

Efecto del tiempo de exposición a PM₁₀ en las urgencias por bronquitis aguda

Effect of exposure time to PM₁₀ on emergency admissions for acute bronchitis

Franz Muñoz ¹
Marília Sá Carvalho ¹

¹ Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, Brasil.

Correspondencia

F Muñoz
Departamento de Epidemiologia e Métodos Quantitativos em Saúde, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rua Leopoldo Bulhões 1480, Rio de Janeiro, RJ 21041-210, Brasil.
ecosinergia@gmail.com

Abstract

To study the health effect of air pollution, measured as particulate matter greater than 10mm in diameter (PM₁₀), we analyzed the effect of daily hours of exposure on the number of urgency admissions for acute bronchitis, adjusting for temperature and humidity on the same day. The study was conducted in six regions of Santiago, Chile, during the winter of years 2002 to 2004, for infants and elders. The delay between pollution time series and disease was modeled using a polynomial distributed lag (PDL) function included in a generalized linear model. The linearity assumption was evaluated using a smooth-spline model approach. The highest effect for exposure to PM₁₀ was detected with 4 days of delay. For both groups, the effect of temperature was linear, but that of humidity was not. Air pollution effect varied according to level of exposure and geographic region, increasing by 3% the total number of infant emergency consultations for each hour of exposure to levels greater than 150µg/m³. The study thus showed a significant impact of air pollution on population health.

Bronchitis; Air Pollution; Exposure Time

Introducción

La contaminación del aire es un problema prioritario de salud pública en Santiago de Chile. Durante invierno, los meses con mayor contaminación del aire, la demanda de servicios de urgencia por enfermedades respiratorias incrementa, especialmente en los sectores localizados al Oeste de la ciudad ¹. En este trabajo analizamos el efecto del tiempo de exposición a material particulado PM₁₀ en las consultas diarias de urgencias por bronquitis aguda (código J20 de la Clasificación Internacional de Enfermedades – 10ª revisión – CIE-10) en seis sectores de la ciudad de Santiago desde el año 2002 al 2004.

La ciudad de Santiago está ubicada en una cuenca cerrada por cerros y la cordillera de los Andes. Esta situación topográfica, sumada a los fenómenos de inversión térmica, genera una disminución de la dispersión vertical de los contaminantes en invierno, produciendo incrementos sostenidos de material particulado a baja altura ². Las estaciones localizadas en el sector Centro (Parque O'Higgins) y Oeste (Pudahuel) de la ciudad han reportado históricamente los niveles más altos de contaminación por partículas ³. Para explicar esta heterogeneidad, Gramsch et al. ⁴ muestran la existencia de variaciones en la presión atmosférica en el territorio, producto de las características topográficas y de altura de la región. Asimismo, las estructuras temporales del PM₁₀ poseen dependencia

espacial, sugiriendo variaciones en los niveles de exposición poblacional dentro de la ciudad, principalmente del sector Oeste de la ciudad.

La respuesta poblacional a la contaminación del aire depende de la concentración y del tiempo de exposición ⁵, por lo tanto, un indicador que capture el tiempo de exposición a partículas, puede ser más adecuado en estudios epidemiológicos para estimar un efecto de corto plazo, antes que una media aritmética cada 24 horas, como indican las referencias de calidad ambiental ⁶ y de salud humana ⁷. El efecto de la contaminación atmosférica en las poblaciones posee tres características fundamentales: (1) el efecto de una exposición puede tardar tiempo en aparecer o ser detectado, (2) el comportamiento del efecto de la exposición puede ser no-lineal, y (3) la magnitud del efecto puede variar según la localidad geográfica.

En estadística, para conocer el comportamiento del efecto de una covariable desfasada en el tiempo, los modelos lineales generalizados (GLM) con funciones polinomiales distributivas (GLM-pdl) ⁸ pueden ser una buena opción, ya que consiguen eliminar los efectos de colinealidad en series altamente correlacionadas, como son las de contaminación atmosférica, y con ello estimar en una misma ecuación, el efecto de la exposición en días sucesivos. Además de ello, para analizar el comportamiento del efecto de una covariable bajo una perspectiva no lineal, los modelos aditivos generalizados (GAM), introducidos por Hastie ⁹ como una extensión no paramétrica de los GLM, son una buena opción por su flexibilidad, ya que proveen de técnicas de alisamiento, denominadas de *spline*, que capturan información no lineal de los datos. Una variación en estas técnicas fue introducida por Wood & Augustin ¹⁰, donde la función de alisamiento *spline* es estimada recursivamente como parte del proceso de ajuste del modelo.

Nosotros creemos que este trabajo de investigación es pionero en el uso de un nuevo indicador de exposición humana, e innovador al intentar entender la variación del efecto en salud de la contaminación del aire, dentro de la ciudad, mediante un abordaje no lineal del problema.

Materiales y métodos

Datos de salud y población

Se recogieron los datos de salud de 14 hospitales de Santiago (7 para niños y 7 para adultos) entre los años 2002 y 2004 del programa IRA ¹¹ (infecciones respiratorias agudas) del Ministerio de Salud de Chile. Los datos contienen la cuenta

diaria, entre abril y agosto (153 días), de las consultas de urgencias por bronquitis aguda (J20/CIE-10) en lactantes (menores a 1 año) y adultos mayores (mayores a 65 años) en los servicios de urgencia de grandes hospitales. Estos 14 centros asistenciales conforman toda la red de hospitales del sistema público de salud de Santiago, con una cobertura aproximada del 60% del total de la población. Cada hospital en Santiago tiene una población asignada según sector geográfico, y esta información fue usada como base en los cálculos.

Datos de contaminación y clima

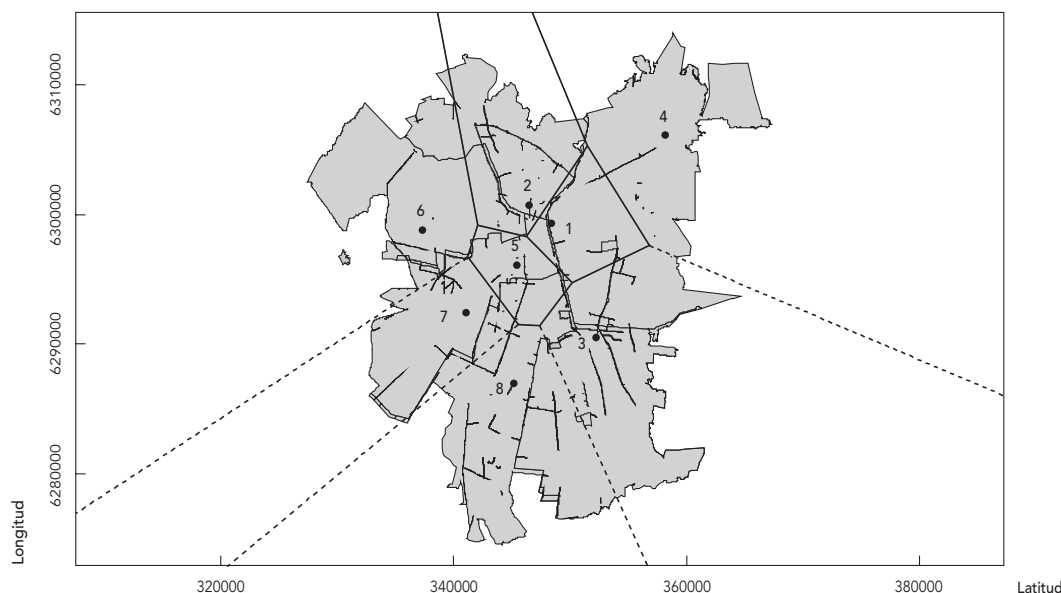
Los datos de concentración de PM₁₀ en µg/m³ fueron obtenidos desde ocho estaciones de monitoreo que conforman, a través de la ciudad, la red de monitoreo de calidad del aire (Figura 1). Recogimos los datos correspondientes al período de invierno (abril hasta agosto) de los años 2002, 2003 y 2004 por cada estación de monitoreo. Posteriormente, ordenamos los datos de cada estación de monitoreo y discretizamos las 24 horas del día, según ocho niveles de concentración de PM₁₀ en la atmósfera. Estas concentraciones fueron: > 25µg/m³, > 50µg/m³, > 100µg/m³, > 125µg/m³, > 150µg/m³, > 175µg/m³, > 200µg/m³, y > µg/m³. Los datos de temperatura mínima (en grados Celsius) y humedad relativa del aire (en porcentaje), durante el período de estudio por cada sector geográfico, fueron obtenidos del servicio de meteorología de la Región Metropolitana de Santiago.

Agregación de información

Al considerar que los datos de salud y de contaminación atmosférica fueron extraídos desde distintos puntos de Santiago, realizamos un diagrama de Voronoi ¹², basados en la ubicación geográfica de cada estación de monitoreo, consiguiendo identificar ocho sectores que representan el área aproximada de monitoreo de cada estación en el territorio. Cada una de estas áreas fue cruzada con los sectores de cobertura de cada hospital. Así, fue creada una base de datos conteniendo las series en salud y de PM₁₀ pareadas, según día de la observación y sector geográfico. Los sectores que entraron al estudio fueron seis: sector Norte (Estación N^o. 2), Sureste (Estación N^o. 3), Centro (Estación N^o. 5), Oeste (Estación N^o. 6), Suroeste (Estación N^o. 7) y Sur (Estación N^o. 8), como se observa en la Figura 1. Los sectores donde se ubican las estaciones N^o. 1 y N^o. 4 no ingresaron en el análisis, debido a que la información en salud disponible de esos sectores caracterizó parcialmente la realidad de esa área.

Figura 1

Diagrama de Voronoi del casco urbano, de acuerdo a las estaciones de monitoreo (en números). Líneas gruesas indican carreteras y caminos de alto tráfico vehicular.



Métodos estadísticos

Para entender la dispersión y el comportamiento temporal del grupo de datos en cada variable, durante el período de estudio (153 días), graficamos la nube de puntos (padrón de dispersión) y luego estimamos una curva de tendencia mediante alisamiento *spline*.

Análisis del retraso temporal del efecto

Al analizar el retraso temporal entre el efecto y la exposición, nos encontramos con la condición de colinearidad entre variables. Para evitar este problema, en la estimación del efecto en días sucesivos usamos un modelo GLM con una función polinomial distributiva. Los GLM son una extensión de los modelos lineales, donde la variable respuesta puede asumir una distribución de la familia exponencial, tal como Poisson. El GLM-pdl asume que el efecto fijo β de cada variable desfasada en el tiempo sigue una función polinomial de orden q y extensión p (lag), denominada también de función *pdl*(p,q) descrita a seguir:

$$\beta_p = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_q p^q$$

En nuestro trabajo, el retraso o *lag* del efecto fue definido hasta 6 días después de ocurrida la

exposición. Este efecto, ampliamente documentado en la literatura, es denominado de corto plazo. El orden p del polinomio fue determinado a partir de análisis que comparó el menor error estimado, según el Criterio de Información *Akaike* (AIC) en modelos con polinomios de segundo, tercer y cuarto orden. En el modelo ajustamos la sobredispersión de los datos mediante una distribución de *quasipoisson*, utilizando el logaritmo de la observación como función de enlace.

Análisis no lineal del efecto

Del paso anterior, seguimos a elegir el día que generó el mayor efecto y procedimos a modelar por GAM con las covariables de temperatura mínima y humedad del aire del mismo día de la exposición; esto para analizar la variación del efecto de cada covariable, al estratificar el modelo según nivel de concentración a PM₁₀ y sector geográfico definido en el diagrama de Voronoi. Los modelos GAM son una extensión de los GLM, donde el efecto de las covariables es estimado de forma no paramétrica. En nuestro trabajo utilizamos como método de estimación la regresión *spline*, donde el grado de alisamiento es estimado como parte del ajuste del modelo. Según Wood¹³, una

aproximación numérica del *spline* es el *edf* (*estimated degrees of freedom*), el cual se relaciona al grado de alisamiento, y puede ser considerado un indicador o *score* de no-linealidad del efecto. En nuestro análisis la biblioteca *pdl* para GLM fue utilizada y mejorada, insertando algunos ítems para entregar los intervalos de confianza, y de esta manera facilitar la interpretación gráfica del efecto desfasado en el tiempo. En GAM utilizamos la biblioteca *mgcv*. Ambas bibliotecas están disponibles en el programa estadístico R (The R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria; <http://www.r-project.org>).

Resultados

La Tabla 1 muestra las medias y desviación estándar (DS) de las tasas diarias de incidencia de consultas de urgencia por bronquitis aguda por año y sector geográfico en ambos grupos etéreos. Las tasas fueron calculadas según la población de lactantes y adultos mayores de cada sector geográfico, definido en el diagrama de Voronoi. En la Tabla 1 observamos variación de las medidas, tanto por sector geográfico, como por año en ambos grupos etéreos. En lactantes observamos un incremento anual en la tasa media total, co-

mo también en la desviación de las medidas. Al observar por sector geográfico, en lactantes notamos que el sector Centro presenta los valores más bajos, y el sector Sur los más altos, excepto el año 2003 donde el sector Suroeste presentó el máximo valor, no obstante, con alta variabilidad. En adultos mayores observamos un incremento anual de la media y la desviación estándar especialmente en los sectores Norte, Oeste y Suroeste. Ya los otros sectores presentan el máximo valor en el año 2003.

En la Figura 2 observamos la nube de dispersión de datos durante el período de invierno (153 días) de los tres años en conjunto para todos los sectores y variables en estudio. Destacó la alta dispersión de la variable humedad relativa y, la baja dispersión de las variables: horas de exposición a PM_{10} y consultas de urgencia por bronquitis aguda en adultos mayores. En la nube de puntos observamos que los datos para bronquitis aguda en lactantes tienden al incremento, en tanto, los de temperatura mínima tienden al decremento. De manera adicional, la nube de datos de PM_{10} , expresada como media diaria ponderada, tiende a decaer en el tiempo después de un rápido incremento a comienzo del período invernal. Los valores medio de PM_{10} sobrepasan varias veces la referencia ambiental ⁶ de $150\mu g/m^3$ y en salud ⁷

Tabla 1

Valores medios anuales de las tasas de incidencia por bronquitis en lactantes y adultos mayores, según sector geográfico y año de estudio. Santiago, Chile.

Sector de la ciudad	2002		2003		2004	
	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Media de las tasas de incidencia en lactantes (x 10.000)						
Centro	13,88	7,39	12,82	6,36	11,72	6,61
Norte	16,17	9,18	18,62	5,35	11,49	5,35
Oeste	19,50	12,00	21,13	10,42	18,11	9,43
Suroeste	16,11	7,85	26,77	20,40	34,22	19,43
Sur	28,18	18,96	31,19	18,93	30,94	12,39
Sureste	17,31	8,55	17,06	7,80	15,18	7,79
Total	18,52	5,07	21,26	6,70	20,28	10,34
Media de las tasas de incidencia en adultos mayores (x 100.000)						
Centro	5,67	3,28	6,33	3,67	5,22	3,99
Norte	3,70	3,31	9,17	5,35	11,49	5,35
Oeste	4,95	4,03	5,76	4,40	8,12	6,27
Suroeste	3,24	1,82	5,24	4,94	9,29	6,59
Sur	6,44	5,77	6,66	5,86	2,98	2,87
Sureste	2,60	1,67	3,36	1,07	3,16	2,33
Total	4,43	3,30	6,08	3,56	6,71	4,45

DS: desviación estándar.

de 50µg/m³, ambas como media aritmética cada 24 horas.

En la Figura 2 observamos las estructuras de tendencias de las variables en estudio, mediante alisamiento *spline*. Destacamos que la curva *spline* de la variable consulta de urgencia por bronquitis aguda en lactantes, muestra una forma sigmoidea a través del tiempo con dos máximos, uno durante el mes de mayo, y otro, con mayor amplitud, durante el mes de julio. En adultos mayores, la curva tiene la forma de parábola achatada en el centro y los valores máximos son observados entre los meses de junio y julio. Destacamos que el tiempo de exposición a PM₁₀

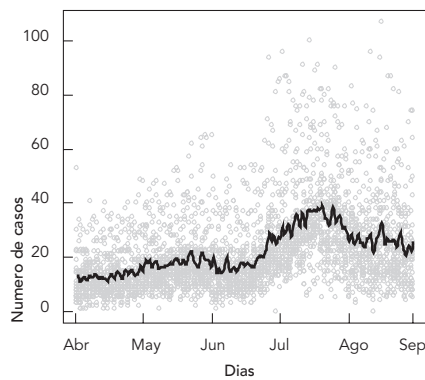
incrementa a comienzo del mes de mayo y se mantiene hasta final de julio y comienzo de agosto. Durante estos meses ocurre un incremento de la humedad y bajas temperaturas que favorecen las precipitaciones, ayudando a dispersar material particulado disminuyendo así, el tiempo de exposición a partículas en la población.

La Figura 3 muestra los coeficientes de regresión (logaritmo del riesgo relativo o *log-risk*) en las variables desfasadas mediante GLM-pdl con sus respectivos intervalos de 95% de confianza (5% de significancia) según (i) el día de ocurrida la exposición (números laterales) y (ii) el nivel de concentración de PM₁₀ en la atmósfera (nú-

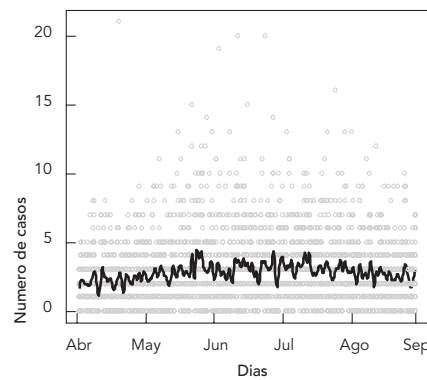
Figura 2

Patrón de dispersión de datos en las variables, durante el período de invierno (153 días), para todos los sectores y años de estudio con curvas *spline* estimadas para las consultas por urgencias, debidas a bronquitis aguda en población < 1 año (lactantes) y > 65 años (adultos mayores), temperatura mínima, humedad relativa del aire, y horas de exposición a concentraciones superiores a 50, 100, 150 y 200µg/m³, durante el período invernal entre el año 2002 y el 2004. Líneas verticales representan los meses entre abril y agosto.

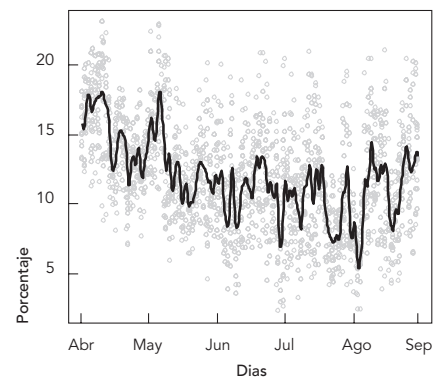
2a) Bronquitis aguda en < 1 año



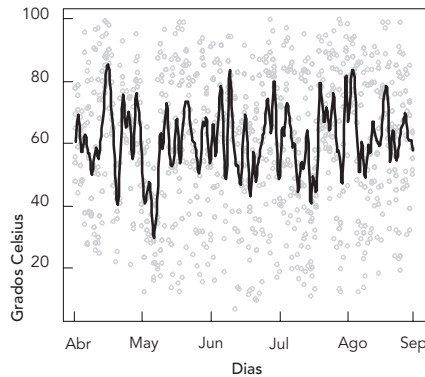
2b) Bronquitis aguda en > 65 años



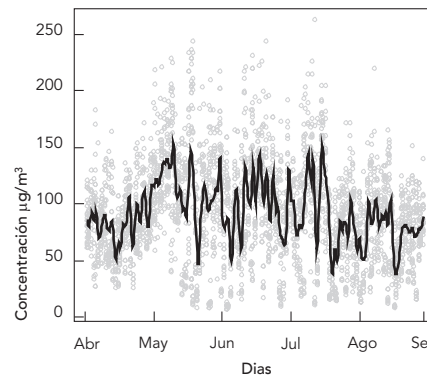
2c) Temperatura mínima (°C)



2d) Humedad relativa del aire (%)



2e) PM₁₀: concentración media con 24 horas



2f) PM₁₀: horas de exposición con 24 horas

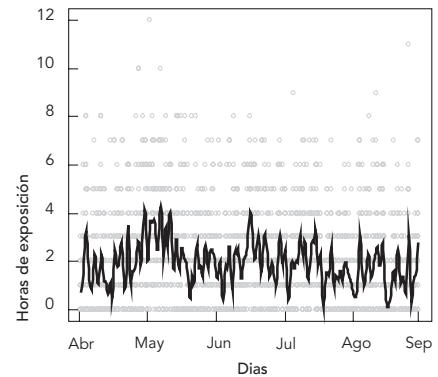
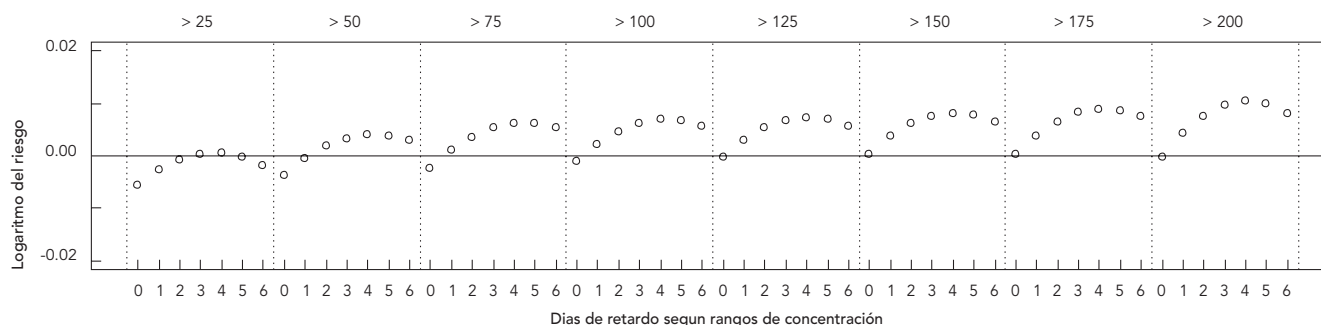


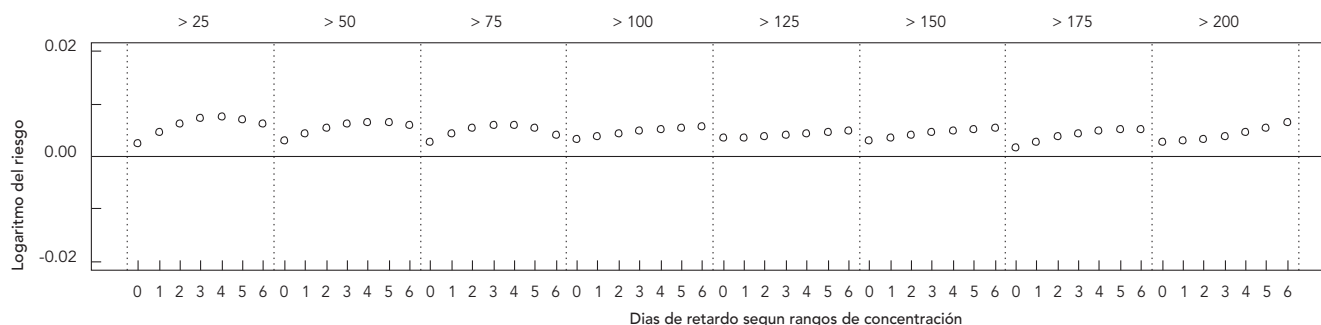
Figura 3

Coefficientes de regresión (logaritmo del riesgo o *log-risk*) con IC95%, de acuerdo a los últimos seis días de retardo en la exposición (números laterales). Líneas segmentadas separan los distintos niveles de concentración a PM_{10} (centro de ambos gráficos).

3a) < 1 año



3b) > 65 años



meros centrales). Los coeficientes de regresión representan la magnitud del efecto por cada hora de exposición a un determinado nivel de concentración a PM_{10} . En lactantes (< 1 año) observamos que el valor del coeficiente de riesgo varía según el día y severidad de la exposición, y son máximos al cuarto día de retardo (5ª posición). En adultos mayores (> 65 años) el coeficiente estimado se mantiene relativamente constante con un claro incremento del intervalo de confianza en la medida que incrementa la severidad de la exposición. Notamos en ambos casos, que mientras incrementa la severidad de la exposición, la forma del efecto a través de los días también se va modificando, especialmente en lactantes.

La Figura 4 muestra la estimación gráfica del efecto mediante regresión *spline* con los IC95% (línea segmentada), según (i) las horas de exposición a PM_{10} , (ii) temperatura mínima y (iii) humedad relativa del aire. Las estimaciones fueron

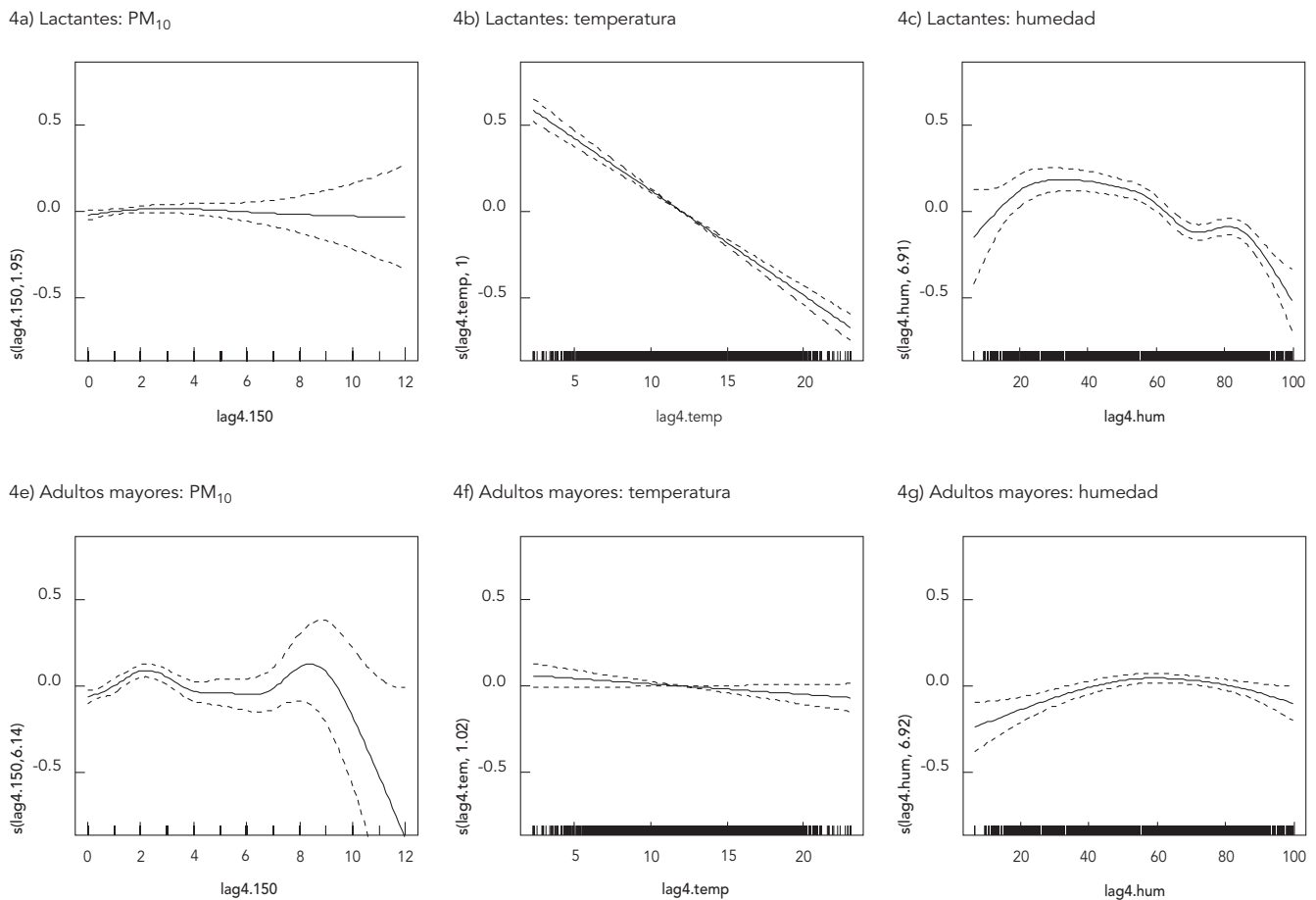
realizadas al cuarto día de ocurrida (5ª posición) una exposición superior a los $150 \mu g/m^3$ de PM_{10} , (referencia ambiental), tanto en lactantes como adultos mayores. En cada gráfico, la leyenda en el eje de la ordenada, denotada como $s(var, edf)$ se refiere a la estimación del *spline* en cada variable (*var*) del modelo, donde *edf* indica los grados de libertad estimados mediante GAM.

En lactantes observamos un incremento del efecto de la variable horas de exposición a PM_{10} ($edf = 4,03$) hasta dos horas de exposición continua, luego decae y pasadas cuatro horas de exposición, la curva pierde significancia estadística con incremento del IC95%. En tanto, el efecto de la temperatura es mayormente lineal y con pendiente negativa ($edf = 3,3$), notando que en los extremos de la curva aumenta el IC95%.

El efecto de la humedad muestra un comportamiento esencialmente no lineal ($edf = 5,92$), donde bajos porcentajes de humedad

Figura 4

Curvas *spline* estimadas para las covariables de los modelos aditivos generalizados, en lactantes y adultos mayores, al cuarto día de retardo del efecto sobre una concentración de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀.



son de riesgo, y altos, de protección. En adultos mayores, al igual que en lactantes, el efecto del PM₁₀ incrementa hasta dos horas y decae pasadas 3 a 4 horas de exposición con incremento del IC95% (edf = 5,01). El efecto de la temperatura (edf = 1,13) en adultos mayores no es significativo y el efecto de la humedad presenta un comportamiento de protección significativo, sólo pasado el 60% de saturación de agua de la atmósfera (edf = 2,82).

Según los resultados anteriores modelamos el efecto de la temperatura como siendo lineal, y las horas de exposición y la humedad relativa como siendo no lineal en ambos grupos etáreos. La Tabla 2 muestra las estimaciones paramétricas (β) y no paramétricas (edf) del modelo, según

nivel de concentración de PM₁₀, en lactantes (< 1 año) y adultos mayores (> 65 años). Observamos en lactantes que los efectos de la temperatura y humedad poseen baja variación según la severidad de la exposición. En tanto, y tal como se esperaba, el efecto de las horas de exposición es dependiente de la concentración a PM₁₀.

Así también, observamos para lactantes que el efecto de las horas de exposición tiende a la linealidad (menor edf), a medida que incrementa la severidad de la exposición.

En adultos mayores los modelos son poco explicativos (< 1% aproximadamente). No obstante, niveles de concentración sobre 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ muestran un mejor ajuste del modelo y mayor no-linealidad en el efecto. La temperatura ejerce

Tabla 2

Estimación de los componentes del modelo aditivo, generalizado por grupo etéreo y nivel de concentración a PM₁₀. Por sector geográfico, solamente fue analizado el modelo 6 ([PM₁₀] > 150µg/m³).

Modelo	s(horas día PM ₁₀) edf	Temperatura		s(humedad)		Desviación explicada (%)			
		< 1	> 65	< 1	> 65	< 1	> 65		
n	[PM ₁₀]	β		edf		β			
1.0	> 25µg/m ³	4,475	1,316	-0,064	-0,004	5,962	2,773	10,8	0,50
2.0	> 50µg/m ³	4,008	1,202	-0,064	-0,002	6,131	2,858	12,0	0,48
3.0	> 75µg/m ³	4,207	8,701	-0,061	-0,001 *	5,993	3,025	11,4	1,08
4.0	> 100µg/m ³	4,235	1,032	-0,064	-0,002 *	6,144	2,852	11,5	0,34
5.0	> 125µg/m ³	3,248	2,705	-0,064	-0,003 *	6,088	2,852	11,2	0,68
6.0	> 150µg/m ³	3,996	5,897	-0,066	-0,002 *	6,011	2,783	11,7	1,23
	Centro	2,897	3,021	-0,091	-0,066	1,000	1,019	19,6	8,97
	Norte	2,230	3,679	-0,070	-0,021 *	1,495	1,000	13,7	5,57
	Oeste	1,000	1,018	-0,042	-0,030	1,065	2,582	6,24	2,30
	Suroeste	1,892 *	1,913 *	-0,063	-0,005	1,000	1,171 *	11,4	0,45
	Sur	2,594 *	2,587	-0,044	-0,005	1,784	1,174 *	11,7	3,59
	Sureste	2,054	2,279	-0,072	-0,013	3,645	1,880	19,3	3,97
7.0	> 175µg/m ³	3,637	1,029	-0,065	-0,002 *	6,089	2,843	11,8	0,50
8.0	> 200µg/m ³	2,580	ND	-0,064	ND	5,936	ND	11,8	ND

ND: no determinado.

* Valores no significativos.

un efecto significativo en el número de consultas de urgencias por bronquitis aguda en lactantes ($\beta \approx -0,06$), observamos que la disminución media de un grado Celsius genera un incremento en el número de consultas (respuesta poblacional) del 6% aproximadamente. La Tabla 2 muestra que el efecto no lineal de la humedad del aire es significativamente mayor, en lactantes antes que adultos mayores. La Tabla 3 muestra la variación geográfica del efecto estimado cuando la exposición a PM₁₀ es superior a 150µg/m³ en la atmósfera. Observamos que los modelos mejor ajustados (desviación explicada) fueron los estimados en los sectores Centro y Sureste, y con menor ajuste, los sectores Oeste y Suroeste, en ambos grupos etéreos. Observamos también, que el efecto de las horas diarias de exposición varía según sector geográfico con un comportamiento similar en ambos grupos etéreos. Destacamos la linealidad del efecto en el sector Oeste, y la no-linealidad en los sectores Centro y Norte de la ciudad a concentraciones superiores a 150µg/m³. Notamos que el efecto de la temperatura ya posee mayor diferencia, no obstante, el sector Centro presenta el menor efecto en ambos grupos. El efecto de la humedad es mayormente lineal, excepto en el sector Sureste en lactantes y Oeste para adultos mayores. En lactantes destacamos el efecto lineal que poseen las horas de exposición y humedad

en el sector Oeste. En adición, al re-estimar paramétricamente el efecto de las horas de exposición en el sector Oeste para lactantes, encontramos que el efecto posee un valor de $\beta_{PM_{10}} = 0,032$ con un valor de $p = 0,038$, esto es, un incremento lineal del 3% en las urgencias diarias por bronquitis aguda, por cada hora de exposición a concentraciones superiores a 150µg/m³.

Discusiones y conclusiones

En salud, la duración y concentración de una exposición ambiental es determinante para observar un efecto de corto plazo en la población. En este punto, la entrada de una dimensión temporal (cantidad de horas diarias) a un indicador de exposición ambiental puede mejorar el entendimiento de la respuesta poblacional de corto plazo, ya que se relaciona consistentemente al concepto de dosis poblacional, entendida como el tiempo de exposición a una determinada concentración que genera un efecto observado en la población. En este trabajo, además de explorar el uso de un nuevo indicador de exposición, estudiamos una metodología estadística para analizar situaciones donde la respuesta es observada, después de ocurrida la exposición de riesgo, esto es, el efecto se desfasa a través del tiempo.

Tabla 3

Variación geográfica en la estimación paramétrica (β) y no paramétrica (edf) de las covariables del modelo, según grupo etéreo, expuesta a un nivel de concentración superior a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Modelo	Sector	s(horas exposición)		Temperatura		s(humedad)		Desviación explicada	
		edf	edf	β	β	edf	edf	(%)	(%)
n		< 1	> 65	< 1	> 65	< 1	> 65	< 1	> 65
1	Centro	2,897	3,021	-0,091	-0,066	1,000	1,019	19,6	8,97
2	Norte	2,230	3,679	-0,070	-0,021 *	1,495	1,000	13,7	5,57
3	Oeste	1,000	1,018	-0,042	-0,030	1,065	2,582	6,24	2,30
4	Suroeste	1,892 *	1,913 *	-0,063	-0,005	1,000	1,171 *	11,4	0,45
5	Sur	2,594 *	2,587	-0,044	-0,005	1,784	1,174 *	11,7	3,59
6	Sureste	2,054	2,279	-0,072	-0,013	3,645	1,880	19,3	3,97

* Valores no significativos.

La metodología de análisis mediante GLM-pdl mostró ser adecuada para este tipo de problemas. Aunque los modelos GAM muestran mayor flexibilidad en la estimación del efecto, en la actualidad no hay disponible una metodología para estimar el efecto no lineal de una variable desfasada en el tiempo, sin tener los problemas de cocurvatura, generados por series correlacionadas, como las de contaminación ambiental, siendo la cocurvatura la forma no paramétrica de la colinearidad. Destacamos que los GAM son modelos útiles para analizar el comportamiento del efecto y conseguir estimar un *score* de no-linealidad en el ajuste.

En este punto, las variables de exposición a PM₁₀ y de control entraron al modelo el mismo día de retraso. Esta decisión fue basada en que el efecto retardado de la temperatura y humedad, sobre las bronquitis, parecen ser de mayor *lag*, sin embargo, las características tóxicas de la partícula inhalada por la población, dependerán de la temperatura y humedad del mismo día. Un nivel de alta contaminación en la población se puede ver agravado en el ambiente si existe alta humedad, tal como aconteció en el conocido episodio de Londres, Reino Unido, en la década de los cincuenta.

Nuestros resultados muestran que el efecto de las covariables tanto de exposición y control es diferente según el sector geográfico de la ciudad. En un estudio realizado en 20 ciudades de Estados Unidos se comenta que la variación de la situación socioeconómica dentro de una ciudad puede ser considerablemente mayor que la variación entre ciudades, y con ello el peso de la cuestión social en la mortalidad por partículas pareciera ser más significativa a una menor escala geográfica¹⁴. En Chile, estudios realizados en-

tre Santiago y Temuco, otra ciudad con alta contaminación del aire, muestran que el mayor riesgo observado en Temuco puede deberse al origen de la contaminación por partículas, siendo para Santiago mayoritariamente de fuentes móviles y en Temuco por el uso de leña como combustible dentro de los hogares¹⁵. Estos antecedentes hacen suponer que el efecto en salud observado puede ser aumentado por la contaminación del aire exterior en sectores o grupos específicos de baja renta. Nosotros pensamos que esta condición puede otorgar mayor o menor linealidad al efecto estimado en determinados sectores de la ciudad. Considerando que mayor linealidad en el efecto implica mayor asociación causal, esto es, una mayor severidad de la exposición a partículas en sectores deprimidos socialmente.

Además, el efecto de la temperatura es mayormente lineal y de mayor magnitud en lactantes que adultos mayores, este efecto de riesgo es relacionado a la disminución de la inmunidad natural en las vías respiratorias por exposición a bajas temperaturas. La humedad en cambio mostró linealidad en el efecto, en la mayoría de los sectores, excepto los localizados al Sureste (pre-cordillerano) en lactantes y al Oeste en adultos mayores. Debemos considerar que baja humedad en el ambiente, en general es factor para el agravamiento de los cuadros por enfermedad respiratoria baja, como la bronquitis. Aunque no tenemos una respuesta clara para la no-linealidad del efecto en la humedad en estos dos sectores, creemos en una relación con partículas secundarias, tal como el PM_{2,5}.

Sumado a lo anterior, las causas más frecuentes de la bronquitis aguda tienen relación con las virosis respiratorias de invierno como la gripe y las producidas por el virus respiratorio sincicial.

Aunque el primero genere inmunidad y el segundo no, estos cuadros infecciosos pueden agravarse o bien facilitarse con la exposición a contaminación por partículas. A la fecha no existen estudios que vinculen el efecto de la contaminación del aire con la ocurrencia de virosis respiratorias en invierno, aunque la literatura continuamente muestra asociación significativa de eventos de alta contaminación con las urgencias por bronquitis aguda^{16,17}.

Una investigación realizada por Ostro et al.¹⁸, con análisis de series de tiempo y regresión múltiple muestra una asociación significativa entre PM_{10} y número de consultas por IRA bajas en lactantes, donde un cambio de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} se asocia con un aumento de 4% a 12% de consultas por IRA bajas. Nuestro trabajo muestra que por cada hora de exposición a concentraciones superiores a $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} (nivel referencia ambiental) se genera un aumento del 3% en las consultas por urgencia de bronquitis aguda en lactantes. Estos resultados fueron encontrados en el sector Oeste de la capital que según Astudillo et al.¹ posee la mayor carga de enfermedades respiratorias de la ciudad, producto de la contaminación del aire. En nuestro trabajo, este sector fue el único que mostró linealidad en el efecto de las horas de exposición a PM_{10} , y además el efec-

to protector más bajo de la temperatura, comparada con las otras comunas de la ciudad. Esta situación nos lleva a pensar en la existencia de un factor adicional en el incremento de consultas de urgencias por enfermedades respiratorias en este sector, posiblemente, el efecto del tiempo de exposición a partículas secundarias como las menores a $2,5\mu\text{m } PM_{2,5}$.

Acreditamos que la información contenida en este artículo será de utilidad en la búsqueda de indicadores de calidad del aire que mejor expliquen los efectos de la contaminación en la población. En Santiago, la referencia ambiental para PM_{10} es de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media aritmética cada 24 horas, y es usada como unidad de medida para la categorización del Índice de Calidad del Aire por Partículas (ICAP)¹⁹. Este índice define el nivel de riesgo para la salud de la población, y es directriz de las acciones a realizar a nivel local. Nosotros pensamos que el ICAP puede subestimar el riesgo en poblaciones que permanecen mayor tiempo expuestas, como las del sector Oeste de Santiago. Por tal razón, el ICAP debería incluir además de un valor de referencia ambiental para PM_{10} , el tiempo de exposición poblacional, en virtud de los resultados de este trabajo y para mejorar el entendimiento de los niveles de exposición poblacional en el territorio.

Resumen

Este trabajo analiza el efecto de las horas de exposición a PM_{10} en las urgencias diarias por bronquitis aguda, controlando por temperatura y humedad. El estudio fue realizado en seis sectores de la ciudad de Santiago, Chile, durante el período de invierno de los años 2002 al 2004, para lactantes (< 1 año) y adultos mayores (> 65 años). Analizamos el retraso de la respuesta mediante una función polinomial distributiva (pdl), incluida en un modelo lineal generalizado (GLM-pdl), y la estructura del efecto de la exposición, mediante modelos aditivos generalizados (GAM), utilizando regresión spline como técnica de estimación. Los resultados mostraron que al cuarto día de retardo, el efecto de la exposición fue mayor, especialmente en lactantes, y varió en la medida que incrementó la concentración atmosférica de PM_{10} . El efecto de las horas de exposición a PM_{10} mostró una variación significativa, según el sector geográfico. Al estimar linealmente este efecto en el sector Oeste, notamos que el incremento de consultas diarias en lactantes fue de 3% por cada hora de exposición sobre os $150\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Bronquitis; Contaminación del Aire; Tiempo de Exposición

Colaboradores

F. Muñoz realizó el análisis de los datos y la redacción del artículo. M. S. Carvalho realizó el análisis de los datos y la revisión del artículo.

Agradecimientos

F. Muñoz agradece a la Organización Panamericana de la Salud (OPAS) la subvención otorgada para la tesis de doctorado, y a la Fundación Oswaldo Cruz, en especial a la Escuela Nacional de Salud Pública Sergio Arouca y al Departamento de Epidemiología y Métodos Cuantitativos en Salud.

Referencias

1. Astudillo P, Prieto C, Mancilla P. Exceso de morbilidad respiratoria en niños y adultos mayores en una comuna de Santiago con alta contaminación atmosférica por partículas. *Rev Méd Chile* 2007; 135:221-8.
2. Koutrakis P, Sax SN, Sarnat JA, Coull B, Demokritou P, Oyola P, et al. Analysis of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{10-2.5} concentrations in Santiago de Chile from 1989 to 2001. *J Air Waste Manag Assoc* 2005; 55:342-51.
3. Comisión Nacional de Medio Ambiente. Distribución de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana de Santiago. Informe 2003. Santiago: Comisión Nacional de Medio Ambiente; 2003.
4. Gramsch E, Cereceda-Balic F, Oyola P, Von Baer D. Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and Ozone data. *Atmos Environ* 2006; 40:5464-75.
5. Bates DV. Health indices of the adverse effects of air pollution: the question of coherence. *Environ Res* 1992; 59:336-49.
6. U.S. Environmental Protection Agency. PM standards revision – 2006. <http://www.epa.gov/pm/naaqsr2006.html> (accedido el 01/Dic/2008).
7. World Health Organization. World Health Organization air quality guidelines for Europe. Geneva: WHO Regional Publications; 2007. (European Series, 91).
8. Schwartz J. The distributed lag between air pollution and daily deaths. *Epidemiology* 2000; 11: 320-6.
9. Hastie TJ. Generalized additive models. London: Wadsworth & Brooks/Cole; 1991.
10. Wood SN, Augustin NH. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecol Modell* 2002; 157:157-77.
11. Aranda C, Astudillo P, Mancilla P, Caussade S, Girardi G, Gamboa R. Monitoreo epidemiológico de los efectos de la contaminación atmosférica en las enfermedades respiratorias infantiles. Santiago de Chile: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia; 1992.
12. Rezende FAVS, Almeida RMV, Nobre FE. Diagramas de Voronoi para a definição de áreas de abrangência de hospitais públicos no Município do Rio de Janeiro. *Cad Saúde Pública* 2000; 16:467-75.
13. Wood SN. Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *J Am Stat Assoc* 2004; 99:673-86.
14. Samet JM, Dominici F, Currier FC, Coursac I, Zeger SL. Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. *N Engl J Med* 2000; 343:1742-9.
15. Sanhueza H, Vargas C, Mellado P. Impacto de la contaminación del aire por PM₁₀ sobre la mortalidad diaria en Temuco. *Rev Méd Chile* 2006; 134:754-61.
16. Avendano L, Cespedes A, Stecher X. Influencia de virus respiratorios, frío y contaminación aérea en la infección respiratoria aguda baja del lactante. *Rev Méd Chile* 1999; 127:1073-8.
17. Ilabaca M, Olaeta I, Campos E, Villaire J, Tellez-Rojo MM, Romieu I. Association between levels of fine particulate and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago, Chile. *J Air Waste Manag Assoc* 1999; 49(9 Spec No):154-63.
18. Ostro BD, Eskeland GS, Sanchez JM, Feyzioglu T. Air pollution and health effects: a study of medical visits among children in Santiago, Chile. *Environ Health Perspect* 1999; 107:69-73.
19. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Gobierno de Chile. Decreto Supremo 59. *Diario Oficial* 1998; 25 may.

Recibido el 13/Sep/2007

Versión final presentada el 09/Jun/2008

Aprobado el 02/Sep/2008