

# Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México



**SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE**

DIRECCIÓN GENERAL DE PREVENCIÓN Y CONTROL  
DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



GOBIERNO DEL  
**ESTADO DE MÉXICO**

## Directorio

Lic. Enrique Peña Nieto  
Gobernador Constitucional del  
Estado de México

Lic. Gustavo Cárdenas Monroy  
Secretario del Medio Ambiente

C. P. María Mercedes Colín Guadarrama  
Subsecretaria del Medio Ambiente

Lic. Roberto Cervantes Martínez  
Director General de Prevención y  
Control de la Contaminación Atmosférica

### Créditos técnicos

Elaboración: Lic. Gabriel Zavaleta Mondragón  
Líder de Proyecto de Diagnóstico

Revisión: Lic. Pablo Escamilla Báez  
Encargado del Departamento de Diagnóstico

Ing. Bibiana Valdez Avedaño  
Unidad de Inventario de Emisiones

### **Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México**

Informe técnico DDA/02/2010

Año de elaboración: 2010

Para más información acudir a  
SMAGEM, Dirección General de Prevención y  
Control de la Contaminación Atmosférica  
Departamento de Diagnóstico  
Vía Gustavo Baz, no. 2160, piso 2  
Col. La Loma, Tlalnepantla de Baz  
Estado de México, Tel. 53 66 82 70

[www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/medioambiente](http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/medioambiente)

Hecho en México

# Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México

## Contenido

<b>Introducción</b> .....	5
<b>1. Generalidades</b> .....	9
1.1. Definición y características del carbono negro .....	9
1.2. Participación del carbono negro en el clima global.....	10
1.3. Efectos en la salud humana.....	12
<b>2. Cuantificación de Carbono Negro en el Estado de México</b> .....	15
2.1. Antecedentes.....	15
2.2. Procedimiento metodológico.....	16
2.3. Resultados.....	17
<b>3. Propuesta de Acciones de Mitigación</b> .....	23
<b>Conclusiones</b> .....	27
<b>Bibliografía</b> .....	29



## Introducción

A partir del protocolo de Kioto (1997) se le ha dado mucha importancia al diseño e implementación de políticas para limitar la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento global. Sin embargo, en años recientes se habla de otro contaminante que también tiene un efecto en el calentamiento de la atmósfera, nos referimos al *carbono negro*, considerado como el tercer factor más importante del cambio climático después del bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y del metano (CH<sub>4</sub>).

El carbono negro forma parte del hollín, que es el humo negro que vemos salir de los escapes de los camiones, automóviles, chimeneas de las industrias, de los incendios. No obstante, el tamaño de las partículas o aerosoles de carbono negro es de 2.5 micras o menor, por lo cual son imperceptibles para el ojo humano.

El carbono negro calienta el planeta mediante la absorción del espectro visible de la radiación solar y su liberación en la atmósfera en forma de calor. Por otra parte, al depositarse en la nieve y el hielo, éste reduce la capacidad de reflejar la luz solar, lo que incrementa la absorción de calor y provoca el derretimiento de los glaciares. Los casos más dramáticos se presentan en el océano glacial del Ártico y en la cumbre del Himalaya.

Además de su contribución al calentamiento global y derretimiento de la nieve y el hielo el carbono negro puede alterar la estabilidad de los vientos, sus patrones de circulación y los ciclos hidrológicos, mediante procesos aún no comprendidos del todo.

El carbono negro se origina por la combustión incompleta de combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), de los llamados biocombustibles (bioetanol, biodiesel, biogás y estiércol) y de la biomasa (vegetación, leña, subproductos de cosechas, etcétera), por lo que las fuentes de emisión pueden ser tanto antropogénicas como naturales. Se calcula que en el mundo 40 % del carbono negro proviene de la quema de combustibles fósiles, 20 % por los biocombustibles y 40 % por la biomasa.

Asimismo, el carbono negro ha adquirido especial atención debido a su amplio rango de traslado, a su participación en la formación de contaminantes secundarios, pero sobre todo, a sus efectos en la salud humana. Las partículas carbonosas ultrafinas pueden llegar a lo más profundo del sistema respiratorio y causar enfermedades e infecciones respiratorias, e incluso decesos y cáncer. En las grandes ciudades la principal fuente de exposición son los gases de escape de los vehículos automotores y en las zonas rurales, el humo de los fogones.

En una época, los países desarrollados fueron los principales emisores de carbono negro, pero esto comenzó a cambiar en la década de 1950 con la adopción de tecnologías de control de contaminación en estos países. Actualmente la mayor cantidad de las emisiones proviene de países en vías de desarrollo y se espera que esta tendencia aumente. Hoy en día, en el mundo se emiten alrededor de ocho millones de toneladas de carbono negro al año, y provienen principalmente del hemisferio norte, lo cual es relevante porque esas emisiones se transportan al Ártico donde los efectos de su potencial de calentamiento se magnifican.

Por región, Europa y América del Norte participan con 13 % del total de emisiones; China y el sureste asiático, con 39 %, en tanto que Centroamérica, gran parte de Brasil y Perú, con 5 %. Se calcula que bajo la influencia de este contaminante viven unos tres mil millones de personas.

En México, las principales fuentes de emisión de carbono negro consisten en el consumo de combustibles fósiles en el transporte, en la quema de leña para cocción de alimentos, en los incendios forestales y en la quema de esquilmos de agricultura. Sin embargo, en un futuro cercano la generación de energía eléctrica por medio de carbón podría significar otra fuente crítica de emisión de carbono negro, pues de acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, para el 2017 se prevé la construcción de dos carboeléctricas, más las tres que actualmente operan en el país. De no contar con los controles y la tecnología adecuados, estas centrales representan un serio problema de contaminación ambiental; como ejemplo está la central “Plutarco Elías Calles”, también conocida como Petacalco, en el municipio de La Unión de Isidoro Montes de Oca, Guerrero, es la más contaminante del país, con una generación anual de 18 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, aparte de las emisiones de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de nitrógeno (NO) y cenizas, la cuales por cierto, se depositan en campos de cultivo aledaños.

El Estado de México, la entidad federativa más poblada de la República, cuenta con dos de las principales zonas metropolitanas, tiene altos consumos de combustibles fósiles, su flota vehicular la conforman más de dos millones de vehículos, a nivel nacional tiene el primer lugar en cuanto a número de incendios forestales y, por si fuera poco, la Sierra Nevada está padeciendo el deshielo de sus hielos permanentes, fenómeno atribuido al calentamiento global.

La comunidad científica y distintos organismos internacionales están convencidos de que abatir las emisiones de carbono negro permitirá conseguir beneficios más rápidos de los que generaría una estrategia enfocada sólo a los GEI. Esto es porque el carbono negro forma parte de un reducido grupo de agentes de forzamiento climático de corta vida, por lo cual las acciones de control sobre tales emisiones reducirán más rápido las concentraciones contaminantes en el aire ambiente.

Ante este panorama, la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM), por conducto de la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica (DGPCCA), se propuso como objetivos: identificar las fuentes de emisión de este contaminante dentro de las zonas metropolitanas de la entidad; estimar tanto su volumen de emisión como su concentración en el aire ambiente; y sugerir medidas para abatir a mediano plazo las emisiones de éste. Además de brindar al lector un marco de referencia acerca de sus características fisicoquímicas, su importancia respecto al calentamiento global y sus efectos en la salud humana.

Entre los alcances de este Informe está la ampliación del Diagnóstico Ambiental del Estado de México respecto a este contaminante; así como brindar a la población en general, información accesible y oportuna sobre un tema muy reciente del cual aún la comunidad científica discute acerca de su papel en el calentamiento global.

El documento titulado *Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México* está dividido en tres partes. En la primera parte, se da una breve explicación sobre la participación del carbono negro en el calentamiento global, sobre sus características físicas y químicas y sobre sus efectos en la salud humana. En la segunda parte, se identifican las principales fuentes de emisión de este contaminante en la entidad y se expone la cuantificación tanto del volumen de emisión como de la concentración anual en un periodo de cuatro años. En la tercera parte, se describen una serie de recomendaciones para la mitigación o abatimiento de las partículas carbonosas a mediano plazo.

Se determinó que en el Estado de México se emiten al año 1 685 toneladas de carbono negro, de las cuales las fuentes móviles participan con 94 %. Se encontró que la concentración en aire ambiente de este contaminante es más alta en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca que en la del Valle Cuautitlán-Texcoco por un factor de 2.3. Las principales fuentes identificadas de carbono negro, son los autos de uso particular, el transporte de carga, las termoeléctricas, la combustión habitacional, las locomotoras de arrastre, los incendios forestales y los hornos artesanales para la fabricación de ladrillo.



# 1. Generalidades

## 1.1. Definición y características del carbono negro

Cuando la combustión es incompleta, se emiten gases, humos y partículas. Dentro de estas últimas se encuentran las partículas carbonosas. Dichas partículas tienen diferentes tamaños, morfología y propiedades químicas y físicas, lo que es importante para determinar su origen y sus efectos en la atmósfera. Aunque la composición elemental de estas partículas está conformada por carbono en más de 90 %, éstas se consideran como un complejo polímero orgánico más que una forma amorfa de carbón elemental.

Los distintos métodos ópticos y térmicos utilizados para la identificación de material carbonoso, han generado distintas definiciones técnicas como carbono negro, *carbono elemental*, *carbono orgánico* o *carbono café*, dependiendo de la propiedad principal a medir (véase Andreae y Gelencsér, 2006). El término carbono negro surge a partir del uso de los métodos de atenuación ópticos y se refiere a la alta absorción de luz en distintas longitudes de onda que tienen los aerosoles carbonosos (Marley, Gaffney, Ramos *et ál.*, 2007).

En el presente documento nos referiremos al carbono negro como aquellas partículas en aerosol provenientes de la combustión, las cuales tienen un fuerte poder de absorción de luz y un importante potencial de calentamiento global.

El carbono negro se genera por la combustión incompleta de distintos combustibles como el diesel, la gasolina, el gas licuado de petróleo, combustóleo, gasóleo; de los llamados biocombustibles tales como el bioetanol, biodiesel, biogás, estiércol; y de biomasa como por ejemplo restos de esquileo, leña, pastos, bosques, entre otros. Las partículas producidas por la quema de biomasa tienen mayor proporción de carbón orgánico y, como se explicará en el apartado 1.2, tienden a enfriar la atmósfera.

Las partículas de carbono negro varían de tamaño, generalmente son mucho más pequeñas que las partículas de 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>) y podría incluirse dentro de la categoría de partículas ultrafinas o submicrónicas (< 0.1 micras).

En las fuentes de emisión de origen antropogénico, sean éstas motores de combustión interna, calderas, hornos, estufas, etcétera, la cantidad emitida de carbono negro varía según el tipo de combustible, el proceso de combustión y la efectividad de los equipos de control de emisiones empleados (Bahner, Weitz, Zapata *et ál.*, 2007).

La composición química inicial del carbono negro depende del proceso o fuente de emisión. Cierta tipo de fuentes producen carbón elemental (grafito), o bien, hasta 50 % de carbón orgánico (Johnson, De Foy, Zuberi *et ál.*, 2006). Esta condición permite que una partícula carbonosa sea o no soluble en agua o en un solvente orgánico. El carácter hidrofílico o hidrofóbico es importante porque de esto depende la permanencia y eliminación de la partícula en la atmósfera; el primero se mantendrá suspendido menor tiempo que el segundo (Johnson, Zuberi, Molina *et ál.*, 2005).

Referente a su composición química, el carbono domina en 85-95 %; el oxígeno, 3-8 %; y el hidrógeno, 1-3 %. El proceso de combustión puede variar la cantidad de oxígeno contenido en el carbono negro, de tal modo que entre más eficiente sea el proceso de combustión hay una mayor abundancia de oxígeno, lo que origina una superficie más irregular, incrementando la reactividad de la partícula (Andreae y Gelencsér, 2006).

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se analiza la calidad del aire respecto a cinco contaminantes criterio, entre estos se encuentran las partículas  $PM_{2.5}$ . Según los estudios realizados por Salcedo, Onasch, Dzepina *et ál.* (2006) y Aiken, Salcedo, Cubison *et ál.* (2009), en esta metrópoli la composición elemental de las  $PM_{2.5}$ , está representada por 11-12 % de carbono negro, 10-11 % de sulfatos, 10 % de nitratos y 52-55 % de sustancias orgánicas.

Una de la principales características físicas del carbono negro es su *coeficiente de absorción* ( $\alpha_\lambda$ ) el cual define el grado de absorción de energía, en este caso, de radiación electromagnética (luz) y que está estrechamente relacionado con el *forzamiento radiativo*<sup>1</sup>, del cual nos referiremos más adelante. Los valores de  $\alpha_\lambda$  de las partículas carbonosas tienen un rango de  $2 \text{ m}^2/\text{g}$  a  $25 \text{ m}^2/\text{g}$  a 550 nanómetros (nm) de longitud de onda. Mediciones realizadas en la ZMVM revelan que los valores de  $\alpha_\lambda$  son de  $8\text{-}10 \text{ m}^2/\text{g}$  a 550 nm (Bernard, Kassianov, Ackerman *et ál.*, 2005).

## 1.2. Participación del carbono negro en el clima global

El carbono negro contribuye al cambio climático de dos maneras: en forma directa absorbe la radiación solar y, luego, la transforman en calor; y de forma indirecta, reduce la reflectividad de la nieve lo que origina su derretimiento; por lo que la manera es diferente a como lo hacen los GEI, los cuales absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, atrapando la energía calorífica en la atmósfera. A continuación, damos una explicación más amplia.

Los aerosoles tienen un papel importante tanto en la visibilidad como en la temperatura de la atmósfera debido a su propiedad de dispersión y absorción de la radiación solar. Mientras que la dispersión depende principalmente del tamaño de la partícula; la absorción, depende de la composición química. Aquellos aerosoles que no tienen una absorción significativa en el espectro de los rayos ultravioleta UV-B, esparcen la radiación solar y provocan enfriamiento. Otro tipo de aerosoles puede tanto dispersar como absorber energía. Este es el caso del carbono negro, por una parte, tiene la capacidad de reducir la cantidad de los rayos del sol que llegan a la superficie de la tierra hasta 10 %, y por otra, de incrementar la cantidad de energía absorbida hasta 50 % (Marley, Gaffney, Tackett *et ál.*, 2009).

En años recientes la comunidad científica se ha interesado en el carbono negro pues pasó de ser un contaminante del aire a un factor determinante en el calentamiento global. Según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), el carbono negro es un factor que

---

<sup>1</sup> El forzamiento radiativo se refiere al cambio en la energía que entra o sale de la troposfera. Dicho cambio puede deberse a las variaciones en la composición gaseosa de la atmósfera o a cambios en el aporte externo de energía solar. Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento.

contribuye al forzamiento radiativo positivo el cual causa el calentamiento global. La mayor parte de este forzamiento proviene de la absorción directa de energía lumínica en la atmósfera que luego se transforma en calor. Mediante este efecto, el carbono negro es responsable de 0.34 watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) de forzamiento radiativo promedio a nivel mundial, de los cuales 0.22  $W/m^2$  se deben al uso de combustibles fósiles y 0.12  $W/m^2$  a la quema de biomasa y otras fuentes (IGSD, 2009).

De acuerdo con el Internacional Council on Clean Transportation (ICCT) el efecto de calentamiento puede incrementarse cuando el carbono negro se mezcla con otras partículas, como los sulfatos. Por el contrario, Bahner *et ál.* (2007) mencionan que el efecto neto de la mezcla de carbono negro con sulfatos, nitratos, carbón orgánico y polvo mineral resulta negativo, es decir, un forzamiento radiativo de  $-0.5 W/m^2$  (ICCT, 2009).

El IPCC sitúa al carbono negro como el tercer agente más importante de forzamiento radiativo positivo, después del  $CO_2$  y del  $CH_4$ . Algunos modelos consideran que el calentamiento global debido a este contaminante es de 0.3 a 0.4 °C, incluso menor, por lo que existe controversia a cerca de reducir el carbono negro como estrategia para mitigar el calentamiento global (Andreae y Gelencsér 2006).

Entre los efectos del forzamiento radiativo directo se incluyen no solamente aumentos en la temperatura sino además, modificaciones en los patrones de lluvia y en la visibilidad. Estas modificaciones en la temperatura y precipitación se deben a la corta estancia del carbono negro en la atmósfera la cual puede ser de 6 a 10 días, o hasta 3 semanas, dependiendo del proceso de combustión y de las condiciones geográficas y meteorológicas donde sucede la emisión (Bahner *et ál.*, 2007). Las emisiones de carbono negro pueden suprimir la convección en la atmósfera y estabilizarla de tal forma que obstruyen los patrones normales de precipitación. Luego, cuando éste se deposita, oscurece la superficie de la Tierra con lo cual reduce los patrones de evaporación que a su vez son el origen de la formación de las nubes.

El carbono negro también produce forzamiento positivo al modificar el albedo<sup>2</sup> de superficies brillantes como la nieve y el hielo. Sin contaminación, esas superficies reflejan 86 % de la energía solar hacia el espacio, pero las partículas carbonosas sobre estas superficies absorben una fracción importante de esa energía y la remiten como calor. Este hecho no sólo reduce la proporción de energía solar reflejada, sino que derrite el material gélido. Esta disminución en la reflectividad genera un círculo de retroalimentación que induce más calentamiento y derretimiento. El efecto global del carbono negro sobre el albedo de la nieve se calcula en 0.1  $W/m^2$  (ICCT, 2009). Los casos más alarmantes son los deshielos del océano Ártico y del Himalaya.

De acuerdo con Jacobo Espinoza, investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana, desde 1995 los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl han perdido 12 de sus glaciares, lo cual se lo atribuye al calentamiento global [sin olvidar el papel de la actividad volcánica]; y pronostica que dentro de 15 años todas sus zonas de hielo permanente desaparecerán.

---

<sup>2</sup> Se refiere a la fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto. A menudo se expresa como porcentaje. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras.

La importancia de estos glaciares radica en que los municipios de Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo obtienen agua a partir del deshielo, pero al disminuir su masa, los habitantes han tenido que enfrentar la falta de agua desde hace más de un año. Asimismo, comenta que entre el 2000 y el 2005, la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) registró una reducción de más de 800 millones de litros en los cinco sistemas hidráulicos que operan cerca de ambos volcanes, cuyo volumen de deshielo se redujo en más de 45 por ciento durante dicho periodo (Fernández, 2010).

Por su parte, Edmundo de Alba, miembro del IPCC; señala que la desaparición del hielo permanente en la Sierra Nevada y el Pico de Orizaba provocará un endurecimiento en la competencia del recurso hídrico en las comunidades cercanas, por eso el sector agrícola se verá aún más amenazado por los requerimientos de líquido en los centros de población y viceversa (Astorga, 2009).

### 1.3. Efectos en la salud humana

Los efectos de las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  están ampliamente documentados. Se sabe, por ejemplo, que la exposición a las partículas finas conduce a la inflamación de los pulmones, al incremento en la frecuencia de síntomas respiratorios como tos, dificultad para respirar y dolor en el pecho, así como a la disminución del volumen espiratorio forzado del primer segundo (VEF1), de la capacidad vital forzada y al incremento de las infecciones respiratorias y enfermedades del pulmón.

Existe evidencia de que en las zonas urbanas el carbono negro es carcinogénico porque contiene compuestos orgánicos tóxicos y metales pesados, por lo cual se considera un contaminante peligroso. Lo anterior se debe a la porosidad de las partículas de carbono negro y su amplia superficie de contacto. Éste puede adsorber una variedad de químicos durante el proceso de combustión, incluyendo hidrocarburos policíclicos aromáticos, los cuales son carcinogénicos o mutagénicos (Jiang, Marr, Dunlea *et ál.*, 2005; Johnson *et ál.*, 2005). De aquí la importancia del carbono negro por su capacidad de transportar sustancias peligrosas hasta los pulmones y poner en peligro la salud humana. En los Estados Unidos de América se estiman 125 mil casos al año de cáncer asociados a las partículas provenientes de la combustión de diesel (Bahner *et ál.*, 2007), entre tanto, en los países desarrollados hay anualmente 1.8 millones de muertes por exposición de carbono negro en intramuros. En esos países éste y otros contaminantes provenientes de la combustión incompleta son la cuarta causa de mortalidad después de la desnutrición, enfermedades venéreas e insalubridad (Grieshop, Reynolds, Kandlikar *et ál.*, 2009).

En el estudio de Gaudeman *et ál.* (2004) se relaciona la exposición de carbono negro proveniente de vehículos automotores con los efectos en la salud respiratoria de niños. Entre estos efectos está la reducción del VEF1. También se ha asociado con efectos en la salud cardiovascular, por ejemplo, Meter *et ál.* (2000) hallaron un incremento de arritmias cardiacas por exposición aguda (en Jansen, Larson, Koenig *et ál.*, 2005).

En los países en desarrollo el sector doméstico es una de las principales fuentes de emisión de carbono negro. Éste sector se refiere a fuentes de combustión a pequeña escala, como el calentamiento y cocción de alimentos, donde se utiliza leña, carbón, estiércol o grasa animal.

Una gran parte de la población de estos países vive bajo condiciones de pobreza por lo cual no tienen acceso a métodos o tecnología adecuados de combustión eficiente. Aunado a ello, la preparación de alimentos se realiza en cuartos pequeños y cerrados lo que aumenta la concentración de gases de combustión y partículas, dañando así la salud de mujeres y niños, quienes pasan más tiempo en esos lugares (Baron, Montgomery y Tuladhar 2009). En México, en los estados con población indígena, donde el uso de fogón abierto es común, las enfermedades respiratorias agudas constituyen la primera causa de mortalidad en menores de 5 años (Gutiérrez, 2009).

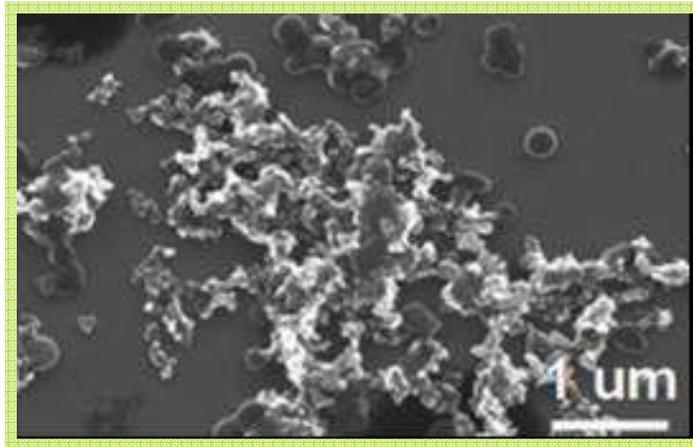


Figura 1. Muestra de una partícula de carbono negro recolectada en el tráfico vehicular de la ZMVM. Imagen de microscopio electrónico de barrido tomada de Johnson, Zuberi, Molina *et ál.* (2005).



## 2. Cuantificación de Carbono Negro en el Estado de México

### 2.1. Antecedentes

Los primeros trabajos sobre la química atmosférica en la ZMVM datan de 1958, cuando se detecta la presencia del ciclo fotoquímico del ozono estratosférico; en 1960 se realizan las primeras evaluaciones de la concentración de monóxido de carbono (CO) y CO<sub>2</sub>; en 1990 se realiza el Estudio Global de la Calidad del Aire (EGCA), para conocer los mecanismos de dispersión de los contaminantes, así como los procesos químicos involucrados; en 1997 se desarrolla la Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico (proyecto IMADA) la cual se enfocó a determinar la composición química y el origen de partículas y aerosoles; pero no es sino hasta el 2003, como parte del estudio MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations) que se derivan una serie de estudio referentes al carbono negro, de los cuales destaca lo siguiente.

Johnson y colaboradores (2005) investigaron las características de las partículas de hollín de 0.2 µm a 2 µm a partir de su composición química, tamaño y morfología; y encontraron que las partículas de hollín provenientes de las emisiones vehiculares contienen poco azufre, el cual a su vez proviene directamente del combustible, pero éste aumenta rápidamente debido a procesos complejos en presencia de sulfato de amonio.

Se han realizado estudios de monitoreo de carbono negro para medir su concentración en aire ambiente. En las delegaciones Merced y Coyoacán, en el Distrito Federal, Retama, Rivera, Aldape *et ál.* (2004) registraron concentraciones promedio de 1.3 µg/m<sup>3</sup> y 0.8 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente; también encontraron una correlación entre el carbono negro y los patrones de tráfico: los picos de concentración coinciden con las horas pico del tráfico vehicular. En la delegación Iztapalapa, Marley, Gaffney, Grams *et ál.* (2005) encontraron picos de concentración de hasta 20.5 µg/m<sup>3</sup> y valores promedio de 6 µg/m<sup>3</sup>, sin embargo estos valores disminuyen durante días festivos a 5.5 µg/m<sup>3</sup> (máximo) y 2 µg/m<sup>3</sup> (promedio). En la misma delegación Salcedo *et ál.* (2006) obtuvieron una concentración promedio de 3.4 µg/m<sup>3</sup> y máximos de 52.7 µg/m<sup>3</sup>.

Durante el estudio MILAGRO se realizaron vuelos aéreos sobre la cuenca del Valle de México en los cuales se siguieron plumas de incendios forestales a una altitud de 3.5 km a 5.4 km. Subramanian, Kok, Baumgardner *et ál.* (2010) encontraron en el poniente de la cuenca una concentración superior a 1 µg/m<sup>3</sup> de carbono negro; en el oriente, de 0.006 µg/m<sup>3</sup>; y en el sur, de 50 µg/m<sup>3</sup>, aquí mismo pero en los cerros con incendios forestales, la concentración fue de 1.041 µg/m<sup>3</sup>. Los investigadores determinaron una relación de 2.89 µg/m<sup>3</sup> de carbono negro por 1 ppm de CO, casi el triple de lo encontrado por Baumgardner, Kok y Ragal (2007) a nivel de superficie.

Marley *et ál.* (2005) y Salcedo *et ál.* (2006) mencionan que el humo de los incendios forestales proveniente de sitios tan alejados como la península de Yucatán o la quema de materia orgánica en los estados del centro del país puede contribuir significativamente con los niveles de carbono negro en la ZMVM.

En cuanto al volumen de emisión de carbono negro, Jiang *et ál.* (2005), por medio de estudios de “persecución”, estimaron que los vehículos automotores de la ZMVM aportan 1 700 toneladas por año (t/a); entre tanto, Baumgardner *et ál.* (2007) obtuvieron un volumen de 1 200 t/a mediante la correlación de las emisiones de CO. Por su parte, Páramo (2009) calculó para el Distrito Federal la cantidad de 1 545 t/a. Esta última cifra es similar a la estimada por la DGPCCA como parte del presente trabajo, la cual es de 1 885.31 t/a, lo que marca una diferencia de 22 %.

Los estudios realizados en la ZMVM consideran algunos de los municipios conurbados del Estado de México, por lo cual surgió la inquietud de conocer el aporte de carbono negro por los 59 municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle Cuautitlán-Texcoco (ZMVCT) y por los 22 de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT).

## 2.2. Procedimiento metodológico

Tomando como base los *Inventarios de emisiones de contaminantes criterio 2004*, tanto de la ZMVT como de la ZMVCT, se seleccionaron las diferentes categorías de las fuentes puntuales, de área y móviles, con el volumen estimado de partículas  $PM_{2.5}$  y de CO.

Para estimar el volumen de carbono negro a partir de las emisiones de  $PM_{2.5}$ , se aplicaron distintos porcentajes a las toneladas de cada categoría de fuente, los cuales fueron: 12 % a las fuentes puntuales y de área, 43 % a las locomotoras de arrastre; 27 % a los vehículos de gasolina; y 43 % a los vehículos de diesel. La proporción de carbono negro en las  $PM_{2.5}$  se tomó de Aiken *et ál.* (2009) y Battye, Boyer y Pace (2002).

Para conocer el volumen de carbono negro a partir de las emisiones de CO, todas las categorías de fuente se multiplicaron por un factor de 0.001 que es el valor obtenido por Baumgardner *et ál.* (2007) mediante la correlación de estos dos contaminantes. Este factor se seleccionó sobre el propuesto por Subramanian *et ál.* (2010) pues el primero representa una muestra de la emisión de una fuente específica; mientras que el otro, una muestra de la mezcla de gases y aerosoles proveniente de diversas fuentes.

Los volúmenes de carbono negro originados por separado se sumaron y se calculó la participación relativa. Los resultados se muestran en los cuadros 1 al 3 y en la gráfica 1.

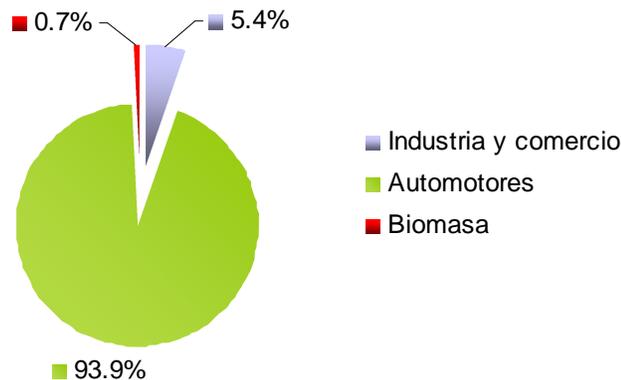
Para determinar la concentración promedio de carbono negro, se utilizó el promedio anual de concentración de CO registrado por las estaciones automáticas del Sistema de Monitoreo Atmosférico del Valle de México (SIMAT) ubicadas en el Estado de México, así como por las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca (RMA-T). Tomando en cuenta a Baumgardner *et ál.* (2007), se aplicó la equivalencia de 1 ppm de CO  $\cong$  1.012  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de carbono negro. Los resultados de los promedios anuales de concentración de la ZMVT y de la ZMVCT se muestran en los cuadros 4, 5, y 6 y en las gráficas 2, 3 y 4.

## 2.3. Resultados

### ◆ Identificación de fuentes de carbono negro y estimación de emisiones

En el Estado de México se emiten 1 684.71 t/a de carbono negro, de las cuales, a los vehículos automotores (fuentes móviles) les corresponde 93.9 %, a las industrias, comercios y servicios (fuentes fijas), 5.4 %; y a la quema de biomasa, 0.7 % (gráfica 1).

**Gráfica 1. Contribución porcentual de carbono negro por tipo de fuente en el Estado de México (2004)**



Fuente: cuadro 1.

La ZMVT emite 753.19 t/a, esto es 45 % del total, mientras tanto, la ZMVCT emite 931.52 t/a, lo cual corresponde al 55 % restante. En ambas zonas metropolitanas los vehículos automotores son la principal fuente de emisión de carbono negro, pero en la ZMVT su participación es mayor que en la ZMVCT, por el contrario, las fuentes fijas en esta última tienen una mayor contribución debido principalmente al mayor número de establecimientos industriales, pero sobre todo por la generación de energía eléctrica en las termoeléctricas Valle de México y Jorge Luque (cuadro 1).

Emisión anual de CN por tipo de fuente según zona metropolitana					Cuadro 1
Año 2004					
Tipo de fuente	ZMVT		ZMVCT		Suma (t/a)
	t/a	%	t/a	%	
Fijas	8.87	1.2	81.80	8.8	90.67
Móviles	741.95	98.5	839.83	90.2	1 581.78
Biomasa	2.36	0.3	9.89	1.1	12.25
<b>Total</b>	<b>753.19</b>	<b>100.0</b>	<b>931.52</b>	<b>100.0</b>	<b>1 684.71</b>

Fuente: DGPCCA (2007a, 2007b).

En la ZMVT, los vehículos particulares y los transportes de carga y de pasajeros participan con 84.4 % del total de las fuentes móviles. Respecto a las fuentes fijas, tanto la combustión habitacional como la comercial, así como la industria alimentaria y las locomotoras de arrastre, en conjunto aportan 73.2 % de éstas. Respecto a la quema de biomasa, los incendios forestales contribuyen con 78.5 %, le sigue en importancia la quema de materiales en los hornos artesanales para la fabricación de ladrillo rojo u “hornos ladrilleros” (cuadro 2).

<b>Emisión anual de carbono negro en la ZMVT por categoría de fuente</b>		<b>Cuadro 2</b>
<b>Año 2004</b>		
<i>Tipo de fuente/categoría</i>	<i>Emisión ( t/a)</i>	<i>% respecto al tipo de fuente</i>
<b>Fuentes fijas</b>	<b>8.87</b>	<b>100.0</b>
Alimentaria	1.55	17.5
Textiles	0.33	3.7
Madera y sus productos	0.01	0.1
Papel e impresión	0.04	0.4
Químicas	0.25	2.9
Productos minerales no metálicos	0.01	0.1
Metálica básica	0.01	0.1
Maquinaria y equipo	0.41	4.6
Otras industrias manufactureras	0.63	7.0
Combustión comercial	1.96	22.1
Combustión industrial	0.44	5.0
Combustión habitacional	1.98	22.3
Operación de aeronaves	0.24	2.7
Locomotoras de arrastre (foráneas)/patio	1.00	11.3
<b>Fuentes móviles</b>	<b>741.95</b>	<b>100.0</b>
Particulares	356.49	48.0
Taxi	20.84	2.8
Pick up	81.48	11.0
Combi	10.62	1.4
Motocicletas	1.82	0.2
Transporte de pasajeros	81.90	11.0
Transporte de carga	188.81	25.4
<b>Quema de biomasa y otros</b>	<b>2.36</b>	<b>100.0</b>
Incendios forestales	1.86	78.5
Hornos ladrilleros	0.51	21.4
Rellenos sanitarios	0.00	0.1
<b>Total</b>	<b>753.19</b>	

Fuente: DGPCCA, cálculos propios.

A diferencia de la ZMVT, en la ZMVCT los autos particulares y el transporte de carga aportan 85.4 % del total de las fuentes móviles. Dentro de las fuentes fijas, como se había comentado anteriormente, el consumo de combustible para la generación de energía eléctrica por medio de termoeléctricas, es la principal fuente de emisión en el Valle de México (35.5 %), le sigue en importancia, la combustión habitacional y las locomotoras de arrastre, entre las dos aportan 26.9 % del total de estas fuentes.

Con relación a la quema de biomasa, los incendios forestales también resultan ser la principal fuente de carbono negro aunque en menor proporción que en la ZMVT pues las ladrilleras tienen una contribución mayor, la cual es de 46 %. Esto se debe, en parte, a que en la ZMVCT hay una mayor producción de tabique que en el Valle de Toluca la cual difiere por un factor de 1.2 (cuadro 3).

<b>Emisión anual de carbono negro en la ZMVCT por categoría de fuente</b>		<b>Cuadro 3</b>
<b>Año 2004</b>		
<i>Tipo de fuente/categoría</i>	<i>t/a</i>	<i>% del total</i>
<b>Fuentes fijas</b>	<b>81.80</b>	<b>100.0</b>
Alimentaria	1.01	1.2
Textil	0.64	0.8
Madera y sus productos	0.12	0.1
Papel e impresión	3.43	4.2
Química	4.23	5.2
Productos minerales no metálicos	4.05	5.0
Metálicas básicas	0.80	1.0
Maquinaria y equipo	8.67	10.6
Otras industrias manufactureras	2.27	2.8
Termoeléctricas	29.04	35.5
Combustión comercial	<b>2.76</b>	3.4
Combustión industrial	2.71	3.3
Combustión habitacional	11.24	13.7
Locomotoras de arrastre (foráneas)/patio	10.82	13.2
<b>Fuentes móviles</b>	<b>839.83</b>	<b>100.0</b>
Particular	583.74	69.5
Taxis	3.59	0.4
Pick Up	55.91	6.7
Combi	<b>17.97</b>	2.1
Motocicletas	3.43	0.4
Transporte de pasajeros	41.35	4.9
Transporte de carga	133.85	15.9
<b>Quema de biomasa y otros</b>	<b>9.89</b>	<b>100.0</b>
Incendios forestales	5.32	53.8
Hornos ladrilleros	4.55	46.0
Rellenos sanitarios	0.02	0.2
<b>Total</b>	<b>931.52</b>	

Fuente: DGPCCA, cálculos propios.

Otras fuentes de carbono negro identificadas pero que sus emisiones no fueron cuantificadas son la quema para la preparación de terrenos de cultivo, las chimeneas domésticas para calefacción; las cocinas rudimentarias o fogones de leña, los puestos de comida al “carbón”, y el consumo por persona de carbón mineral para uso doméstico.

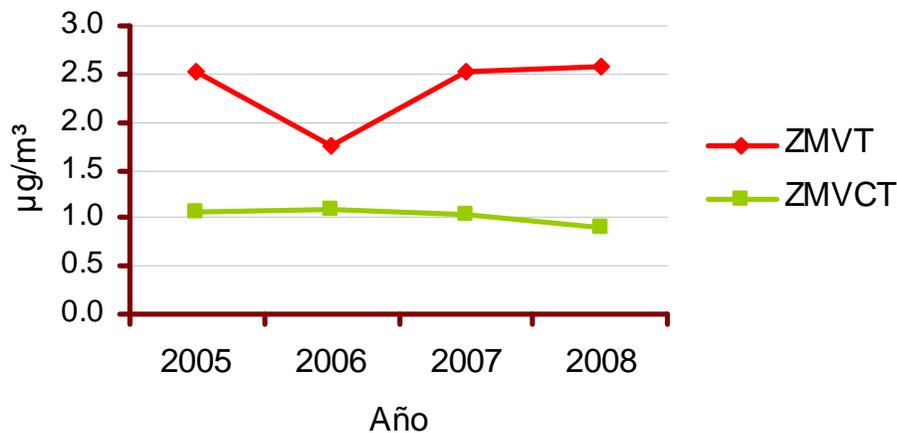
♦ *Promedio anual de concentración de carbono negro*

Los promedios anuales de concentración de carbono negro de la ZMVT superan a los de la ZMVCT por un factor de 2.3. Asimismo, el rango entre los valores máximos y mínimos para la ZMVT es de 0.78 y para la ZMVCT de 0.2. Estas diferencias tienen su explicación en la flota vehicular más reciente, en los programas más experimentados y en las medidas más estrictas aplicadas en la ZMVCT. Por otra parte, se observa que en la ZMVT el promedio de concentración durante el periodo 2005-2008 se mantiene estable, entre 2.53 y 2.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por el contrario, en la ZMVCT se aprecia una mínima tendencia a la baja pues pasa de 1.05 a 0.09  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (cuadro 4).

Promedio anual de carbono negro según zona metropolitana Microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Periodo 2005-2008			Cuadro 4
Año	ZMVT	ZMVCT	
2005	2.53	1.05	
2006	1.75	1.10	
2007	2.53	1.03	
2008	2.58	0.90	
<b>Promedio</b>	<b>2.35</b>	<b>1.02</b>	

Fuente: DGPCCA con base en Baumgardner *et ál.* (2007) y con datos de la RAMA-T.

Gráfica 2. Promedio anual de carbono negro por zona metropolitana (2005-2008)



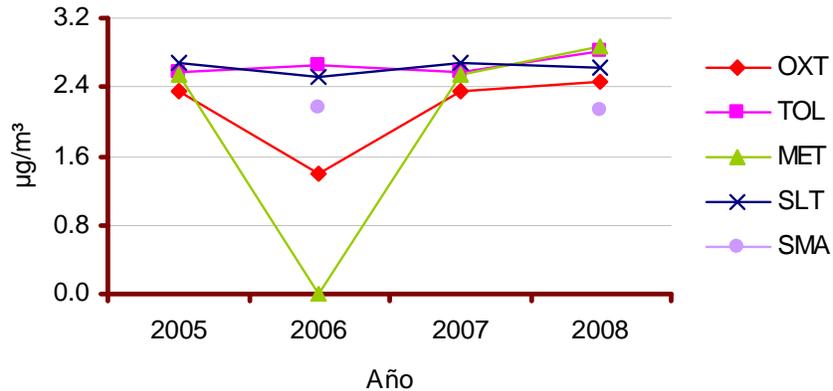
Fuente: cuadro 4.

De acuerdo con los promedios anuales de concentraciones de carbono negro calculados a partir de los datos de las estaciones de monitoreo de la RAMA-T, se advierte que la estación SLT, en el norte, como la estación TOL, en el centro de la ZMVT, tienen los valores más altos, con excepción de la estación MET la cual obtuvo el máximo promedio durante el 2008 (cuadro 5).

Promedio anual de la concentración de carbono negro en la ZMVT Microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Periodo 2005-2008						Cuadro 5
Estación-localización	Clave	2005	2006	2007	2008	
Aeropuerto (norte)	AER	SD	SD	SD	SD	
San Cristóbal H. (norte)	SCH	SD	SD	SD	SD	
San Lorenzo T. (norte)	SLT	2.67	2.51	2.67	2.62	
Toluca Centro (centro)	TOL	2.56	2.66	2.56	2.82	
Oxtotitlán (centro)	OXT	2.36	1.39	2.36	2.45	
Metepec (sur)	MET	2.53	0.00	2.53	2.87	
San Mateo Atenco (sur)	SMA	SD	2.17	0.00	2.13	

Fuente: DGPCCA con base en Baumgardner *et ál.* (2007) y con datos de la RAMA-T.

**Gráfica 3. Promedio anual de carbono negro en la ZMVT según estación de monitoreo**



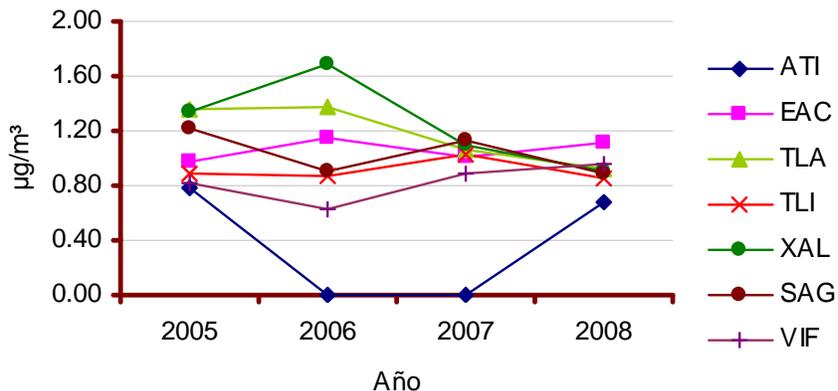
Fuente: cuadro 5.

En cuanto a los promedios anuales más altos de concentración para la ZMVCT destacan, por un lado, las estaciones TLA y ATI, dentro de la región noroeste (NO); y por el otro, las estaciones XAL y SAG en el noreste (NE). Además, se observa que las concentraciones son mayores en la zona NE que en la NO (cuadro 6).

Promedio anual de la concentración carbono negro en la ZVMCT Microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) Periodo 2005-2008					Cuadro 6
Estación-localización	Clave	2005	2006	2007	2008
Atizapán (NO)	ATI	0.79	0.00	0.00	0.68
Enep Acatlán (NO)	EAC	0.98	1.15	1.01	1.10
Tlalnepantla (NO)	TLA	1.35	1.38	1.06	0.92
Tultitlán (NO)	TLI	0.89	0.87	1.02	0.85
Xalostoc (NE)	XAL	1.34	1.68	1.09	0.90
San Agustín (NE)	SAG	1.21	0.90	1.12	0.89
Villa de las Flores (NE)	VIF	0.81	0.63	0.89	0.96

Fuente: DGPCCA con base en Baumgardner *et ál.* (2007) y con datos del SIMAT

**Gráfica 4. Promedio anual de carbono negro en la ZMVCT según estación de monitoreo**



Fuente: cuadro 6.



### 3. Propuesta de Acciones de Mitigación

Varios investigadores y organismos internacionales están cada vez más convencidos de que abatir las emisiones de carbono negro permitirá conseguir beneficios más rápidos de los que generaría una estrategia enfocada sólo al CO<sub>2</sub> u otros GEI (véase a Baron *et ál.*, 2009; Bice, Eil, Habib *et ál.*, 2009; y a Grieshop *et ál.*, 2009). Desde 1950 muchos países han reducido considerablemente sus emisiones de carbono negro, sobre todo, aquellas provenientes de los combustibles fósiles, lo cual ha resultado en una mejora de la salud pública. Y es que el carbono negro forma parte de un reducido grupo de agentes de forzamiento climático de corta vida, por esa razón, la implementación de controles sobre las emisiones continuas producirán una reducción más rápida de las concentraciones de este contaminante en la atmósfera (ICCT, 2009; IGSD, 2009).

La tecnología para reducir de forma drástica el carbono negro ya existe o está en desarrollo, la cual además, trae importantes cobeneficios en materia de salud. Entre esta tecnología está, por ejemplo, los filtros de partículas para vehículos de diesel los cuales tienen una eficiencia de 90 % en la retención de partículas, no obstante, se requiere de combustible de ultra bajo azufre el cual aún no está ampliamente disponible. Respecto a la combustión en el sector doméstico, se están implementando programas dirigidos a mejorar el desempeño o eficiencia de las estufas tradicionales, de las técnicas para la cocción de alimentos y de las quemadas en la agricultura (véase a Clare, 2009; Grieshop *et ál.* 2009; y al IGSD, 2009).

De acuerdo con Clare (2009), el desarrollo de leyes nacionales, reglamentos y normas sobre carbono negro, así como su estricto cumplimiento puede proporcionar cierta mejoría respecto al calentamiento global, pero teniendo en cuenta que las emisiones a nivel global continúan aumentando, también se requiere la participación de todos los niveles de la sociedad y de alianzas internacionales.

En México, el uso de combustibles fósiles en el transporte, la quema de leña para el calentamiento y cocción de alimentos, los incendios forestales y la quema de esquileo en la agricultura aportan 85 % de las emisiones de carbono negro (Contreras, 2009). En el Estado de México, como se pudo identificar, las principales fuentes de emisión son los autos particulares, el transporte de carga, las termoeléctricas, la combustión habitacional, las locomotoras de arrastre, los incendios forestales y hornos ladrilleros. Esto nos brinda una idea de hacia dónde deben dirigirse las políticas y medidas para controlar y reducir las emisiones de este material carbonoso.

Debido a que el tema del carbono negro es muy reciente, en México aún no se cuenta con programas específicos para la reducción de este contaminante, sin embargo, desde la década de los noventa se han instrumentado programas y medidas para controlar y reducir la emisión de las partículas PM<sub>10</sub>, del CO y del SO<sub>2</sub>, lo que de manera indirecta contribuye al abatimiento de carbono negro y de los GEI.

A continuación se comentan una serie de recomendaciones para abatir las emisiones del carbono negro en el Estado de México con base en lo propuesto por Baron *et ál.* (2009), Bice *et ál.* (2009), IGSD (2009), Contreras (2009), Gutiérrez (2009) y Páramo (2009).

- En las viviendas donde se utilizan fogones, se puede mejorar la eficiencia del combustible mediante la reducción de su volumen para incrementar la relación superficie/volumen, así como utilizar ventiladores manuales para aumentar la cantidad de oxígeno y aumentar la eficiencia de la combustión. Aunque lo mejor es cambiar éstos por cocinetas rústicas. Al mejorar las prácticas tradicionales de cocción se obtienen reducciones en CO y PM<sub>2.5</sub> (Gutiérrez, 2009).
- Respecto a las cocinas y calentadores de agua convencionales, la recomendación es mejorar la flama mediante la calibración de los quemadores y utilizar combustibles más limpios como el gas natural en lugar de gas L. P. Igualmente se podría cambiar la estufa y el calentador de agua por aquellos con tecnología más reciente. Con esta acción se tendrá adicionalmente un ahorro en el consumo de combustible.
- Limitar el uso de chimeneas domésticas para calefacción y otras formas de quema de biomasa en zonas urbanas. Dicha limitante podría consistir en la aplicación de un impuesto ambiental al uso de chimeneas de leña, el cual se dejaría de aplicar si se utiliza gas LP o natural en vez de leña o se cambia la chimenea por un sistema de calefacción más amigable con el ambiente.
- En la industria, los comercios, los servicios y las termoeléctricas, se requiere fortalecer los programas de inspección y vigilancia, la autorregulación, el control de emisiones mediante programas de mantenimiento preventivo-correctivo de los equipos de combustión, además de promover el uso de combustibles más limpios o energías alternativas y de proponer una normatividad más estricta.
- Promover nueva tecnología de control de emisiones en los vehículos de diesel, por ejemplo, catalizadores de oxidación de diesel (DOC) con una eficiencia de 30-40 % en la reducción de partículas y de 70 % en CO e hidrocarburos (HC), o bien, los filtros de partículas de diesel (DPF) con eficiencia de 90 % en la retención de partículas, los cuales requieren forzosamente el uso de diesel de ultra bajo azufre –DUBA– (15 ppm o menos), en México el Diesel Sin tiene 300 ppm. También existe un filtro aún más reciente conocido como *filtro parcial* o *de flujo*, el cual no atrapa las partículas, sino que las oxida mediante catalizadores. Este filtro se está haciendo cada vez más popular porque no requiere de DUBA y es capaz de eliminar 40-70 % de las partículas (IGSD, 2009)
- Promover la sustitución paulatina de vehículos de gasolina por vehículos híbridos (gasolina-eléctricos). Esta medida, al reducir la emisión de HC y de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), eliminaría la formación de ciertos aerosoles con potencial de enfriamiento, por lo cual el beneficio neto del carbono negro se reduciría a la mitad, pero habría un impacto positivo en la salud humana (IGSD, 2009).
- Mejorar la calidad de los combustibles para automotores mediante la reducción del contenido de azufre en el diesel y la gasolina. Esto permitirá, por ejemplo, el uso de los filtros DPF en vehículos de diesel. Es importante señalar que el escenario tendencial a futuro indica un incremento en el número de vehículos y en los kilómetros recorridos; para el 2020 en la ZMVM se generarán 28.3 de viajes tan sólo en días laborables.

- Revisar el método de opacidad de humo al que se refiere la Norma Oficial Mexicana NOM-045-SEMARNAT-1996 “que establece los límites máximos permisibles de opacidad de humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel o mezclas que incluyan diesel como combustible”. Dicho método es un indicador del mantenimiento del motor mediante una medición indirecta.
- Renovación de la flota vehicular de transporte público (microbuses y taxis). En opinión de Jiang, investigador del Instituto Politécnico de Virginia, EE. UU., en la ZMVM es posible reducir 50 % la emisión de carbono negro mediante la eliminación de los vehículos más contaminantes los cuales representan la quinta parte de la flota vehicular, aunque esto tendría un impacto mínimo en los NO<sub>x</sub> y en los compuestos orgánicos volátiles (COV) – citado por Páramo, 2009 –.
- Transporte limpio y eficiente. La emisiones de carbono negro y otros contaminantes atmosféricos se pueden reducir indirectamente con la implantación de buenas prácticas de manejo en el transporte de carga y de pasajeros, con un programa de mantenimiento preventivo y correctivo de las unidades, con la adecuada logística y movilidad del transporte público de pasajeros, y por medio de la promoción de unidades de mediana y alta capacidad que utilicen combustibles limpios.
- Mantener las campañas de control de incendios forestales. El reto consiste, no sólo combatir los incendios dentro del territorio estatal, sino también a nivel nacional, pues hay que recordar el alcance y contribución que tienen las emisiones de los incendios generados en entidades de la república como Yucatán, Quintana Roo y Oaxaca, en la carga de contaminantes de la cuenca del Valle de México (véase Marley *et ál.*, 2005; Salcedo *et ál.*, 2006; y Kozlov, Panchenko, Yausheva, 2005). También se requiere optimizar la difusión y aplicación de la norma oficial mexicana NOM-015-Semarnat/Sagarpa-1997, que regula el uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios, así como complementarla con otro tipo de instrumentos de regulación.
- Controlar las quemadas de biomasa al aire libre, mediante la aplicación estricta de los bandos municipales. Se presenta como un reto interesante, por ejemplo, controlar o regular las emisiones provenientes de los puestos de comida en la vía pública en donde se preparan alimentos al “carbón”. Este tipo de actividades se consideran fuentes de área, pues por definición consisten en aquellas que por unidad emitan bajos volúmenes de contaminantes pero que en conjunto su contribución puede ser significativa.
- Modificar las prácticas de cultivo. Cabe señalar que hasta ahora ha sido difícil establecer planes capaces de regular esta fuente en las zonas rurales de la ZMVM debido a los usos y costumbres y prácticas ancestrales heredadas con ciertas distorsiones.
- Como parte de la política ambiental se sugiere fortalecer los inventarios de emisiones y monitoreo atmosférico en los cuales se incluya al carbono negro, asimismo, se requieren estudios sobre exposición personal e intramuros para determinar los efectos en salud.
- Incluir medidas complementarias y específicas para el control y reducción de las emisiones de GEI y del carbono negro en los programas metropolitanos para mejorar la calidad del aire (Proaires). Como se mencionó anteriormente, las medidas instrumentadas

mediante los Proaires para reducir y controlar las emisiones de contaminantes criterio, como el ozono y las partículas, han disminuido indirectamente las emisiones de carbono negro, no obstante sería oportuno contar con medidas específicas, es decir, dirigidas directamente al abatimiento de este contaminante.

- Ya sea por iniciativa del gobierno o en conjunto con la banca comercial, desarrollar esquemas de financiamiento y de inversión para adquirir la nueva tecnología, así como para elaborar e instrumentar programas específicos para abatir las emisiones de carbono negro.

La estrategia y medidas orientadas hacia la reducción en la quema de combustibles y biomasa tendrá un impacto directo en la disminución del carbono negro, pero además tendrá cobeneficios inmediatos en la calidad del aire, entre los que se contabilizan: la disminución de las concentraciones de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , de CO y de  $NO_x$ , la disminución de aerosoles lo que a su vez evitará la formación de precursores de ozono y mejorará la visibilidad; y como resultado de esto, habrá un mejor estado de salud de los habitantes del Estado de México, en cuanto a enfermedades respiratorias se refiere.

## Conclusiones

El presente informe tuvo como objetivos: a) estimar el volumen de emisión de carbono negro proveniente de las fuentes identificadas en el Estado de México; b) calcular su concentración en el aire ambiente; y c) sugerir medidas para mitigar las emisiones de carbono negro.

Se identificaron 30 fuentes de emisión de las cuales cinco no están contempladas en los inventarios de emisiones. Las fuentes más representativas debido a su volumen de emisión son los autos particulares, el transporte de carga, las termoeléctricas, la combustión habitacional, las locomotoras de arrastre, los incendios forestales y los hornos ladrilleros. En conjunto estas fuentes aportan 78.9 % de las emisiones totales de carbono negro.

En el Estado de México se emiten al año 1 684.71 toneladas de carbono negro. La ZMVT aporta 753.19 t/a (45 % del total) mientras que la ZMVCT 931.52 t/a (55 % restante). Por tipo de fuente, las móviles contribuyen con 94 %, las fijas con 5 %, y la quema de biomasa con menos de 1 %.

Se considera que el volumen de 1 684.71 t/a es congruente con lo obtenido en otros estudios referidos a la ZMVM (1 700 – 1 200 t/a) y al Distrito Federal (1 545 t/a). Esta última cifra es semejante a la calculada por la DGPCCA como parte del presente trabajo, la cual es de 1 885.31 t/a, lo que da una diferencia de 22 %.

Se advierte de que nuestros resultados pueden variar según los índices o factores de emisión que se tomen en cuenta, sobre todo, para los vehículos de diesel y los incendios forestales. Asimismo, el volumen de emisión calculado está subvalorado porque dos fuentes no cuentan con volúmenes de  $PM_{2.5}$ ; éstas son los hornos ladrilleros y la operación de aeronaves. Del mismo modo, no se contabilizó el volumen de las siguientes fuentes: quemas en la agricultura, chimeneas para calefacción; fogones, puestos de comida al “carbón” y el consumo per cápita de carbón.

Con relación a la concentración de carbono negro en el aire ambiente durante el periodo 2005-2008, la ZMVT muestra promedios más altos que la ZMVCT:  $2.5 \mu g/m^3$  para la primera y  $1.02 \mu g/m^3$  para la segunda. Además en la ZMVT los promedios anuales se mantienen estables, entre tanto, en la ZMVCT se observa una tendencia a la baja. Las regiones Norte y Centro de la ZMVT tienen los valores más altos de concentración; para el caso de la ZMVCT, los tiene la Noreste.

Se espera que las medidas para abatir las emisiones de carbono negro propuestas aquí se tomen en cuenta para el diseño e instrumentación de nuevos programas de gestión de la calidad del aire, pues además de tener beneficios en la reducción de otros contaminantes como las partículas  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$  y  $CO$ , también los hay en la salud humana.

El presente trabajo representa un primer esfuerzo en la estimación de este novedoso contaminante, el cual será necesario actualizar y mejorar en cuanto a la metodología empleada y el nivel de detalle, incluyendo otras fuentes de emisión.



## Bibliografía

- Aiken, A. C.; Salcedo, D.; Cubison, M. J.; Huffman, J. A.; DeCarlo, P. F.; Ulbrich, I. M.; Docherty, K. S.; Sueper, D.; Kimmel, J. R.; Worsnop, D. R.; Trimborn, A.; Northway, M.; Stone, E. A.; Schauer, J. J.; Volkamer, R. M.; Fortner, E.; De Foy, B.; Wang, J.; Laskin, A.; Shutthanandan, V.; Zheng, J.; Zhang, R.; Gaffney, J.; Marley, N. A.; Paredes, G.; Arnott, W. P.; Molina, L. T.; Sosa, G.; Jiménez, J. L. (2009). Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) –Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment. *Atmos. Chem. Phys.* (9), 6633–6653
- Andreae, M. O. And Gelencsér, A. (2006) Black carbon or brown carbon? The nature of light absorbing carbonaceous aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* (6), 3131–3148
- Astorga, O. [corresponsal] (2009, 17 de mayo). La crisis del agua se oculta bajo las faldas. *Nuevo Excélsior* (México).
- Bahner, M. A.; Weitz, K. A.; Zapata, A.; DeAngelo, B. (2007). *Use of black carbon and organic carbon inventories for projections and mitigation analysis*. Technical paper. RTI International and U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division.
- Baron, R. E.; Montgomery, W. D.; Tuladhar, S. D. (2009) *An analysis of black carbon mitigation as a response to climate change*. Copenhagen Concensus Center, Denmark.
- Battye, W.; Boyer, K.; Pace, T. G. (2002). *Methods for improving global inventories of black carbon and organic carbon particulates*. Technical document by EC/R Incorporated for U. S. Environmental Protection Agency. USA.
- Baumgardner, D.; Kok, G. L.; and Ragal, G. B. (2007). On the diurnal variability of particle properties related to light absorbing carbon in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* (7), 2517–2526
- Bernard, J. C.; Kassianov, E. I.; Ackerman, T. P.; Frey, S.; Johnson, K.; Zuberi, B.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Gaffney, J. S.; Marley, N. A. (2005) Measurements of black carbon specific absorption in the Mexico City Metropolitan Area during the MCMA 2003 Field Campaign. *Atmos. Chem. Phys.* (5), 4083-4113
- Bice, K.; Eil, A.; Habib, B.; Heijmans, P.; Kopp, R.; Nogues, J.; Norcross, F.; Sweitzer-Hamilton, M.; Whitworth, A. (2009). *Black carbon, a review and policy recommendations*. Woodrow Wilson School of Public & International Affairs, Princeton University, USA.
- Clare, D. (2009). *Reducing black carbon*. State of the World 2009. En Worldwatch Intitute <[www.worldwathc.org](http://www.worldwathc.org)> (15 de abril del 2010)
- Comisión Federal de Electricidad (2009) *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2009-2018*. CFE Subdirección de Programación. México.
- Contreras, A. M. (2009). *Acciones para reducir la emisión de carbono negro en México*. Taller Internacional sobre Carbono Negro en América Latina. Ciudad de México, México.
- DGPCCA [Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica] (2007a). *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2004*. Secretaría del Medio Ambiente. Informe técnico. Estado de México.
- DGPCCA (2007b). *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle Cuautitlán-Texcoco 2004*. Secretaría del Medio Ambiente. Informe técnico. Estado de México.

- Fernández, E. [corresponsal] (2010, 8 de abril). Popo e Izta pierden 12 glaciares en 15 años. *El Universal* (México).
- Genera anualmente 17 millones de toneladas de dióxido de carbono Petacalco, la central carboeléctrica más contaminante de la República (2008, 27 de junio). La Jornada Michoacán <[www.lajornadamichoacan.com.mx/2008/06/27/index.php?section=finanzas&article=009n2fin](http://www.lajornadamichoacan.com.mx/2008/06/27/index.php?section=finanzas&article=009n2fin)> (27 de abril del 2010).
- Grieshop, A. P.; Reynolds, C. C. O.; Kandlikar, M.; Dowlatabadi, H. (2009). A black carbon mitigation wedge. Commentary in *Nature Geoscience*, (2), 553-5534
- Gutiérrez, V. J. (2009). *El estado de las políticas de control en México, experiencias en el monitoreo y evaluación ambiental*. Taller Internacional sobre Carbono Negro en América Latina. Ciudad de México, México.
- ICCT [Internacional Council on Clean Transportation] (2009). *El conocimiento científico actual sobre los impactos del carbono negro en el cambio climático y las estrategias recomendadas para reducir las emisiones. Una síntesis para la toma de decisiones*. Autor. Manuscrito.
- IGSD [Institute for Governance & Sustainable Development] (2009). *Reducing black carbon may be the fastest strategy for slowing climate change*. IGSD/INECE Climate Briefing Note. En: IGSD <<http://www.igsd.org/blackcarbon/index.php>> (15 de abril del 2010)
- Jansen, K. L.; Larson, T. V.; Koenig, J. Q.; Mar, T. F. Fields, C.; Stewart, J.; Lippmann, M. (2005). Associations between health effects and particulate matter and black carbon in subjects with respiratory disease. *Environmental Health Perspectives* (113), 12. 1741–1746
- Jiang, M.; Marr, L. C.; Dunlea, E. J.; Herndon, S. C.; Jayne, J. T.; Kolb, C. E.; Knighton, W. B.; Rogers, T. M.; Zavala, M.; Molina, L. T. And Molina, M. J. (2005). Vehicle fleet emissions of black carbon, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other pollutants measured by a mobile laboratory in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* (5), 3377–3387
- Johnson, K. S.; Zuberi, B.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Iedema, M. J.; Cowin, J. P.; Gaspar, D. J.; Wang, C.; Laskin, A. (2005). Processing of soot in an urban environment: case study from the Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Chem. Phys.*, (5), 3033–3043
- Johnson, K. S.; De Foy, B.; Zuberi, B.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Xie, Y.; Laskin, A.; Shutthanandan, V. (2006). Aerosol composition and source apportionment in the Mexico City Metropolitan Area with PIXE/PESA/STIM and multivariate analysis. *Atmos. Chem. Phys.* (6), 4591–4600, 2006
- Kozlov, V. S. ; Panchenko, M. V.; Yausheva, E. P. (2005). *Relative content of black carbon in submicron aerosol as a sign of the effect of forest fire smokes*. Fifteenth ARM Science Team Meeting Proceedings, Daytona Beach, Florida. USA.
- Marley, N. A.; Gaffney, J. S.; Grams, B. R.; Hernandez, U.; Frederick, J. E.; Barzyk, T. (2005). *Black carbon in urban areas: Measurements on holidays demonstrate the impact of diesel soot*. Presented at: 7th Conf. On Atmospheric Chemistry, American Meteorological Society.
- Marley, N. A.; Gaffney, J. S.; Ramos, R.; Cárdenas, B. (2007). Comparison of measurements of peroxyacyl nitrates and primary carbonaceous aerosol concentrations in Mexico City determined in 1997 and 2003. *Atmos. Chem. Phys.* (7), 2277–2285

- Marley, N. A.; Gaffney, J. S.; Tackett, M.; Sturchio, N. C.; Heraty, L.; Martinez, N.; Hardy, K. D.; Marchany-Rivera, A.; Guilderson, T.; MacMillan, A.; Steelman, K. (2009). The impact of biogenic carbon sources on aerosol absorption in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.* (9), 1537–1549
- Páramo, J. V. H. (2009). *Estrategia de control de carbono negro en la Ciudad de México*. Taller Internacional sobre Carbono Negro en América Latina. Ciudad de México, México.
- Retama, A.; Rivera, O.; Aldape, F.; Flores, J. (2004). *Black carbon and fine particle  $PM_{2.5}$  elemental composition behavior in samples collected at two sampling sites in Mexico City*. X International Conference on Particle Induced X ray Emission and its Analytical Applications PIXE 2004, Portorož, Slovenia.
- Salcedo, D.; Onasch, T. B.; Dzepina, K.; Canagaratna, M. R.; Zhang, Q.; Huffman, J. A.; De Carlo, P. F.; Jayne, J. T.; Mortimer, P.; Worsnop, D. R.; Kolb, C. E.; Johnson, K. S.; Zuberi, B.; Marr, V.; Volkamer, R.; Molina, L. T.; Molina, M. J.; Cardenas, B.; Bernabé, R. M.; Marquez, C.; Gaffney, J. S.; Marley, N. A.; Laskin, A.; Shutthanandan, V.; Xie, Y.; Brune, W.; Leshner, R.; Shirley, T.; Jimenez, J. L. (2006). Characterization of ambient aerosols in Mexico City during the MCMA 2003 campaign with Aerosol Mass Spectrometry: results from the CENICA Supersite. *Atmos. Chem. Phys.* (6), 925–946
- Subramanian, R.; Kok, G. L.; Baumgardner, D.; Clarke, A.; Shinozuka, Y.; Campos, T. L.; Heizer, C. G.; Stephens, B. B.; De Foy, B.; Voss, P. B.; Zaveri, R. A. (2010). Black carbon over Mexico: the effect of atmospheric transport on mixing state, mass absorption cross-section, and BC/CO ratios. *Atmos. Chem. Phys.* (10), 219–237

