

Mortalidad aguda asociada con partículas suspendidas finas y gruesas en habitantes de la Zona Metropolitana de Monterrey

Alfonso Martínez-Muñoz, D en C,⁽¹⁾ Magali Hurtado-Díaz, D en C,⁽²⁾
Julio César Cruz, D en Epidem,⁽²⁾ Horacio Riojas-Rodríguez, D en Epidem.⁽²⁾

Martínez-Muñoz A, Hurtado-Díaz M, Cruz JC, Riojas-Rodríguez H. Mortalidad aguda asociada con partículas suspendidas finas y gruesas en habitantes de la Zona Metropolitana de Monterrey. Salud Pública Mex. 2020.
<https://doi.org/10.21149/11184>

Martínez-Muñoz A, Hurtado-Díaz M, Cruz JC, Riojas-Rodríguez H. Mortality associated with fine and coarse suspended particles, in inhabitants of Monterrey Metropolitan Area. Salud Pública Mex. 2020.
<https://doi.org/10.21149/11184>

Resumen

Objetivo. Estimar el riesgo de mortalidad asociado con la exposición a partículas finas (PM_{2.5}) y gruesas (PM_{2.5-10}) en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM). **Material y métodos.** Estudio ecológico con análisis retrospectivo de series de tiempo (2004-2014) de mortalidad total y específica diaria, y promedio de PM_{2.5} y PM_{2.5-10}. Modelos aditivos generalizados Poisson con rezagos distribuidos ajustados por tendencia, estacionalidad, día de la semana, condiciones meteorológicas y contaminantes gaseosos. **Resultados.** El promedio (DE) de PM_{2.5} y PM_{2.5-10} fue 26.59 (11.06) y 48.83 (21.15) µg/m³. Cada 10 µg/m³ de aumento de PM_{2.5} (lag 0) incrementó el riesgo de mortalidad respiratoria en menores de cinco años 11.16% (IC95% 1.03-21.39) y de neumonía e influenza en mayores de 65 años 6.60% (IC95% 3.91-9.37). El riesgo de mortalidad asociado con las PM_{2.5-10} fue menor. **Conclusiones.** Se observaron asociaciones positivas y significativas entre exposición a material particulado y la mortalidad diaria en población de la ZMM.

Palabras clave: contaminación atmosférica; mortalidad; enfermedad vascular; enfermedad respiratoria

Abstract

Objective. To estimate the mortality risk of fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5-10}) particles in the Metropolitan Area of Monterrey (MAM). **Materials and methods.** A retrospective ecological time-series analysis (2000-2014) was conducted using total and specific causes of mortality, and daily mean PM_{2.5} and PM_{2.5-10}. Generalized additive distributed lag models controlling for trend, seasonality, day of the week, meteorological conditions and gaseous pollutants. **Results.** Mean (SD) PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations were 26.59 µg/m³ (11.06 µg/m³) and 48.83 µg/m³ (21.15 µg/m³). An increase of 10 µg/m³ of PM_{2.5} (lag 0) was associated with 11.16% (95%CI: 1.03-21.39) increased risk of respiratory mortality in children <=5 years old and 6.6% (95%CI 3.31-9.37) increased risk of pneumonia-influenza in adults >=65 years old. The risk of mortality associated with the concentration of coarse particles was lower. **Conclusions.** Positive and significant associations were observed between exposure to particulate matter and daily mortality in the MAM's population.

Keywords: air pollution; mortality; vascular disease; respiratory disease

(1) Observatorio Ciudadano de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey. Monterrey, Nuevo León, México.

(2) Dirección de Salud Ambiental, Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, Morelos, México.

Fecha de recibido: 31 de diciembre de 2019 • **Fecha de aceptado:** 21 de abril de 2020

Autor de correspondencia: Dr. Julio César Cruz de la Cruz. Dirección de Salud Ambiental, Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública. Av. Universidad 655, col. Santa María Ahuacatlán. 62100 Cuernavaca, Morelos, México.
Correo electrónico: cruz@espm.insp.mx

De acuerdo con el estudio de carga global de enfermedad, la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental en el mundo.¹ Se estima que la exposición a contaminantes atmosféricos extramuros es la causa de alrededor de 3.1 millones de muertes prematuras a nivel global.¹ Dichas estimaciones se basan en resultados de revisiones sistemáticas y metaanálisis de estudios epidemiológicos que han asociado la exposición crónica de las partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) con padecimientos como la enfermedad isquémica del corazón, la enfermedad cerebrovascular, las infecciones de las vías respiratorias bajas, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, el cáncer de pulmón y la diabetes tipo 2. Dicha evidencia, así como la proveniente de estudios epidemiológicos de efectos agudos de las $PM_{2.5}$,²⁻⁹ ha sido utilizada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para establecer valores guía para proteger la salud humana, y por algunos países para establecer sus normas nacionales de calidad del aire. Por otro lado, se sabe que los efectos a la salud de las partículas gruesas $PM_{2.5-10}$ son principalmente agudos y para afecciones respiratorias y cardiovasculares.¹⁰ En México, el problema de contaminación del aire se observa en diferentes ciudades. La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) no es la excepción; en el año 2018 se excedieron 195 días las normas de calidad del aire para partículas de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y 35 para $PM_{2.5}$.¹¹

La ZMM tiene un problema de contaminación atmosférica, principalmente por material particulado procedente de la quema de combustibles fósiles por fuentes móviles o actividad industrial.¹² Además, debido a la erosión eólica y a la industria de la caliza, se tienen altas concentraciones de partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre 2.5 y 10 μm , conocidas como partículas gruesas ($PM_{10-2.5}$).¹² Los costos económicos asociados con este problema muestran que, de haberse reducido 10% la concentración media anual de PM_{10} en la ZMM en el año 2005, se hubieran evitado entre 895 y 1 346 millones de dólares anuales asociados con pérdidas de productividad y daños a la salud.¹³ De acuerdo con Trejo y colaboradores, si en el año 2015 la ZMM hubiera cumplido con los límites permisibles de 12 $\mu g/m^3$ de promedio anual de $PM_{2.5}$ establecidos en la NOM-020-SSA1-2014 para protección a la salud, se hubieran evitado 1 252 muertes, con un costo de 2 057 millones de dólares en ese año.¹⁴

No obstante el problema, son pocos los estudios que han estimado el efecto de la contaminación del aire sobre la salud en la ZMM. Uno de ellos es el Estudio de Salud y Contaminación del Aire en Latinoamérica (Escala) en el que se observó que por cada 10 $\mu g/m^3$

de aumento en las PM_{10} se incrementaba el riesgo de mortalidad por todas las causas-todas las edades un 1.01% (IC95% 0.83-1.20).¹⁵ Sin embargo, hasta ahora no se ha estudiado el riesgo asociado con las fracciones fina y gruesa del material particulado. Por ello, el objetivo de este estudio es estimar el riesgo de mortalidad asociada con la exposición aguda a las $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$ en municipios de la ZMM.

Material y métodos

Diseño y población del estudio

Se realizó un estudio ecológico con análisis retrospectivo de series de tiempo para el periodo de 2004 a 2014. El análisis incluyó los municipios de Apodaca, Escobedo, Guadalupe, Monterrey, San Nicolás, San Pedro y Santa Catarina, que comprenden una población de 3 463 349 habitantes y que contaron con datos válidos de los contaminantes para el periodo de estudio (figura 1).

Datos de mortalidad

Los registros diarios de mortalidad se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).¹⁶ Se calculó el número de muertes diarias de acuerdo con la Clasificación Internacional de Enfermedades en su décima revisión (CIE-10) para todas las causas (A00-R99) y todas las edades (excluyendo causas externas, accidentes y violencia); causas cardiovasculares (I00-I99) y los subgrupos enfermedad cerebrovascular (de I60 a I69) y enfermedad isquémica del corazón (I20-I25); enfermedades del sistema respiratorio (J00-J99) y los subgrupos influenza y neumonía (de J09 a J18), y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC; J19-J46). Para las causas específicas se calcularon todos los grupos de edad y los grupos de 65 años o más; en el caso de las causas respiratorias, también los niños menores de cinco años.

Datos ambientales

Se obtuvieron datos horarios de $PM_{2.5}$, dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2) del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Sinaica) del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Para material particulado y SO_2 , se calculó el promedio de 24 horas de las estaciones que tuvieron 75% de suficiencia diaria a partir de datos horarios (mínimo 18 datos de los 24 datos horarios de cada día) para el periodo 2004-2014. Para NO_2 se utilizó el valor máximo horario considerando el mismo criterio de suficiencia de datos diarios. La temperatura diaria promedio y hume-

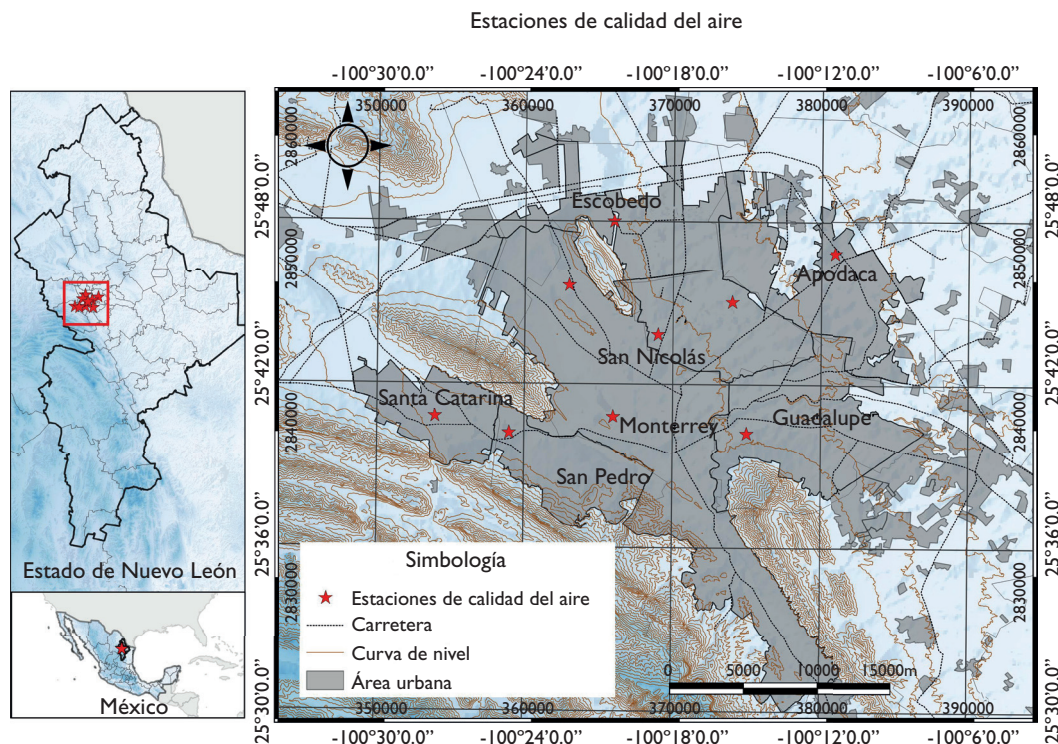


FIGURA I. POBLACIÓN DE ESTUDIO Y UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY (ZMM), MÉXICO, PERIODO 2004-2014

dad relativa se obtuvieron de la estación meteorológica local ubicada en el aeropuerto Mariano Escobedo, en Monterrey. Para estimar la fracción gruesa del material particulado, se utilizaron las series de datos diarias para toda la ciudad de PM_{10} y $PM_{2.5}$, restando la fracción fina a las PM_{10} ($PM_{10-2.5} = [PM_{10}] - [PM_{2.5}]$) para obtener un valor diario de $PM_{10-2.5}$ para toda la ciudad.

Análisis estadístico

Se obtuvieron estadísticas descriptivas de tendencia central (media y mediana) y de dispersión (desviación estándar y rango intercuartílico) de las variables con el propósito de conocer su comportamiento y distribución. Posteriormente se graficaron las series temporales de mortalidad con el fin de identificar su tendencia, estacionalidad, ciclicidad y ruido.

Debido a la naturaleza de la variable dependiente (conteo), el análisis se realizó utilizando modelos aditivos generalizados Poisson con rezagos distribuidos ajustados por tendencia, estacionalidad, días festivos, días de la semana, temperatura, humedad relativa, NO_2 y SO_2 . Se evaluó la exposición del mismo día (lag 0), los modelos finales incluyeron rezagos distribuidos de uno (lag 0-1),

tres (lag 0-3) y siete (lag 0-7) días. Se incluyeron funciones suavizadas de la variable dependiente para disminuir influencias temporales de largo plazo, minimizar la autocorrelación en los residuales y remover la correlación serial (ruido blanco). Se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC) y la distribución de los residuales para evaluar la bondad de ajuste de los modelos. Los resultados se reportan por porcentaje de cambio por incremento de $10 \mu g/m^3$ de los contaminantes de interés. Todos los análisis se realizaron en Stata 14.

El estudio quedó exento de evaluación del comité de ética debido a que las bases de datos que se analizaron provienen de fuentes de información generada por instituciones públicas y de acceso libre y porque no se manipuló información ni material biológico de ningún tipo.

Resultados

Durante el periodo de 2004 a 2014, en la ZMM, se registró un total de 558 470 muertes, de las cuales 31.46% fueron por causas cardiovasculares, 7% por causas cerebrovasculares, 17.08% por causas isquémicas, 9.46% por causas respiratorias, 3.50% por EPOC y 4.11% por

neumonía e influenza. Las concentraciones diarias promedio de $PM_{2.5}$, $PM_{2.5-10}$, NO_2 y SO_2 fueron de $26.59 \mu g/m^3$, $48.83 \mu g/m^3$, $0.04 ppm$ y $0.01 ppm$, respectivamente. El promedio de muertes diarias por causas no externas y específicas se presenta en el cuadro I.

En el cuadro II se presenta el riesgo diario de mortalidad asociado con la exposición a $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$, sin ajustar por otros contaminantes. Para la mortalidad por todas las causas (excluyendo las externas), un aumento de $10 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ se asoció con un incremento del 1.65% (IC95% 1.20-2.10) (lag 0) en el número de muertes diarias, mientras que EPOC en todas las edades y mortalidad respiratoria en menores de cinco años no fueron estadísticamente significativas. El resto de las causas de estudio se asociaron positiva y significativamente con la exposición del mismo día a $PM_{2.5}$. Respecto a la exposición a $PM_{10-2.5}$, se observaron coeficientes de menor orden de magnitud e igualmente riesgos más altos para mayores de 65 años.

Cuando se ajustaron los modelos por NO_2 y SO_2 (cuadro III), los riesgos de mortalidad asociada con $PM_{2.5}$ (lag 0) se mantuvieron positivos y significativos, con excepción de la mortalidad cerebrovascular en todas las edades y EPOC en todas las edades. Los mayores riesgos de mortalidad se observaron en la población de 65 años o más, con un incremento en la mortalidad por causas respiratorias de 5.36% (IC95% 3.56-7.16) (lag 0) y neumonía e influenza de 6.63% (IC95% 3.09-9.37) (lag 0) por cada $10 \mu g/m^3$ de incremento de $PM_{2.5}$. Además, se observó un riesgo en la mortalidad por neumonía e influenza en los niños menores de cinco años de 11.16% (IC95% 1.03-21.39) (lag 0). Para el caso de partículas gruesas, cada $10 \mu g/m^3$ de incremento de $PM_{10-2.5}$ (lag 0) se asoció con un aumento de 0.53% (IC95% 0.22-0.83) en la mortalidad por todas las causas, 1.06% (IC95% 0.01-2.10) en la mortalidad por enfermedades respiratorias y 0.80% (IC95% 0.26-1.34) en la mortalidad por causas cardiovasculares.

Discusión

A la fecha existen numerosos estudios en el mundo que han analizado la asociación entre la calidad del aire y la mortalidad; no obstante, de acuerdo con nuestro conocimiento, este es el primero que estima la asociación entre la exposición aguda a $PM_{2.5}$, $PM_{10-2.5}$ y la mortalidad diaria por causas no externas, cardiovasculares y respiratorias en la Zona Metropolitana de Monterrey. Además, a diferencia de otras ciudades de México donde se han realizado estudios similares, la ZMM está ubicada en una zona semidesértica y tiene características orográficas e industriales particulares: una buena parte de la industria está ubicada en la zona centro de

Cuadro I
ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE VARIABLES
INCLUIDAS EN EL ESTUDIO. ZONA METROPOLITANA
DE MONTERREY (ZMM),
MÉXICO, PERIODO 2004-2014

Variable	Rango		Media	DE
	Mín.	Máx.		
Toda la causas* (A00-R99)‡				
Todas las edades	2	103	48.60	11.80
Cardiovascular (I00-I99)‡				
Todas las edades	0	40	15.10	5.10
>65 años	0	33	10.70	4.10
Cerebrovascular (I60-I69)‡				
Todas las edades	0	12	3.40	1.90
>65 años	0	9	2.40	1.60
Isquémica (I20-I25)‡				
Todas las edades	0	32	8.30	3.60
>65 años	0	26	5.90	2.90
Respiratoria (J00-J99)‡				
Todas las edades	0	22	4.60	2.80
<5 años				
>65 años	0	17	3.40	2.20
EPOC (J19-J46)‡				
Todas las edades	0	10	1.70	1.50
>65 años	0	10	1.50	1.40
Neumonía e influenza (J10-J18)‡				
Todas las edades	0	14	2.00	1.70
<5 años	0	3	0.10	0.20
>65 años	0	9	1.30	1.30
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	4.56	126.60	26.59	11.06
$PM_{2.5-10}$ ($\mu g/m^3$)	0.19	187.44	48.83	21.15
SO_2 (ppm)	0.00	0.45	0.04	0.02
NO_2 (ppm)	0.01	0.45	0.01	0.00
Temperatura (°C)	-2.00	34.00	22.65	6.17
Humedad relativa (%)	6.46	100.00	60.52	15.97

* Clasificación Internacional de Enfermedades

‡ Excluye accidentes y lesiones

DE: desviación estándar; EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; $\mu g/m^3$: microgramos por metro cúbico; ppm: partes por millón
 NO_2 : dióxido de nitrógeno; SO_2 : dióxido de azufre

la metrópoli, además existen zonas de aprovechamiento de caliza dentro de la ciudad. Asimismo, la calidad de los combustibles derivados del petróleo que se utilizan en la ZMM es menor que la de los que se utilizan, por ejemplo, en la Ciudad de México.¹⁷

Los resultados muestran una asociación estadísticamente significativa entre la exposición diaria a

Cuadro II
PORCENTAJE DE INCREMENTO E IC95% EN LA MORTALIDAD ASOCIADA CON EL INCREMENTO 10 µg/m³ DE PM_{2.5} Y PM_{10-2.5}• MODELO BASAL.* ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY (ZMM), MÉXICO, PERIODO 2004-2014

PM _{2.5}	Cardiovascular % (IC95%)	Cerebrovasculares % (IC95%)	Isquémica % (IC95%)	Todas las edades			EPOC % (IC95%)	Neumonía/influenza % (IC95%)	Todas las causas % (IC95%)	Respiratorias % (IC95%)
				Respiratorias % (IC95%)	Menores de cinco años	Menores de cinco años				
lag 0	1.84 (1.04, 2.64)	1.96 (0.18, 3.74)	1.50 (0.47, 2.54)	3.15 (1.77, 4.54)	2.07 (-0.29, 4.43)	3.97 (1.81, 6.13)	1.65 (1.20, 2.10)	4.92 (-3.72, 13.64)		
lag 1	-0.45 (-1.51, 0.62)	-0.02 (-2.18, 2.15)	-0.66 (-2.03, 0.72)	1.61 (-0.28, 3.50)	2.32 (-0.47, 5.12)	0.58 (-2.93, 4.11)	0.28 (-0.35, 0.91)	4.06 (-6.54, 14.77)		
lag 3	0.19 (-0.59, 0.98)	0.40 (-1.24, 2.03)	0.26 (0.77, 1.30)	-1.64 (-3.02, -0.26)	-0.65 (-2.73, 1.43)	-3.52 (-5.96, -1.07)	-0.55 (-1.04, -0.06)	-3.87 (-13.17, 5.53)		
lag 7	-0.52 (-1.33, 0.30)	-0.17 (-1.85, 1.51)	-0.65 (1.77, 0.47)	-0.73 (-2.15, 0.68)	-0.61 (-2.67, 1.45)	-1.97 (-4.61, 0.68)	-0.54 (-1.01, -0.08)	1.79 (-6.45, 10.11)		
				Mayores de 65 años						
lag 0	3.83 (2.89, 4.78)	4.15 (2.18, 6.13)	3.30 (2.02, 4.58)	4.48 (2.87, 6.10)	3.19 (0.69, 5.70)	5.10 (2.64, 7.56)				
lag 1	-0.02 (-1.23, 1.19)	0.33 (-2.23, 2.90)	-0.49 (-2.06, 1.09)	2.25 (0.28, 4.22)	3.01 (-0.02, 6.05)	0.42 (-3.23, 4.08)				
lag 3	1.27 (0.39, 2.15)	1.30 (-0.67, 3.26)	1.21 (0.03, 2.46)	0.02 (-1.54, 1.59)	1.26 (-0.91, 3.43)	-2.37 (-5.11, 0.37)				
lag 7	0.45 (-0.59, 1.49)	0.85 (-1.18, 2.88)	0.38 (1.01, 1.77)	0.66 (-0.89, 2.22)	0.64 (-1.49, 2.79)	-0.59 (-3.33, 2.17)				
				Todas las edades						
PM _{10-2.5}										Menores de cinco años
lag 0	0.97 (0.52, 1.42)	0.58 (-0.40, 1.56)	0.79 (0.17, 1.41)	1.14 (0.22, 2.06)	0.62 (-0.78, 2.02)	1.32 (-0.15, 2.80)	0.73 (0.47, 1.00)	-1.53 (-6.58, 3.54)		
lag 1	-0.36 (-0.92, 0.21)	-0.72 (-1.90, 0.47)	-0.36 (-1.12, 0.39)	0.37 (-0.68, 1.42)	0.82 (-0.83, 2.47)	-0.21 (-2.00, 1.58)	0.20 (-0.14, 0.53)	6.71 (1.04, 12.41)		
lag 3	-0.16 (-0.60, 0.27)	-0.36 (-1.36, 0.64)	0.01 (-0.57, 0.59)	-0.99 (-1.80, -0.18)	-0.87 (-2.05, 0.32)	-1.27 (-2.67, 0.14)	-0.19 (0.47, 0.08)	3.71 (-0.92, 8.36)		
lag 7	0.07 (-0.38, 0.53)	0.54 (-0.37, 1.45)	0.26 (-0.34, 0.85)	1.11 (0.31, 1.90)	1.13 (-0.07, 2.33)	0.77 (-0.50, 2.05)	0.02 (0.24, 0.28)	3.54 (-0.82, 7.92)		
				Mayores de 65 años						
lag 0	1.90 (1.34, 2.45)	1.46 (0.32, 2.59)	1.62 (0.88, 2.35)	1.70 (0.63, 2.77)	1.13 (-0.37, 2.63)	1.50 (-0.17, 3.16)				
lag 1	-0.28 (-0.98, 0.42)	-0.82 (-2.26, 0.63)	-0.15 (-1.03, 0.73)	0.43 (-0.78, 1.64)	1.24 (-0.49, 2.97)	-0.56 (-2.63, 1.52)				
lag 3	0.05 (-0.47, 0.57)	0.35 (-0.81, 1.51)	-0.12 (-0.82, 0.59)	-0.78 (-1.71, 0.16)	-0.37 (-1.63, 0.90)	-1.14 (-2.73, 0.46)				
lag 7	0.33 (-0.23, 0.88)	0.93 (-0.16, 2.02)	0.55 (-0.15, 1.26)	1.15 (0.22, 2.07)	1.62 (0.33, 2.91)	0.67 (-0.78, 2.13)				

* Los modelos se ajustaron por temperatura, humedad relativa, días de la semana y días festivos. EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; IC95%: intervalo de confianza al 95%

Cuadro III
PORCENTAJE DE INCREMENTO E IC95% EN LA MORTALIDAD ASOCIADA CON EL INCREMENTO 10 µg/m3 DE PM_{2.5} Y PM_{10-2.5}: MODELO AJUSTADO POR CONTAMINANTES.* ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY (ZMM), MÉXICO, PERIODO 2004-2014

PM _{2.5}	Todas las edades										Menores de cinco años			
	Cardiovascular % (IC95%)	Cerebrovasculares % (IC95%)	Isquémica % (IC95%)	Respiratorias % (IC95%)	EPOC % (IC95%)	Neumonía/influenza % (IC95%)	Todas las causas % (IC95%)	Respiratorias % (IC95%)	Menores de cinco años					
lag 0	1.60	-0.05, 4.13	1.27	(0.07, 2.48)	3.48	(1.91, 5.05)	1.28	(-1.37, 3.93)	4.53	(2.08, 6.98)	1.42	(0.89, 1.94)	11.16	(1.03, 21.39)
lag1	-0.46	(-1.52, 0.61)	-0.08	(-2.25, 2.09)	-0.67	(-2.04, 0.70)	1.56	(-0.35, 3.47)	2.42	(-0.37, 5.21)	0.47	(-3.13, 4.09)	3.44	(-7.76, 14.76)
lag 3	0.24	(-0.55, 1.03)	0.39	(-1.25, 2.04)	0.31	(-0.72, 1.35)	-1.63	(-3.02, -0.24)	-0.54	(-2.62, 1.55)	-3.41	(-5.91, -0.91)	-4.48	(-13.91, 5.04)
lag 7	-0.51	(-1.33, 0.30)	-0.16	(-1.83, 1.52)	-0.64	(-1.76, 0.48)	-0.67	(-2.07, 0.74)	-0.60	(-2.65, 1.45)	-1.78	(-4.45, 0.90)	-0.55	(-1.01, -0.08)
	Mayores de 65 años													
lag 0	3.37	(2.15, 4.59)	4.07	(1.73, 6.42)	3.01	(1.45, 4.58)	5.36	(3.56, 7.16)	3.19	(0.69, 5.70)	6.63	(3.91, 9.37)		
lag1	0.02	(-1.19, 1.23)	0.32	(-2.26, 2.89)	-0.48	(-2.06, 1.10)	2.19	(0.22, 4.17)	3.01	(-0.02, 6.05)	0.28	(-3.40, 3.97)		
lag 3	1.32	(0.43, 2.20)	1.30	(-0.68, 3.28)	1.23	(-0.02, 2.48)	-0.11	(-1.68, 1.48)	1.26	(-0.91, 3.43)	-2.48	(-5.23, 0.27)		
lag 7	0.41	(-0.62, 1.45)	0.83	(-1.19, 2.86)	0.34	(-1.04, 1.73)	0.66	(-0.89, 2.22)	0.64	(-1.49, 2.79)	-0.48	(-3.23, 2.28)		
	Todas las edades													
PM10 _{2.5}														
lag 0	0.80	(0.26, 1.34)	0.43	(-0.71, 1.58)	0.65	(-0.08, 1.38)	1.06	(0.01, 2.10)	-0.12	(-1.78, 1.55)	1.22	(-0.40, 2.85)	0.53	(0.22, 0.83)
lag1	-0.35	(-0.92, 0.22)	-0.73	(-1.92, 0.47)	-0.36	(-1.12, 0.39)	0.40	(-0.65, 1.44)	0.95	(-0.70, 2.59)	-0.19	(-1.98, 1.61)	0.25	(-0.10, 0.59)
lag 3	-0.15	(-0.58, 0.29)	-0.34	(-1.34, 0.66)	0.03	(-0.56, 0.61)	-0.96	(-1.77, -0.15)	-0.82	(-2.01, 0.36)	-1.15	(-2.55, 0.25)	-0.18	(-0.46, 0.10)
lag 7	0.08	(-0.38, 0.54)	0.55	(-0.36, 1.46)	0.26	(-0.33, 0.86)	1.13	(0.33, 1.92)	1.16	(-0.04, 2.36)	0.85	(-0.42, 2.12)	0.03	(-0.23, 0.29)
	Mayores de 65 años													
lag 0	1.40	(0.72, 2.09)	0.94	(-0.38, 2.25)	1.26	(0.37, 2.15)	1.80	(0.58, 3.03)	0.61	(-1.18, 2.41)	1.74	(-0.14, 3.61)		
lag1	-0.24	(-0.94, 0.46)	-0.79	(-2.23, 0.66)	0.39	(-1.03, 0.74)	0.45	(-0.77, 1.66)	-0.01	(-2.04, 2.02)	-0.57	(-2.65, 1.51)		
lag 3	0.06	(-0.46, 0.58)	0.38	(-0.78, 1.54)	-0.12	(-0.82, 0.59)	-0.80	(-1.74, 0.15)	-0.35	(-1.62, 0.92)	-1.12	(-2.71, -0.48)		
lag 7	0.33	(-0.22, 0.88)	0.96	(-0.14, 2.05)	0.55	(-0.15, 1.26)	1.14	(0.21, 2.06)	1.62	(0.34, 2.91)	0.69	(-0.77, 2.15)		

EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; IC95%: intervalo de confianza al 95%

* Los modelos se ajustaron por temperatura, humedad relativa, NO₂ y SO₂, días de la semana y días festivos.

PM_{2.5}, PM_{10-2.5} y el riesgo de mortalidad, lo que permite observar un mayor incremento en el riesgo de mortalidad para las causas cardiovasculares y respiratorias en adultos mayores de 65 años y respiratorias en niños menores de cinco años.

Investigaciones realizadas en la Ciudad de México han estudiado la asociación entre la exposición a PM_{2.5} y la mortalidad, y reportado que cada incremento de 10 µg/m³ de PM_{2.5} (lag 0 y lag 4, sin ajuste por otros contaminantes) se asocia con un aumento de 1.40% (IC95% 0.2-2.5) en el riesgo de mortalidad por todas las causas (excluyendo causas externas) y todas las edades.¹⁸ En el presente análisis, el incremento en el riesgo estimado para la misma causa y categoría de edad fue consistente en términos de la magnitud y dirección de la asociación: 1.65% (IC95% 1.20-2.10) y 1.42% (IC95% 0.89-1.94) (lag 0, modelo sin ajuste por otros contaminantes y con ajuste por otros contaminantes, respectivamente).

Recientemente, Gutierrez-Ávila y colaboradores reportaron en la Ciudad de México un aumento de 3.19% (IC95% 0.44-6.01) y de 3.37% (IC95% 0.09-6.76) en el riesgo de mortalidad por causas cerebrovasculares y cardiovasculares, asociado con el incremento de 10 µg/m³ de PM_{2.5} (lag 1) en adultos mayores de 65 años; mientras que para las causas cardiovasculares el riesgo de mortalidad (lag 0) fue de 1.20% (IC95% 0.41-1.99) y 0.53% (IC95% -0.41-1.48) (modelos basales y ajustados por NO₂ y SO₂, respectivamente).¹⁹ En esta investigación, los estimadores ajustados por contaminantes fueron ligeramente mayores pero consistentes con lo reportado en el estudio descrito: 4.07% (IC95% 1.73-6.42) por causas cerebrovasculares y 3.37% (IC95% 2.15-4.59) para la mortalidad cardiovascular (lag 0). Las diferencias pueden deberse a las particularidades de la exposición en cada población como las fuentes de emisión, las cuales determinan la composición química de las partículas y su toxicidad, o la aproximación metodológica; sin embargo, los resultados describen de forma consistente el efecto de las partículas sobre la mortalidad en la ZMM y evidencian la población más vulnerable: niños y adultos mayores.

En general, la literatura ha reportado resultados consistentes del efecto de las partículas en la mortalidad, como el reciente estudio multicidadad realizado con datos de 24 diferentes países y 652 ciudades, incluyendo las ciudades mexicanas de Monterrey, Guadalajara y Ciudad de México.²⁰ En dicho estudio se reportó un aumento promedio en el riesgo de mortalidad de 0.68% (IC95% 0.59-0.77) para las causas no externas, de 0.55% (IC95% 0.45-0.66) para mortalidad cardiovascular y 0.74% (IC95% 0.53-0.95) para mortalidad respiratoria por cada 10 µg de PM_{2.5} en los dos días previos, y de 1.29% (IC95% 0.53-0.95) (estimador resumen) por todas las

causas de mortalidad para las tres ciudades mexicanas incluidas.²⁰ Los resultados del estudio refuerzan lo encontrado de manera local en el presente estudio donde, comparativamente y en términos de orden de magnitud, se observa un mayor riesgo asociado con las PM_{2.5}. Esto puede deberse a las diferencias metodológicas o a la composición particular del material suspendido, ya que una proporción importante de las PM_{2.5} de la ZMM está constituida por sulfato. El sulfato se forma en su gran mayoría del SO₂ proveniente de la refinería de Cadereyta y del combustible que se utiliza en el transporte y en la industria con alto contenido de azufre.¹⁷

En cuanto a los efectos de las partículas gruesas (PM_{10-2.5}), la estimación del incremento en el riesgo de mortalidad por todas las causas y todas las edades fue de 0.53% (IC95% 0.22-0.83) por cada 10 µg/m³ de incremento del contaminante. Estos resultados concuerdan en el sentido de la asociación y significancia con lo observado por Castillejos y colaboradores: por cada 10 µg/m³ de incremento en las PM_{10-2.5} se incrementa el riesgo de mortalidad de 4.07% (IC95% 2-49-5.66), aunque el valor absoluto del estimador es mayor en la Zona Metropolitana del Valle de México.²¹ Investigaciones realizadas en otros países como China y Holanda no encontraron asociaciones entre las concentraciones diarias a PM_{10-2.5} y el riesgo de mortalidad.^{22,23}

Con respecto a las estimaciones por grupo etario, en este estudio se observaron riesgos más elevados para los menores de cinco años y para los mayores de 65 años. En el caso de la población infantil, esto podría explicarse debido a que los niños tienen un desarrollo continuo de sus pulmones durante el periodo posnatal temprano y por tanto un sistema inmune inmaduro, además de una mayor frecuencia respiratoria; participan más en actividades físicas vigorosas y pasan periodos más largos al aire libre, lo que los hace más vulnerables a los efectos adversos para la salud de la contaminación del aire.²⁴⁻²⁸ En cuanto a la población adulta mayor, el envejecimiento es un proceso continuo de disminución progresiva de la función del cuerpo que conduce a una mayor vulnerabilidad, fragilidad o sensibilidad. Además, con el aumento de la edad, el sistema inmunológico sufre alteraciones que culminan en un deterioro progresivo de la capacidad de respuesta a las infecciones, con el consiguiente aumento de la morbilidad y la mortalidad debido a enfermedades infecciosas en este grupo etario.²⁹

Conclusiones

La mala calidad del aire es un riesgo importante para la salud pública y en este estudio se corrobora lo reportado en otras ciudades del mundo. Como se observa en los resultados obtenidos, la mayor contribución de este

factor de riesgo a la carga de la enfermedad resulta de la mortalidad por causas respiratorias en la infancia. Para reducir esta carga de la enfermedad y sus costos asociados, es importante que las intervenciones ayuden a reducir las emisiones y la exposición a los contaminantes del aire sobre todo para los grupos vulnerables identificados.

Limitaciones

Es importante considerar que los diseños de estudio ecológicos, a pesar de ser una herramienta valiosa para evaluar los efectos agudos de la contaminación del aire, tienen algunas limitaciones. Una de éstas inherente a estos estudios es que no se pueden evaluar características individuales de los individuos, como hábito tabáquico. Además, la medición de la exposición se basó en registros de calidad del aire provenientes de estaciones de monitoreo fijo, con lo cual no se tienen patrones individuales de actividad. Esto podría introducir un error de medición aleatorio en la exposición. Sin embargo, las diferencias entre las exposiciones personales y el promedio estimado de las exposiciones personales causan poco o ningún sesgo en los coeficientes estimados.^{30, 31}

Declaración de conflicto de intereses. Los autores declararon no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. GBD 2017 Risk Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet*. 2017;392(10159):1923-94. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32225-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32225-6)
2. Shanshan L, Linping C, Shuohua C, Shouling W, Yuming G. Acute effects of hourly particulate-matter air pollution on 24 h ambulatory blood pressure in Chinese elderly individuals: a prospective panel study. *Lancet*. 2017;390:S86. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)33224-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)33224-5)
3. Yamazaki S, Shima M, Ando M, Nitta H, Watanabe H, Nishimuta T. Effect of hourly concentration of particulate matter on peak expiratory flow in hospitalized children: a panel study. *Environ Health*. 2011;10:15. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-15>
4. Cheryl SP, Barbara EJ, James AV, Yue Z, Robert P, Nathan CD. Short-term air pollution and incident pneumonia. A case–crossover study. *Ann Am Thorac Soc*. 2018;15(4):449-59. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201706-495OC>
5. Choi J, Oh JY, Lee YS, Min KH, Hur GY, Lee SY, et al. Harmful impact of air pollution on severe acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease: particulate matter is hazardous. *Int Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2018;13:1053-9. <https://doi.org/10.2147/COPD.S156617>
6. Huibin D, Yongquan Y, Shen Y, Yan L, Zhiyong C, Guiying L, et al. Acute effects of air pollution on ischaemic stroke onset and deaths: a time-series study in Changzhou, China. *BMJ Open*. 2018;8(7):e020425. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-020425>
7. Pan X, Yang M, Fan T. Time-series analysis of air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China. *Epidemiology*. 2008;19(6):S170-1. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000340024.85524.f5>
8. Tae-Young K, Ho K, Seung-Muk Y, Jang-Pyo C, Jongbae H. Short-term effects of ambient PM_{2.5} and PM_{2.5-10} on mortality in major cities of Korea. *Aerosol Air Qual Res*. 2018;18:1853-62. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0490>
9. Gutiérrez-Ávila I, Rojas-Bracho L, Riojas-Rodríguez H, Kloog I, Just A, Rothenberg S. Cardiovascular and cerebrovascular mortality associated with acute exposure to PM_{2.5} in Mexico City. *Stroke*. 2018;49(7):1734-6. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.021034>
10. Brunekreef B, Forsberg B. Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health. *Eur Respir J*. 2005;26(2):309-18. <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00001805>
11. Secretaría de Desarrollo Sustentable. Estadística 2018 sobre calidad del aire en la zona metropolitana de Monterrey [internet]. Monterrey: Gobierno del Estado de Nuevo León, 2018 [citado agosto 20, 2019]. Disponible en: http://Alre.nl.gob.mx/rep_estadisticas.html
12. Gobierno del Estado de Nuevo León. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León 2016-2025. Nuevo León: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Secretaría de Desarrollo Sustentable/Gobierno del Estado de Nuevo León, 2016 [citado agosto 20, 2019]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250974/ProAire_Nuevo_Leon.pdf
13. Villa-Mar FV, Gándara-Fierro G, Reyna-Caamaño R, Mejía-Velázquez G. Economic Benefits of PM₁₀ Reduction in the MMA. Proceedings of the 101 Conference of Awma; junio 24-27, 2008; Portland, Oregon.
14. Trejo-González AG, Riojas-Rodríguez H, Texcalac-Sangrador JL, Guerrero-López CM, Cervantes-Martínez K, Hurtado-Díaz M, et al. Quantifying health impacts and economic costs of PM_{2.5} exposure in Mexican cities of the National Urban System. *Int J Public Health*. 2019;64:561-72. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01216-1>
15. Romieu I, Gouveia N, Abdóns L, De-León A, Washington J, Vera J, et al. Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study). *Res Rep Health Eff Inst*. 2012;(171):5-86.
16. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mortalidad [internet]. Ciudad de México: INEGI, 2018 [citado agosto 20, 2019]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/mortalidad/MortalidadGeneral.asp>
17. Comisión Reguladora de Energía. Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016: Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2016 [citado agosto 20, 2019]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016
18. Borja-Aburto VH, Castillejos M, Gold DR, Bierzwinski S, Loomis D. Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. *Environ Health Perspect*. 1998;106(12):849-55. <https://doi.org/10.1289/ehp.106-1533229>
19. Gutiérrez-Ávila I, Rojas-Bracho L, Riojas-Rodríguez H, Kloog I, Just AC, Rothenberg SJ. Cardiovascular and cerebrovascular mortality associated with acute exposure to PM_{2.5} in Mexico City. *Stroke*. 2018;49(7):1734-6. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.021034>
20. Liu C, Chen R, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Tong S, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *N Engl J Med*. 2019;381(8):705-15. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1817364>
21. Castillejos M, Borja-Aburto VH, Dockery WD, Gold DR, Loomis D. Airborne coarse particles and mortality. *Inhal Toxicol*. 2000;12(supl 1):61-72. <https://doi.org/10.1080/0895-8378.1987.11463182>
22. Kan H, London SJ, Chen G, Zhang Y, Song G, Zhao N, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China. *Environ Int*. 2007;33(3):376-84. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.12.001>

23. Janssen NA, Fischer P, Marra M, Ameling C, Casse FR. Short-term effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on daily mortality in the Netherlands. *Sci Total Environ*. 2013;463-464:20-6. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>
24. Pinkerton KE, Joad JP. The mammalian respiratory system and critical windows of exposure for children's health. *Environ Health Perspect*. 2000;108(3):457-62. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s3457>
25. Dixon JK. Kids need clean air: Air pollution and children's health. *Fam Community Health*. 2002;24(4):9-26. <https://doi.org/10.1097/00003727-200201000-00004>
26. Gilliland FD, McConnell R, Peters J, Gong H. A theoretical basis for investigating ambient air pollution and children's respiratory health. *Environ Health Perspect*. 1999;107(supl 3):403-7. <https://doi.org/10.1289/ehp.99107s3403>
27. Pinkerton KE, Joad JP. The mammalian respiratory system and critical windows of exposure for children's health. *Environ Health Perspect*. 2000;108(3):457-62. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108s3457>
28. Poland GA, Ovsyannikova IG, Kennedy RB, Lambert ND, Kirkland JL. A systems biology approach to the effect of aging, immunosenescence and vaccine response. *Curr Opin Immunol*. 2014;29:62-8. <https://doi.org/10.1016/j.coi.2014.04.005>
29. World Health Organization. Ageing and health [internet]. Ginebra: WHO, 2018 [citado agosto 20, 2019]. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ageing-and-health>
30. Armstrong BG. Effect of measurement error on epidemiological studies of environmental and occupational exposures. *Occup Environ Med*. 1998;55(10):651-6. <https://doi.org/10.1136/oem.55.10.651>
31. Zeger SL, Thomas D, Dominici F, Samet JM, Schwartz J, Dockery D, Cohen A. Exposure measurement error in time-series studies of air pollution: concepts and consequences. *Environ Health Perspect*. 2000;108(5):419-26. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108419>