos a gasolina

Existen dos áreas de oportunidad para reducir la contaminación por COV y NO_x generada por los vehículos a gasolina.

1) La reducción de emisiones por vehículo implica generar mejoras tecnológicas que disminuyan la emisión de contaminantes por kilómetro recorrido, incluyendo el cambio de combustibles. Para ello se establecen normas de emisión cada vez más estrictas que obligan a los fabricantes de vehículos a reducir las emisiones. Esto requiere también tener laboratorios de control por parte de los gobiernos (ya se ha visto que las automotrices han mentido respecto a sus índices de emisión) e inspecciones para evitar que se desgasten las tecnologías por falta de mantenimiento (por ejemplo, el programa de verificación vehicular). En México, no se han actualizado las normas de emisión de vehículos nuevos y en circulación desde hace diez años.

2) Es necesario un cambio estructural (disminución de viajes y cambio modal): la sustitución de viajes en

automóvil particular por viajes en transporte público, o por motocicletas o transporte no motorizado, como bicicletas; o inclusive omitir viajes mediante la promoción del trabajo desde casa (uso de internet y nuevas tecnologías).

● Reducir las emisiones provenientes de las fugas de gas LP

La atmósfera de la ZMVM tiene una alta concentración de COV que provienen de fugas de gas LP, además de que representan un riesgo de protección civil. Se requiere un estudio específico sobre este tema con mediciones de las diferentes fuentes de gas LP. No obstante, se propone: 1) un programa urgente de sustitución de los microbuses que utilizan gas LP con fechas límite de servicio; 2) un programa urgente de inspección de fugas en camiones de servicio; y 3) un programa de detección y control de fugas domiciliarias y comerciales.

● Reducción de emisiones de vehículos a diésel

En la ZMVM los vehículos pesados (de pasajeros y carga) son los que principalmente utilizan este combustible. Está demostrado que el buen mantenimiento de los vehículos reduce de manera importante el humo negro formado principalmente por carbono elemental y compuestos orgánicos (Weaver *et al.*, 2006; Johnson, 2012). Asimismo, la utilización de trampas de partículas y de convertidores catalíticos disminuye hasta en 50% la emisión de PM_{10} y NO_x , respectivamente. Para ambas tecnologías se requiere que el diésel tenga menos de 30 ppm de contenido de azufre. La obligatoriedad del uso de estas tecnologías depende de generar una norma de emisión adecuada para estos vehículos.

● Control de quemas a cielo abierto en zonas agrícolas

Por su importancia en la formación de POA y SOA, es indispensable trabajar con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), así como con los gobiernos locales, en

acciones para la disminución de esta fuente de emisión, lo cual consiste en generar nuevas prácticas agropecuarias que no requieran de quemas.

Control de emisiones de material particulado por erosión eólica

Existen tres grandes regiones como fuentes de emisión: Norte, Sureste y Vaso de Texcoco. Cada una requiere un tratamiento y estudio específico. Asimismo, la emisión por rodadura y erosión eólica de calles pavimentadas y no pavimentadas es importante.

Claudia Sheinbaum Pardo es doctora en Ingeniería en Energía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Realizó su investigación doctoral en el Lawrence Berkeley Laboratory. Es investigadora titular del Instituto de Ingeniería de la UNAM, miembro del Sistema Nacional de Investigadores y del Panel Intergubernamental de Cambio Climático que en 2007 obtuvo el premio Nobel de la Paz. Miembro del Consejo Editorial de las revistas *Energy* y *Energy for Sustainable Development*. Premio Joven Universidad Nacional y Jesús Silva Herzog. Fue miembro de la Comisión para Políticas del Desarrollo de Naciones Unidas. Fue secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal y actualmente funge como Jefa Delegacional en Tlalpan. csp@pumas.iingen.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Bon, D. M., I. M. Ulbrich, J. A. de Gouw *et al.* (2011), "Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution", *Atmos. Chem. Phys.*, 11: 2399-2421.
- Johnson, T. V. (2012), "Vehicular emissions in review", *SAE International Journal of Engines*, 5(2):216-234.
- Lei, W., M. Zavala, B. de Foy *et al.* (2009), "Impact of primary formaldehyde on air pollution in the Mexico City Metropolitan Area", *Atmos. Chem. Phys.*, 9:2607-2618.
- Lei, W., G. Li y L. Molina (2012), "Modeling the impacts of biomass burning on air quality in and around Mexico City", *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 12:22891-22943.
- Li, G., W. Lei, M. Zavala *et al.* (2010), "Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign", *Atmos. Chem. Phys.*, 10:6551-6567.
- Molina, L. T., S. Madronich, J. S. Gaffney *et al.* (2010), "An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation", *Atmos. Chem. Phys.*, 10(18):8697-8760.
- Querol, X., J. Pey, M. C. Minguillón *et al.* (2008), "PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign", *Atmos. Chem. Phys.*, 8:111-128.
- Velasco, E., B. Lamb, H. Westberg *et al.* (2007), "Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns", *Atmos. Chem. Phys.*, 7:329-353.
- Weaver, C. S., M. V. Balam Almanza, C. S. Pardo *et al.* (2006), "Measurement of air pollutant emissions from public transport buses in the Insurgentes Corridor of Mexico City", *Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition*, vol. 6, Nueva Orleans, AWMA, pp. 3385-3390.
- Wood, E. C., S. C. Herndon, T. B. Onasch *et al.* (2009), "A case study of ozone production, nitrogen oxides, and the radical budget in Mexico City", *Atmos. Chem. Phys.*, 9:2499-2516.