

Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud en la Zona Metropolitana del Valle de México

Jimmy Alberto Ferrer Carbonell*
Roberto I. Escalante Semerena**

1. Introducción

El cuidado del medio ambiente es sin duda alguna uno de los temas que más ha ganado terreno en los últimos años dentro de las preocupaciones de los gobiernos y organismos internacionales; los eventos que a nivel mundial se desarrollan alrededor de la temática ambiental buscando el compromiso de los países así lo comprueban. Dentro de los diversos temas que envuelve el cuidado del medio ambiente, la contaminación atmosférica es uno de los más importantes, por los efectos que tiene sobre la salud de la población y los costos económicos que ello genera.

En los países en vías de desarrollo, el crecimiento de la población, el dinamismo de la economía y el aumento del parque vehicular son factores que inciden sobre el aumento en los niveles de contaminación atmosférica, superando en la mayoría de los casos los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). De acuerdo con esta organización, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, más de la mitad de las cuales recae en las poblaciones de los países en desarrollo. La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con una población cercana a los 20 millones de habitantes, se encuentra dentro del grupo de ciudades que padece de manera más intensa el problema de deterioro de la calidad del aire. A pesar que se han llevado a cabo programas y se han invertido grandes cantidades de dinero, el problema de la contaminación del aire en la ZMVM sigue presente, aun cuando se reconocen los avances conseguidos en algunos contaminantes.

En la ZMVM los contaminantes que mayor presión ejercen sobre la salud de las personas son el ozono y las partículas suspendidas menores a diez micras, al superar la normatividad ambiental en 59 y 9% de los días del año respectivamente. En este sentido, la medición del impacto de la contaminación atmosférica sobre los distintos efectos adversos a la salud es una tarea de primordial importancia, debido a que permite identificar los beneficios que se obtendrían al reducir los niveles de emisiones y de igual manera, priorizar

*Doctorante del programa de Posgrado en Economía, UNAM.

** Actualmente es Director de la Facultad de Economía de la UNAM, y Profesor adscrito a la División de Estudios de Posgrado de la misma institución.

las políticas públicas relacionadas con el control de la contaminación frente a otras inversiones en salud pública (Ostro, 1998).

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto que tienen el ozono (O₃) y las partículas suspendidas menores a diez micras (PM₁₀) sobre la salud de las personas en la ZMVM. El documento está estructurado en cinco secciones de las cuales la primera es esta introducción. La segunda sección presenta la evidencia internacional sobre los efectos que el ozono y PM₁₀ tienen sobre la salud de las personas, en la tercera se dan a conocer los resultados de las estimaciones, a partir de la metodología meta-análisis, con los cuales se cuantifican los efectos de aumentos en los dos contaminantes sobre la mortalidad y los diferentes resultados de la morbilidad. La cuarta sección presenta a partir de simulaciones de Monte Carlo el impacto que tendría una reducción de la contaminación sobre la salud de las personas en la ZMVM. Finalmente se dan a conocer en la quinta sección algunas consideraciones finales.

2. Evidencia internacional de los efectos sobre la salud

El crecimiento de los niveles de contaminación atmosférica en muchas ciudades del mundo ha despertado el interés por investigar la asociación entre el deterioro de la calidad del aire y sus posibles efectos en la salud humana. A lo largo de muchos años de investigación que lleva este tema se ha encontrado amplia evidencia sobre los efectos que la contaminación del aire tiene sobre la salud de la población, en términos tanto de mortalidad como de morbilidad. Los impactos varían de acuerdo a la exposición (aguda o crónica), el nivel de contaminación (alto o bajo), el contaminante que se considere, la edad de las personas, entre otros aspectos. Según la Organización Panamericana de la Salud, los efectos sobre la salud que se han encontrado están asociados en gran parte con los contaminantes provenientes de la quema de combustibles fósiles, incluidos el material particulado, ozono, bióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. En este sentido, las fuentes móviles hacen parte de los grandes responsables del deterioro de la calidad del aire que presentan la mayoría de las grandes ciudades en el mundo (entre ellas la ZMVM), lo cual está estrechamente relacionado con el crecimiento y antigüedad de la flota vehicular y con la calidad de los combustibles utilizados. En la Zona Metropolitana del Valle de México este problema se ve agravado aun más por las condiciones del clima y la topografía local (OPS, 2005), que hacen que la dispersión de los contaminantes sea reducida y por tanto que la población esté más expuesta a la alta contaminación que presenta esta zona.

La mortalidad es el efecto sobre la salud más estudiado en relación con la causalidad atribuida a la contaminación atmosférica. Se ha investigado el efecto sobre la mortalidad total (sin incluir muertes violentas y accidentales) y por causas específicas, siendo las cardiovasculares y respiratorias las de mayor interés para los investigadores (Schwartz, 1994, Olaíz *et al*, 2000 y OPS, 2005). La evidencia internacional señala que un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM₁₀ está asociado con un aumento en la mortalidad total desde 0.5% hasta un 2.0% (Daniels *et al*, 2000 en Estados Unidos, Goodman *et al*, 2004 en Irlanda, Saez *et al*, 2001 en España y Castillejos *et al*, 2000 en México). De igual manera, se ha encontrado evidencia de aumentos en las concentraciones de PM₁₀ relacionado con aumentos en la mortalidad cardiovascular y respiratoria (Zanobetti *et al*, 2003 y Moolgavkar, 2000).

A pesar de ser menor el número de estudios que se han realizado para determinar la relación entre las concentraciones de ozono y los efectos en la salud, también se ha evidenciado un aumento en la mortalidad total y por causas cardiovasculares y respiratorias cuando se presentan aumentos en las concentraciones del ozono (Gryparis *et al*, 2004, Zhang *et al*, 2006 y Borja *et al*, 1997). Los efectos a nivel de morbilidad también han sido estudiados, encontrándose evidencia de una relación estadísticamente significativa (Peel *et al*, 2005, Dab *et al*, 1996 y Cakmak *et al*, 2006). En el cuadro 1 se presenta de manera resumida los efectos asociados al ozono y PM₁₀ que más se han evaluado en los estudios epidemiológicos.

Los estudios epidemiológicos realizados para determinar la relación entre exposición aguda (de corto plazo) a contaminantes atmosféricos y salud han evidenciado un aumento en la mortalidad por causas cardiovasculares que llegan hasta 2% ante un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM₁₀ y hasta 1.76% ante aumentos en 10 ppb en ozono (Borja *et al*, 1998 y Daniels *et al*, 2000). Estudios realizados para México han encontrado un aumento de 2% en las visitas a las salas de urgencia por causa respiratoria frente aumentos de 10 ppb en las concentraciones de ozono (Téllez *et al*, 1997 y Hernández *et al*, 2007). En Estados Unidos, Peel *et al*, (2005) asociaron un aumento de 1.3% en las visitas a urgencias por un aumento de la misma magnitud en PM₁₀.

Los efectos en la salud asociados a la exposición crónica (exposición a niveles bajos de contaminación por períodos prolongados) son similares en cuanto a mortalidad a los relacionados con la exposición aguda; sin embargo, esta exposición se suele relacionar frecuentemente con morbilidad por bronquitis crónica y cambios en la función pulmonar. En la Zona Metropolitana del Valle de México, Rojas-Martínez *et al*. (2007), realizaron un estudio de

cohorte con niños de ocho años de edad que estudiaban en escuelas ubicadas a menos de dos kilómetros de la estación de monitoreo más cercana. Haciéndoles seguimiento a los niños cada seis meses durante tres años, pudieron comprobar la asociación entre el déficit en el crecimiento de la función pulmonar y la exposición crónica a contaminantes atmosféricos, principalmente ozono, PM10 y bióxido de nitrógeno.

Cuadro 1
Efectos en la salud humana producidos por PM10 y ozono

Contaminante	Efectos en salud cuantificados	Efectos en salud no cuantificados	Otros efectos posibles
Material Particulado	Mortalidad		
	Morbilidad: • Bronquitis crónica y aguda • Admisiones hospitalarias • Síntomas en vías respiratorias inferiores • Síntomas en vías respiratorias superiores • Enfermedades del pecho • Síntomas respiratorios • Días de actividad restringida • Días de trabajo perdidos • Efectos en asmáticos	• Cambios en la función pulmonar	• Enfermedades respiratorias crónicas diferentes a la bronquitis crónica • Inflamación en los pulmones
Ozono	Mortalidad		• Cambios inmunológicos • Enfermedades respiratorias crónicas
	Morbilidad: • Síntomas respiratorios • Días de actividad restringida • Admisiones hospitalarias • Ataques de asma • Cambios en la función pulmonar • Sinusitis crónica	• Aumento en la respuesta a los estímulos de las vías respiratorias • Inflamación en los pulmones	• Efectos extra pulmonar (por ejemplo, cambios en la estructura y la función de los órganos)

Fuente: *The Benefits and Costs of the Clean Air Act, 1970 to 1990* (USEPA 1997), tomado y adaptado de: *Economic valuation of the health impacts of air pollution* (Clean Air Initiative, s.f.).

3. Estimación de los efectos sobre la mortalidad y morbilidad

En las últimas décadas ha crecido el número de estudios epidemiológicos que miden el efecto de los contaminantes atmosféricos sobre la salud de las personas, sin embargo, estudios específicos para la ZMVM son limitados. En este sentido, se ha presentado un aumento en la utilización de los métodos cuantitativos que combinan información de diferentes estudios sobre el mismo tema. El método más formal para evaluar la fuerza de la asociación entre los resultados de diferentes estudios es el meta-análisis (Schwartz, 1994). El meta-análisis se puede definir como una combinación estadística de resultados para producir inferencias más precisas que los estudios individuales y para explorar la heterogeneidad de los resultados entre los diferentes análisis (Schwartz, 1994 y Saez *et al*, 2001). El estimador del efecto combinado que se obtiene del meta-análisis se calcula como una media ponderada de los estimadores de cada estudio, donde los pesos se asignan teniendo en cuenta la precisión de los resultados de cada trabajo, es decir, los estudios con mayor varianza tienen una menor contribución en el estimador combinado (Pertega *et al*, 2005).

Mortalidad

Los estimadores combinados que se obtienen a través del meta-análisis permiten corroborar la evidencia internacional. La contaminación atmosférica por partículas tiene efectos sobre la mortalidad, con mayor impacto en las muertes por causa respiratoria y los grupos más vulnerables como la población infantil y los adultos mayores. El cuadro 2 presenta los estimadores para los efectos sobre la mortalidad prematura por exposición a PM₁₀, en el que los resultados indican que un aumento de 10 µg/m³ en las concentraciones de PM₁₀ ocasiona aumentos de 2.08% en las muertes por causa respiratoria; consistente con los resultados encontrados por Arribas *et al*. (2001) en Zaragoza España: aumentos en las concentraciones de partículas en el día anterior está asociado con aumentos de 2.8% en la mortalidad diaria por causas respiratorias en esta ciudad. Resultados similares fueron hallados por Prescott *et al*. (1998) y Wichmann, *et al*. (2000).

De acuerdo con los resultados encontrados, un aumento de 10 µg/m³ de PM₁₀ se asocia a un incremento en la mortalidad infantil de 1.88%, lo cual es consistente con la evidencia internacional. Linn, *et al*. (2004) encontraron un aumento de 1.7% en la mortalidad infantil en Sao Paulo (Brasil) por un aumento de la misma magnitud en PM₁₀, mientras que para Estados Unidos,

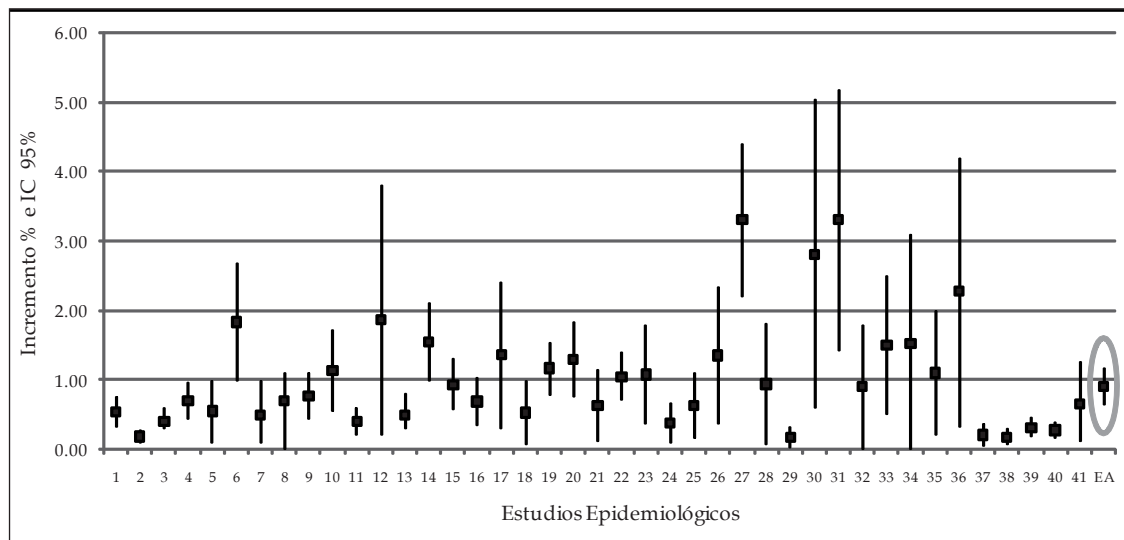
Woodruff, *et al.* (1999) asociaron este aumento en PM₁₀ con un incremento de 1.2% en la mortalidad de menores de un año.

Cuadro 2
Estimación de los efectos sobre la mortalidad asociados
con exposición a PM₁₀

Efecto en la salud	% de cambio ¹	IC 95%
Mortalidad		
Por todas las causas	0.91	0.65 - 1.18
Cardiovascular	1.25	0.60 - 1.91
Respiratoria	2.08	1.04 - 3.14
Personas > 65 años	1.21	0.39 - 2.03
Infantil	1.88	0.32 - 3.46

Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados del meta-análisis. 1/ El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 µg/m³.

Gráfica 1
Cambio porcentual en la mortalidad total por aumento
de 10 µg/m³ de PM₁₀



Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados del meta-análisis.

La población mayor de 65 años también se ve afectada con la contaminación atmosférica por partículas. Un aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 ocasiona crecimientos de 1.21% en la mortalidad de los adultos mayores. En la gráfica 1 se presentan los cambios porcentuales en la mortalidad por todas las causas que se encuentran en la literatura internacional y el efecto combinado que arrojó el meta-análisis.

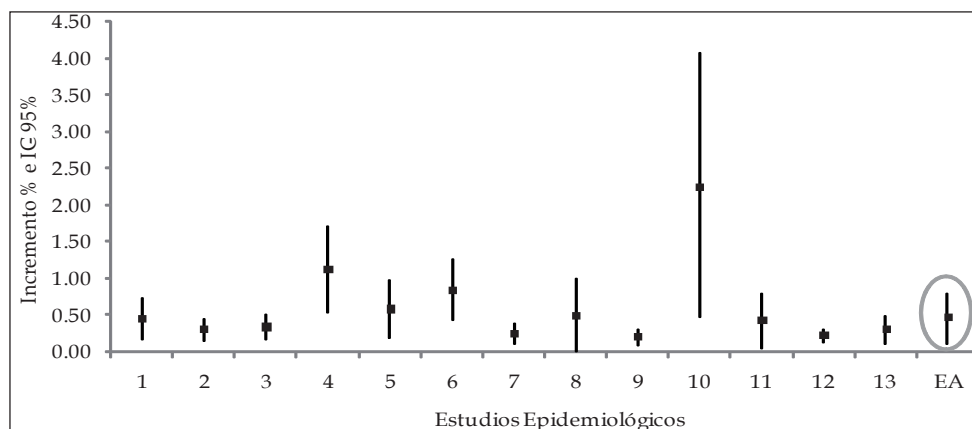
Con relación a la contaminación por ozono también es evidente que los menores de cinco años es la población más afectada. De acuerdo con el estimador encontrado, la mortalidad en los infantes se ve incrementada en 2.7% frente a un aumento de 10 ppb en las concentraciones de ozono. Loomins *et al.* (1999) en un estudio de series de tiempo para la Ciudad de México encontraron un efecto igual sobre la mortalidad de niños menores de un año frente a un aumento en ozono de la misma magnitud. El efecto sobre la población infantil es más intenso y está asociado a la mayor exposición que tienen por permanecer mayor tiempo al aire libre que otros grupos de la población. Los resultados en términos de mortalidad por todas las causas también reflejan la evidencia observada a nivel internacional. Un aumento de 10 ppb en la concentración del ozono está asociado a un crecimiento de 0.46% en la mortalidad total. Zhang *et al.*, 2006 en China encontraron resultados similares (0.45%), mientras que Bell *et al.*, 2006 encontraron en Estados Unidos que un aumento de 10 ppb en la concentración del mismo día y los días previos ocasionaría incrementos de 0.30% en la mortalidad. En el cuadro 3 se presentan los estimadores combinados obtenidos con el meta-análisis para la mortalidad total y por causas específicas. La gráfica 2 presenta los estimadores de los diferentes estudios utilizados.

Cuadro 3
Estimación de los efectos sobre la mortalidad
asociados con la exposición a Ozono

Efecto en la salud	% de cambio ¹	IC 95%
Mortalidad		
Por todas las causas	0.46	0.11 - 0.81
Cardiovascular	0.69	0.21 - 1.17
Respiratoria	0.74	0.13 - 1.35
Personas > 65 años	0.50	0.34 - 0.66
Infantil	2.78	0.29 - 5.26

Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados del meta-análisis. 1/ El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 ppb.

Gráfica 2
Cambio porcentual en la mortalidad total por aumento de 10 ppb de O₃



Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados del meta-análisis.

Morbilidad

La necesidad de implementar programas que permitan solucionar la problemática ambiental que presentan las grandes ciudades es una de las prioridades de la agenda pública hoy en día ya que se reconoce la estrecha relación que existe entre la contaminación atmosférica y la aparición y gravedad de enfermedades respiratorias, siendo la neumonía en niños una de las más frecuentes. La relación entre exposición a la contaminación del aire y respuesta en el número de admisiones a hospitales o visitas a las salas de urgencia ha sido estudiada ampliamente en los últimos años, encontrándose evidencia estadísticamente significativa.

A partir de estudios epidemiológicos realizados en diferentes ciudades del mundo con problemas de calidad del aire se realizó el meta-análisis que permitió determinar el tamaño de los efectos de aumentos de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera y diversos resultados de la salud. En términos de admisiones hospitalarias se encontró que aumentos de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀ están asociados positivamente con mayores admisiones por neumonía (2.5%). El efecto sobre las admisiones por asma también es alto (1.72%) y corrobora los hallazgos de otros trabajos en los que se señala que la población que padece enfermedades respiratorias es una de las más afectadas cuando se presentan aumentos en los niveles de concentración de las partículas respirables (PM₁₀), incluso días después de que ocurren los aumentos en las concentraciones.

Lo anterior es consecuente con los resultados obtenidos en términos de efectos sobre las visitas a las salas de urgencias por asma (3.9%). Los efectos más notorios sobre la población que sufre de asma se manifiestan en aumentos de los síntomas de tos en los niños (3.5%) y mayor uso de broncodilatador (10.2%) para detener los síntomas del asma. Los efectos hallados sobre la bronquitis crónica indican que aumentos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} se asocian a incrementos de 1.84% en los casos de esta enfermedad. Resultados similares fueron encontrados por Moolgavkar, *et al.* (1997) en Minneapolis y Birmingham (1.7%).

Todos los impactos señalados anteriormente se ven reflejados también en pérdida de productividad, debido a los días de incapacidad laboral asociados al padecimiento de las enfermedades. Estudio realizados sobre este tema permiten determinar que aumentos en las concentraciones de PM_{10} están asociados a aumentos de 2.6% en los días de actividad restringida en adultos y 4.2% en las mujeres, por dejar de trabajar y destinar el tiempo al cuidado de los menores enfermos (cuadro 4).

Las consecuencias que el ozono tiene sobre la morbilidad son igual de notorios y en algunos casos mayores a los asociados al PM_{10} (cuadro 4). Las admisiones en hospitales por problemas de asma y neumonía en la población aumentan 2.7 y 3.6% respectivamente cuando las concentraciones de ozono aumentan en 10 ppb. Los resultados indican que hay una asociación significativa entre aumentos en los niveles de ozono en la atmósfera y aumentos de 1.5% en las admisiones hospitalarias por causas respiratorias, siendo mayores en el caso de los adultos mayores (2.8%). Estudios previos realizados en las dos ciudades más grandes de Holanda (Amsterdam y Rotterdam) asociaron aumentos en el ozono con aumentos de 2.4% en las admisiones hospitalarias por causa respiratoria y de 3.4% sobre la población mayor de 65 años.

Cuadro 4
Estimación de los efectos sobre la morbilidad asociados
con la exposición a PM₁₀

Efecto en la salud	PM10		Ozono	
	% de cambio ¹	IC 95%	% de cambio ²	IC 95%
1 Admisión en hospitales				
Respiratorias	1.55	0.89 - 2.21	1.55	0.81 - 2.30
Asma	1.72	0.91 - 2.53	2.79	1.22 - 4.36
Neumonía	2.50	1.34 - 3.66	3.69	2.33 - 5.05
Respiratorias (> 65 años)	1.35	0.90 - 1.79	2.84	1.79 - 3.90
Cardiovascular	2.43	-0.34 - 5.20	1.51	0.04 - 3.05
2 Visita a sala de urgencias				
Respiratorias	1.20	0.06 - 2.46	2.33	0.85 - 3.81
Asma	3.97	1.35 - 6.58	4.67	2.20 - 7.13
3 Efectos en asmáticos				
Ataque de asma	1.25	0.08 - 2.41	1.73	0.82 - 2.65
Uso de broncodilatador	10.2	7.30 - 13.1	1.84	0.82 - 2.86
Tos (niños)	3.59	1.27 - 5.92	0.60	0.10 - 1.10
4 Síntomas en vías respiratorias				
Vías respiratorias superiores	4.39	3.66 - 5.12	1.50	0.80 - 2.20
Vías respiratorias inferiores	2.18	-1.83 - 6.19	2.07	0.74 - 3.40
Bronquitis aguda	3.66	0.30 - 7.63	0.50	0.20 - 0.80
5 Morbilidad crónica				
Bronquitis crónica	1.84	1.02 - 2.66	2.09	0.80 - 3.39
6 Días de actividad restringida (DAR)				
DAR adultos	2.60	2.30 - 2.90		
DAR menor	4.20	3.40 - 5.00	2.20	0.00 - 4.40
Días laborales perdidos	5.20	4.40 - 6.00		

Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados del meta-análisis. 1/ El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 ppb. 2/ El porcentaje de cambio hace referencia a un aumento de 10 µg/m³.

Los efectos del ozono sobre la morbilidad quedan evidenciados al revisar que aumentos en las concentraciones de 10 ppb en este contaminante se asocian con incrementos de 2.3% en las visitas a salas de urgencias por enfermedades respiratorias, siendo mayor el efecto sobre las visitas por asma 4.6%. Estos

resultados corroboran el efecto de 2% encontrado por Téllez, *et al.* (1997), al modelar la relación entre el número de consultas diarias a urgencia por motivos respiratorios como consecuencia de los cambios diarios en los niveles de contaminación por ozono en Ciudad de México. Similares resultados fueron encontrados por Hernández, *et al.* (2007) en Ciudad Juárez al analizar la relación entre las concentraciones de ozono y PM₁₀, con el número diario de consultas al servicio de urgencias por enfermedades respiratorias agudas y asma en menores de 15 años. De igual manera se encontraron impactos significativos del ozono sobre la población enferma de asma. Las afecciones en este grupo de enfermos se incrementa en 1.7% cuando se aumenta la concentración de ozono en 10 ppb. Este resultado obtenido a través del meta-análisis es similar a 1.8% que encontraron Romieu, *et al.* (1996) al evaluar los efectos de la contaminación por ozono en los niños con problemas de asma en Ciudad de México.

Las enfermedades crónicas como la bronquitis también se ve afectada por las alteraciones de la calidad del aire; en este sentido, aumentos en la exposición al ozono se asocian significativamente con crecimientos de 2.1% en los casos de padecimientos de la bronquitis crónica, resultados que no contradicen los encontrados en 1996 por Schouten, *et al.* 1996 (2.4%), al evaluar los efectos de corto plazo del ozono sobre la enfermedad pulmonar obstructiva crónica en Amsterdam. Efectos adversos sobre la bronquitis crónica también fueron hallados en 1999 por Wong, *et al.* en Hong Kong (3.2%); en este trabajo se encuentran impactos incluso hasta cinco días después de los episodios de aumentos en las concentraciones de ozono. En Detroit, Estados Unidos, Schwartz, 1994 encontró que este efecto es de 1.2% sobre la población mayor de 65 años. Pocos trabajos han intentado medir los efectos del ozono sobre la pérdida de productividad. En 1989, Ostro encontró que los días de actividad restringida menor aumentan en 2.2% por mayores niveles de exposición por ozono.

4. Impacto de la contaminación en la ZMVM

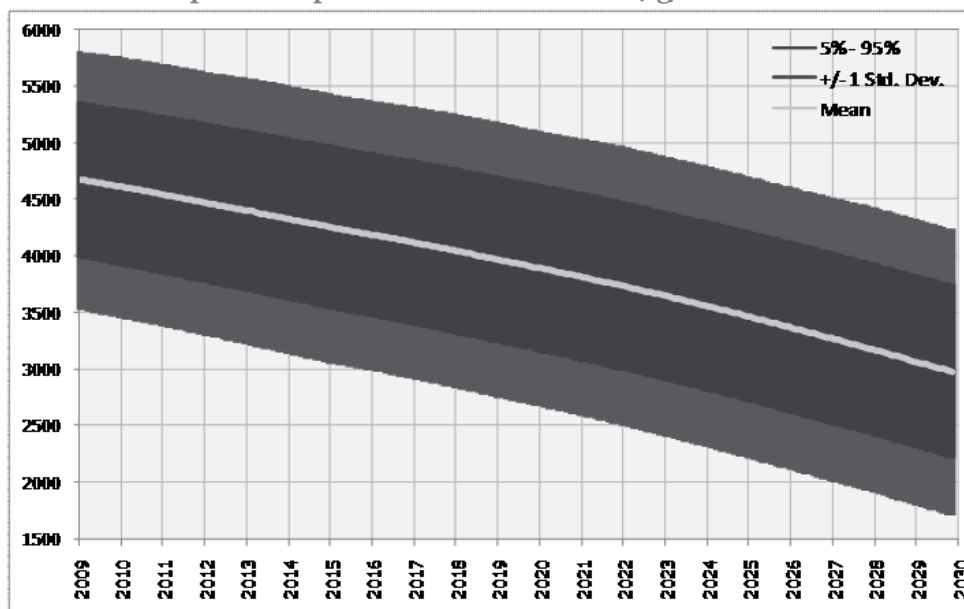
Los coeficientes exposición respuesta encontrados con el meta-análisis son de mucha utilidad para encontrar el tamaño del impacto de la contaminación. Al multiplicar estos coeficientes por la población se obtiene el número de casos en que se reduce el riesgo de muerte prematura y por enfermedades relacionadas con las emisiones. No obstante, debe considerarse que existe aun grados importantes de incertidumbre sobre estos resultados y que en

todo caso las estimaciones más sólidas son las referidas a PM₁₀ (Evans, Levy, Hammit, Santos y Castillejos, 2002). A través de simulaciones de Monte Carlo se estimó la trayectoria esperada del número de casos evitados de muertes por causa respiratoria y morbilidad respiratoria para el período 2009–2030 ante una reducción de 10% en la exposición a PM₁₀ y ozono (gráficas 3 - 6) en la Zona Metropolitana del Valle de México. Estas simulaciones se hicieron utilizando el programa @RISK, considerando 500 iteraciones para una distribución normal.

Los resultados de las simulaciones muestran que con una reducción de 10% en la exposición a PM₁₀, se evitarían en promedio 2.960 casos de mortalidad por causa respiratoria y 4.230 casos de morbilidad por bronquitis, para el año 2030 en la ZMVM (gráficas 3 y 4). Para el caso del ozono, cuando se tiene en cuenta una reducción de la misma magnitud, el número de muertes por causa respiratoria evitadas es en promedio de 916 y de 1607 casos de morbilidad respiratoria (gráficas 5 y 6). La tendencia decreciente que presentan los casos evitados tanto en mortalidad como morbilidad por la menor exposición a los contaminantes PM₁₀ y ozono se debe al comportamiento que presenta el *input* utilizado (proyecciones de población) en las simulaciones.

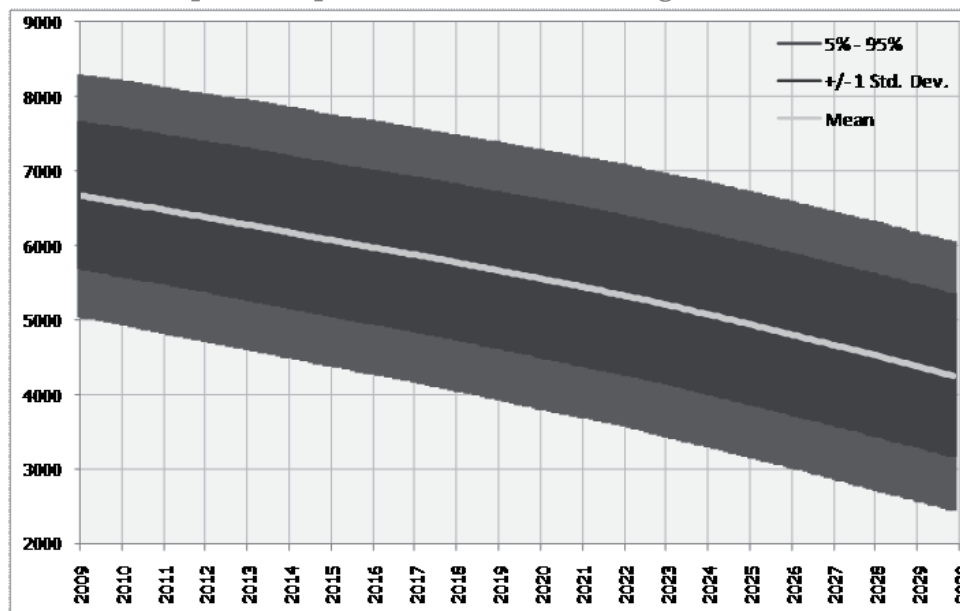
Gráfica 3

Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀



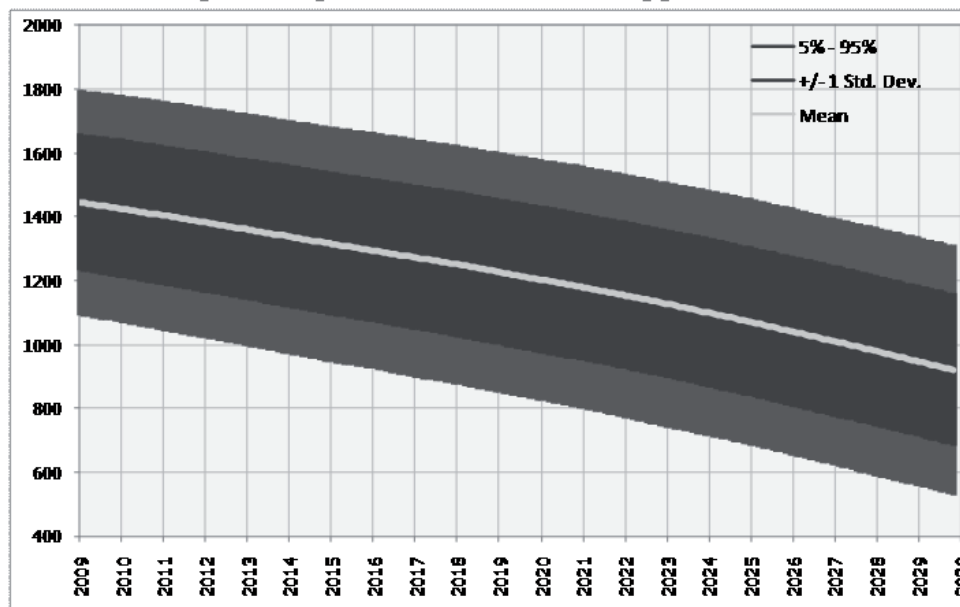
Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados de simulaciones de Monte Carlo.

Gráfica 4
Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10



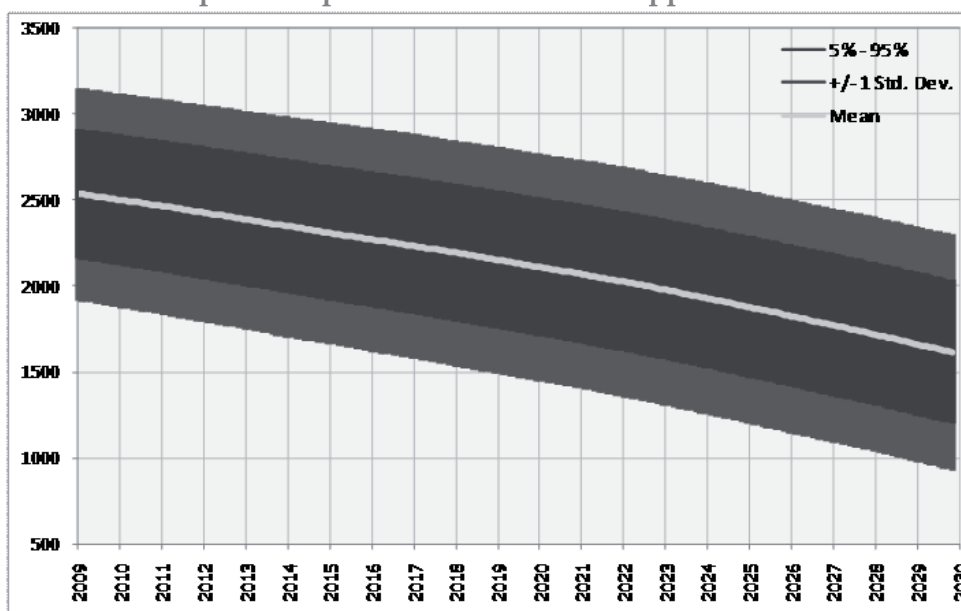
Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados de simulaciones de Monte Carlo.

Gráfica 5
Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de mortalidad respiratoria por una reducción de 10 ppb de ozono



Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados de simulaciones de Monte Carlo.

Gráfica 6
Simulación de Monte Carlo de los casos evitados de morbilidad respiratoria por una reducción de 10 ppb de ozono



Fuente: elaboración del autor a partir de los resultados de simulaciones de Monte Carlo.

5. Co-beneficios por controlar la contaminación

Las políticas que se pretenden implementar con el objetivo de reducir los contaminantes locales del aire tienen la ventaja de que además de aportar al logro de su propósito principal, también generan co-beneficios en la disminución de las emisiones de contaminantes globales como los gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. En este sentido, las políticas públicas que incorporan el sector transporte para reducir la contaminación del aire tienen este doble beneficio y por esta vía también logran reducir los impactos negativos a la salud asociados a los contaminantes criterio. La consideración y valoración de todos estos beneficios es importante al momento de intentar justificar la implementación de las políticas públicas. En un intento por cuantificar tanto los beneficios locales como los globales de la operación del metrobús entre 2005 y 2015 el Instituto Nacional de Ecología encontró que se podrían reducir las emisiones de hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y material particulado en una cantidad tal que en promedio se evitarían 6 100 días de trabajo perdido, 660 días de actividad restringida, 12 nuevos casos de bronquitis y 3 muertes anuales, con un be-

neficio monetario promedio de \$3 millones de dólares anuales, además de reducir 280 000 toneladas de CO₂ equivalente.

6. Consideraciones finales y política pública

La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México evidentemente es un tema de mucha importancia por los efectos adversos que tiene sobre la salud de las personas. En este contexto, la búsqueda de nuevas políticas públicas tendientes a reducir la contaminación es una tarea a la que debe dedicársele mucho esfuerzo. De acuerdo con el más reciente inventario de emisiones realizado para la ZMVM, el sector transporte contribuye con 76% de las 3.1 millón de toneladas de contaminante que se emiten en esta zona. El rápido crecimiento de la flota vehicular, del orden de 72% entre 1994 y 2006, sin duda es una señal de la importante participación que los autos particulares (51%) tienen en las emisiones de las fuentes móviles.

Los anteriores datos evidentemente muestran que las políticas y programas que pretendan reducir la contaminación atmosférica en la ZMVM deben necesariamente considerar al sector transporte como uno de los actores principales para la solución del problema. En este sentido, los programas destinados a reducir el uso de los autos particulares son los más adecuados y los que seguramente arrojarán los mejores resultados en términos de reducir las emisiones y concentraciones de los contaminantes. Se requiere por tanto de mecanismos que logren internalizar los costos causados a la sociedad, como son los costos asociados al deterioro del estado de salud de las personas.

La aplicación de instrumentos económicos que desincentiven el uso de los autos particulares, como el desmonte gradual de los subsidios a la gasolina, además de hacer coherente las políticas sectoriales y las políticas ambientales, puede contribuir a reducir los niveles de contaminación. La aplicación de impuestos diferenciados a la compra de autos nuevos en la ZMVM, es otra opción que bien vale la pena considerar dentro del abanico de posibilidades. Sin embargo, para que lo anterior ocurra, también se hace indispensable ofrecer un sistema de transporte público eficiente (seguro, rápido y cómodo), que pueda ser considerado por los actuales usuarios de autos particulares como una verdadera alternativa para movilizarse, por tanto, el mejoramiento del funcionamiento del sistema de transporte público colectivo, dentro del cual el metrobus es uno de los ejes principales, es otro de los programas a los que deben apuntar las políticas públicas.

Las anteriores políticas además de contribuir al objetivo de reducir las emisiones de los contaminantes locales, tienen el atractivo de generar co-

beneficios en términos de reducir los niveles de emisión de los gases efecto invernadero que ocasionan el calentamiento del planeta, gracias a la sustitución de autobuses articulados por microbuses y autobuses de mayor antigüedad. Se estima que con la sola implementación de la ruta indios Verdes-Dr. Gálvez se dejan de emitir a la atmosfera anualmente 19 mil toneladas de bióxido de carbono.

Bibliografía

- Arribas-Monzón, F., Rabanaque, M., Martos, M., Abad, J., Alcalá-Nalvaiz, T. and Navarro-Elipe, M. Effects of air pollution on daily mortality in Zaragoza, Spain, 1991-1995, *Salud Publica Mex* 2001; 43:289-297.
- Bell, M., Peng, R. and Dominici, F., The Exposure-Response Curve for Ozone and Risk of Mortality and the Adequacy of Current Ozone Regulations, *Environmental Health Perspectives*, 2006; 114 (4): 532-536.
- Borja-Aburto, V., Castillejos, M., Gold, D., Bierzinski, S. and Loomis, D. Mortality and ambient fine particles in Southwest Mexico City, *Environmental Health Perspectives*, 1998; 106 (12): 849-855.
- Borja-Aburto, V., Loomis, D., Bangdiwala, S. Shy, C., Rascon-Pacheco, R. Ozone, Suspended Particulates, and Daily Mortality in Mexico City, *American Journal of Epidemiology*, 1997; 145: 258-268.
- Dab, W., Medina, S., Quenel, P., Moullec Y., Tertre, A., Thelot, B., Monteil, C., Lameloise, P., Pirard, P., Momas, I., Ferry, R. and festy, B., Short term respiratory health effects of ambient air pollution: Results of the APEHA project in Paris, *Journal of Epidemiology and Community Health*; 1996; 50: S42-S46
- Daniels, M., Dominici, F., Samet, J. and Zeger, S. Estimating Particulate Matter-Mortality Dose-Response Curves and Threshold Levels: An Analysis of Daily Time-Series for the 20 Largest US Cities, *American Journal of Epidemiology*, 2000; 152 (5): 397-405.
- Evans, J., Levy, J., Hammit, J., Santos-Burgoa, C., Castillejos, M., *Health Benefits of Air Pollution Control*. 2002. In *Air quality in the Mexico megacity*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Goodman, P., Dockery, D. and Clancy. L., Cause-Specific Mortality and the Extended Effects of Particulate Pollution and Temperature Exposure, *Environmental Health Perspectives*, 2004; 112 (2): 179-185.
- Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyanni, K., Analitis, A., Toulomi, G., Schwartz, J., Samoli, E., Medina, S., Anderson, H., Niciu, E., Wichmann, H., Kryz, B., Kosnik, M., Skorkovsky, J., Vonk, J. and Dortbudak, Z. Accute effects of ozone on mortality from the "Air pollution and health: A European Approach"

- project, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2004, 170 (10): 1080-1087.
- Hernández, L., Barraza, A., Ramirez, M., Moreno, H., Miler, P., Carbajal, L. Romieu, I. Morbilidad infantil por causas respiratorias y su relación con la contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, *Salud Pública de México*, 2007; 49 (1): 27-36.
- Linn CA, Pereira LA, Nishioka DC, Conceicao GM, Braga AL, Saldiva PH., *Air pollution and neonatal deaths in Sao Paulo, Brazil*, *Braz J Med Biol Res*. 2004; 37(5): 765-770.
- Loomins, D., Castillejos, M., Gold, D., McDonnell, W., Borja-Aburto, V., Air Pollution and Infant Mortality in Mexico City, *Epidemiology*, 1999; 10: 118-123.
- Moolgavkar, S. H. Air Pollution and Daily Mortality in Three U.S. Counties, *Environmental Health Perspectives*, 2000; 108 (8): 777-784.
- Moolgavkar, S., Luebeck, E., Anderson, E. Air Pollution and Hospital Admissions for Respiratory Causes in Minneapolis-St. Paul and Birmingham, *Epidemiology*, 1997; 8 (4): 364-370.
- Olaiz-Fernández, G., Borja-Aburto, V., Rosales-Castillo, J., Torres-Meza, V. and Corey, G., *Evaluation of health effects of pollution*, CENSA, Metepec. 2000.
- Organización Panamericana de la Salud OPS, 2005. *Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América Latina y el Caribe*, Washington, D.C. OPS.
- Ostro, Bart D. 1998, Cómo estimar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud, *Estudios Públicos*, 69: 105-113.
- Peel, J., Tolbert, P., Klein, M., Metzger, K., Flanders, W., Todd, K., Mulholland, J., Ryan, P. and Frumkin, H., Ambient Air Pollution and Respiratory Emergency Department Visits, *Epidemiology*, 2005; 16: 164-174.
- Pértiga, S. y Pita, S. (2005), Revisiones sistemáticas y meta-análisis (II). Cad Aten Primaria 2005. Documento recuperado de <http://www.fisterra.com/mbe/investiga/metaanalisis/RSyMetaanalisis2.asp> el 12 de octubre de 2008.
- Prescott, G.J. et al., *Urban air pollution and cardiopulmonary ill health: a 14.5 year time series study*. *Occupational and environmental health*, 1998; 55: 697-704.
- Rojas-Martinez, R., Perez-Padilla, R., Olaiz-Fernandez, G., Mendoza-Alvarado, L., Moreno-Macias, H. Fortoul, T., McDonnell, W., Loomis, D. and Romieu, I. (2007), Lung Function Growth in Children with Long-Term Exposure to Air Pollutants in Mexico City, *Am J Respir Crit Care Med*. Vol. 176. pp 1-8, 2007.
- Romieu, I., Meneses, F., Ruiz, S., Sienna, J.J., Huerta, J., White, M. and Etzel, R. (1996), Effects of Air Pollution on the Respiratory Health of Asthmatic Children living in Mexico City, *Am J Respir Crit Care Med*. Vol. 154. pp 300-307, 1996.

- Saez, M., Figueiras, A., Ballester, F., Pérez-Hoyos, S., Ocaña, R. and Tobías, A. Comparing meta-analysis and ecological-longitudinal analysis in time-series studies. A case study of the effects of air pollution on mortality in three Spanish cities, *Epidemiol Community Health*, 2001;55:423-432.
- Schouten, J., Vonk, J., Graaf, A. Short term of air pollution on emergency hospital admissions for respiratory disease: results of the APHEA project in two major cities The Netherlands, 1977-1989, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 1996; 50: S22-S29.
- Schwartz, J. Air pollution and daily mortality: A review and meta-analysis, *Environ Res*, 1994; 64: 36-52.
- Téllez, M., Romieu, I., Polo, M., Velazco, S., Meneses, F., Hernández, M., Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la Ciudad de México, *Salud Pública de México*, 1997, 39 (6): 1-10.
- Wichmann, H. E. *et al.*, Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: Role of particle number and particle mass, *Health Effects Institute* (2000).
- Wong, T., Shing, T., Yu, T., Neller, A., Wong, S., Tam, W., Pang, S., Air pollution and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases in Hong Kong, *Occup Environ Med* 1999;56:679-683
- Zanobetti, A., Schwartz, J., Samoli, E., Gryparis, A., Touloumi, G., Peacock, J., Anderson, R., Le Tertre, A., Bobros, J., Celko, M., Goren, A., Forsberg, B., Michelozzi, P., Rabczenko, D., Perez-Hoyos, S., Wichmann, E. and Katsouyanni, K., The Temporal Pattern of Respiratory and Heart Disease Mortality in Response to Air Pollution, *Environmental Health Perspectives*, 2003; 111 (9): 1188-1193.