

Contaminación por material particulado ($PM_{2,5}$ y PM_{10}) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009)

Particulate air pollution ($PM_{2,5}$ and PM_{10}) and medical consultations due to respiratory disease in Medellín (2008-2009)

Carlos F. Gaviria G¹; Paula C. Benavides C²; Carolina A. Tangarife³.

¹ Profesor e investigador del departamento de economía, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: cfgaviria@udea.edu.co.

² Abogada, Secretaría de tránsito y Transporte, Medellín, Colombia. Correo electrónico: carolina.benavides@medellin.gov.co.

³ Economista, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Correo electrónico: caroarroyave@gmail.com.

Recibido: 18 de mayo de 2011. Aprobado: 10 de julio de 2011.

Gaviria CF, Benavides PC, Tangarife CA. Contaminación por material particulado ($PM_{2,5}$ y PM_{10}) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). Rev. Fac. Nac. Salud Pública 2011; 29(3): 241-250

Resumen

La evidencia científica muestra cómo la contaminación del aire genera efectos negativos en la salud humana. En Medellín, Colombia, se registra un alto nivel de contaminación del aire por material particulado (medido por Redaire) y un considerable volumen de consultas externas y por urgencias a causa de enfermedades respiratorias, medidas por Metrosalud. **Objetivo:** presentar evidencia estadística de la relación positiva entre contaminación por material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} y las consultas externas y por urgencia debidas a enfermedades respiratorias (asma, bronquitis, infecciones, rinitis). **Metodología:** se emplearon

modelos de series de tiempo sobrerregistros diarios de medición para PM_{10} y $PM_{2,5}$; se estimaron diez modelos por mínimos cuadrados ordinarios con corrección de White para ajustar problemas de heterocedasticidad; cinco modelos con consultas por enfermedades respiratorias y PM_{10} ; y cinco modelos con consultas por enfermedades respiratorias y $PM_{2,5}$. **Resultados:** se concluye que la contaminación del aire por material particulado provoca problemas respiratorios y, en consecuencia, es un problema de salud pública en Medellín. ----- **Palabras clave:** contaminación del aire (Q53), consultas hospitalarias por enfermedades respiratorias (I10)

Abstract

Scientific evidence shows how air pollution has negative effects on human health. Medellin city (Colombia) has high levels of air pollution (according to Redaire's measurements) as well as a high rate of medical and emergency consultations due to respiratory disease (according to Metrosalud's measurements). **Objective:** to show statistical evidence of the positive relationship between pollution due to $PM_{2,5}$ and PM_{10} particulate matter and the medical and emergency consultations due to respiratory diseases (asthma, bronchitis, infections, and rhinitis). **Methodology:** a number of time series models were applied on daily records of PM_{10} and $PM_{2,5}$ particles. A total of

ten models were calculated using ordinary least squares (OLS) with White's correction in order to adjust heteroskedasticity problems. Initially, five models were used for the consultations caused by respiratory disease and PM_{10} particles. Then, five additional models were used for the consultations caused by respiratory diseases and $PM_{2,5}$ particles. **Results:** particulate air pollution leads to respiratory disease, thus becoming a public health problem in Medellín, Colombia. ----- **Key words:** air pollution (Q53), hospital consultations due to respiratory disease (I10)

Introducción

La contaminación del aire es un problema que afrontan muchas ciudades del mundo. Se caracteriza como la conglomeración de distintas sustancias presentes en la atmósfera [1] emitidos en mayor medida por industrias y vehículos automotores. La preocupación sobre los efectos que la contaminación del aire tiene sobre la salud no es un tema nuevo; por el contrario, se ha debatido durante varias décadas. En la segunda mitad del siglo XX, diversos estudios encontraron que altos niveles de contaminación del aire, como consecuencia de grandes emisiones de gases relacionados con el consumo de combustibles fósiles, causan problemas de salud pública asociados a enfermedades respiratorias [2].

En Colombia, este problema es resultado de procesos urbanísticos y de la combustión de combustibles fósiles de mala calidad. Con el empleo de modelos de series de tiempo, el presente artículo busca relacionar la contaminación por material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y las consultas externas y por urgencias generadas por enfermedades respiratorias en Medellín en el 2008 y el 2009. En la primera parte del artículo se caracteriza la contaminación en Medellín por material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$). La segunda parte presenta la evidencia empírica sobre la incidencia de la contaminación del aire en la salud humana y las consultas por enfermedades respiratorias. En la última parte se presentan los modelos empleados y los resultados obtenidos. Finalmente, se exponen las conclusiones y la discusión.

Contaminación del aire

En la década de los sesenta del pasado siglo se realizaron reportes sobre la contaminación del aire y su relación con las tasas de mortalidad y morbilidad [3-5]. Otras investigaciones analizaron la relación de la morbilidad con la contaminación del aire usando modelos dosis-respuesta o modelos econométricos [6-8]. Estos trabajos emplearon series de tiempo para un área específica o datos de panel para múltiples ciudades [9, 10]. También se ha analizado la relación entre contaminación y admisiones hospitalarias y, en general, se relaciona la contaminación del aire con un mayor número de episodios de asma [11-14]. Varios estudios establecieron una correspondencia entre enfermedades respiratorias y material particulado y/o contaminación por dióxido de azufre [10,15].

En Medellín, la contaminación es un problema reciente vinculado al desarrollo urbanístico, en especial al crecimiento del parque automotor y al consumo de combustibles fósiles de baja calidad, como el diesel. Los

contaminantes críticos en Medellín son el material particulado y el ozono porque exceden la norma nacional y por su incidencia en el índice de calidad del aire [16]. En el presente estudio se analizó el material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$).

El material particulado es un contaminante primario generado por la combustión ineficiente de combustibles fósiles; para el caso del menor de 10 micrómetros (PM_{10}), el mayor precursor es la combustión de diesel. En espacios interiores tiene efectos para la salud al depositarse irreversiblemente en el tracto respiratorio [17]. Los niveles de contaminación determinados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como de riesgo para la salud humana son $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media diaria) [18]. El $PM_{2,5}$ (partículas menores a 2,5 micrones) consiste en varios compuestos comúnmente asociados con partículas ácidas, por la combustión de combustibles fósiles, producción manufacturera y quema agrícola [9]. La OMS determinó sus concentraciones como de riesgo para la salud humana, así: $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media anual) y $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ (media diaria). La concentración de la contaminación puede afectarse por cambios en el clima (humedad, precipitaciones, vientos, etc.); además, es difícil controlar simultáneamente los múltiples contaminantes y separar e identificar los efectos de cada uno de ellos, debido a que muchos contaminantes se generan a través de la misma fuente y, por lo tanto, están correlacionados [19].

Actualmente, en la ciudad se mide de forma continua la contaminación, incluyendo material particulado. La naturaleza y magnitud de dicho material se monitorea como sólidos suspendidos totales (total de partículas). El PM_{10} y el $PM_{2,5}$ se miden recientemente en Medellín mediante seis estaciones manuales y tres medidores automáticos. En el caso del $PM_{2,5}$, se han ubicado tres estaciones de medición.

Material particulado menor de 10 micrones (PM_{10})

Muñoz y otros encontraron entre el 2000 y el 2005 concentraciones de PM_{10} en promedio de $63\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor está dentro de la norma establecida por la Resolución 601 del 2006 (límite mensual de $70\mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, está por encima de la norma internacional de la OMS que lo establece como de riesgo para la salud humana ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$) [20]. De otra parte, Uribe reportó que en el 2002 y el 2003 las concentraciones de sólidos suspendidos totales excedían la norma de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para PM_{10} , el promedio de las concentraciones se encontraba cerca del tope establecido por la norma [21].

En el 2008, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) reportó que las concentraciones anuales de PM_{10} en Medellín no excedieron la norma nacional (70

$\mu\text{g}/\text{m}^3$), excepto la estación manual de la Universidad Nacional ($83 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, todas las estaciones de Medellín excedieron tres o cuatro veces la norma de la OMS. En cuanto a las concentraciones diarias, los valores máximos se presentaron en la Universidad Nacional ($158 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en San Antonio ($130 \mu\text{g}/\text{m}^3$): ambos están por encima de la norma de la OMS [22]. En el 2009, los promedios anuales de PM_{10} mostraron una disminución de entre 5 y 15% en todas las estaciones. Esto se debe a: 1) la mejora en la calidad del diesel distribuido en Medellín; y 2) el cambio de la norma anual nacional para el PM_{10} , que pasó a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bajo esta normativa, cinco estaciones en Medellín excedieron el promedio anual y, sin excepción, todas excedieron la norma de la OMS [22]. Así, las estaciones más contaminadas anualmente están ubicadas en el centro de la ciudad (Edificio Miguel de Aguinaga y el parque de San Antonio), debido a la influencia de fuentes móviles [22].

Material particulado menor de 2,5 micrones ($PM_{2,5}$)

El informe del AMV del 2008 establece que los promedios anuales en las estaciones de Medellín superaron la norma anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, definida por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la norma anual de la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [22].

En conclusión, las emisiones de material particulado PM_{10} en Medellín, aunque están dentro de los promedios establecidos por la norma nacional, no cumplen con el promedio establecido por la OMS para emisiones sin riesgo para la salud humana. Para el $PM_{2,5}$, las concentraciones son preocupantes por su gran influencia en la salud, en especial, en el centro de Medellín, zona crítica con alta movilidad vehicular y de personas. La alcaldía de Medellín estima que aproximadamente un millón de personas transitan por el centro de Medellín de forma intermitente, además de los más de 9.000 venteros ambulantes registrados por la oficina de espacio público — que permanecen entre seis y diez horas expuestos a material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$)—. No obstante, Muñoz y otros reconocen que a pesar de la información sobre material particulado existente en Medellín desde 1971, no se tiene información cuantificada de la magnitud de los efectos sobre la salud humana [20].

Problemas en la salud asociada a material particulado

La OMS ha establecido la relación entre material particulado y la salud pública [18]. Los efectos en la salud son amplios, relacionados en algunos casos con síntomas en las vías respiratorias superiores, como reacciones alérgicas, congestión nasal, sinusitis, tos, fiebre del heno, irritación en los ojos, entre otros. En otros casos,

se relacionan con síntomas en las vías respiratorias inferiores, que requieren un tratamiento especial, como bronquitis, asma, enfisema, entre otros [9,10, 23]. También se presentan problemas severos, como cáncer de pulmón y anomalías reproductivas [24].

Una amplia evidencia muestra cómo el riesgo de problemas respiratorios o cardiovasculares aumenta con la exposición, y algunos estudios revelan un valor mínimo por debajo del cual no existan efectos adversos en la salud [2, 11, 18, 25-31]. Se ha estimado que en los Estados Unidos y en Europa occidental hay exposiciones de entre 3 y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2,5}$) que provocan problemas en la salud [18]. En general, se debate el nivel de exposición, así como la fuente contaminante: mientras que algunos académicos sugieren que altos niveles de material particulado o gases inciden en la salud [23, 33], otros afirman que los efectos en la salud se presentan aun con bajas concentraciones [34, 14]. En general, la medición del grado de concentración y de los efectos en la salud es un asunto complejo [8].

En algunos estudios, se estima que la incidencia está correlacionada con las estaciones climáticas y con variables como temperatura, precipitación, humedad o punto de rocío [13, 32]. Otros observan que el efecto y la magnitud de la enfermedad varían con los individuos, las condiciones socioeconómicas y el grado de exposición [1]. Algunos investigadores establecen que el estatus socioeconómico desempeña un papel importante en la salud [19, 31,35-37]. Neidelly el informe “Medellín como vamos” afirman que la contaminación en la zona afecta de manera especial a los niños, haciéndolos más propensos a enfermedades como el asma [19, 38]. O’Neill y otros afirman que las personas de menores recursos socioeconómicos son más vulnerables a la contaminación del aire por su relativa desventaja y estrés psicosocial, además del reducido acceso a los tratamientos médicos [24]. La magnitud de los efectos puede ser fácilmente cubierta por otros eventos que no estén relacionados con la contaminación del aire, incluso cuando se controla el efecto de la contaminación por fuentes móviles [39].

Consultas por enfermedades respiratorias en Medellín: la evidencia

Los datos sobre consultas por problemas respiratorios en Medellín entre el 2007 y el 2009 muestran una mayor cantidad de consultas por bronquitis e infecciones respiratorias en el 2008, especialmente entre los meses de abril y julio. Asimismo, las consultas por bronquitis fueron mayores en el 2007 que en el 2009, mientras que por infecciones, las consultas fueron mayores en el 2009 que en 2007.

Aunque los promedios mensuales de bronquitis son mayores en el 2008, el mayor promedio se presenta en mayo del 2007. Análogamente, se produce una reducción de los promedios en el 2009. En cuanto a infecciones, los mayores promedios están en el 2008 y el mayor valor promedio mensual, en junio del mismo año. En el 2009, los promedios son menores respecto del 2008 y mayores a los reportados en el 2007. La tendencia de las consultas por problemas respiratorios muestra que el mayor número de casos se presentó en el 2008 (78.958), mientras que en el 2007 y el 2009 se reportaron cifras similares (70.271 y 70.044, respectivamente).

La contaminación del aire y los efectos en la salud: evidencia empírica

Dado el nivel de contaminación en la ciudad y la evidencia empírica que relaciona contaminación del aire con problemas respiratorios, se puede esperar una relación positiva entre las consultas por problemas respiratorios y el nivel de contaminación en Medellín (especialmente por PM_{10} y $PM_{2.5}$). Esta relación se observa cuando el comportamiento de los promedios diarios PM_{10} y $PM_{2.5}$ y las consultas es similar para ambas variables en una relación directamente proporcional.

Gómez y otros analizaron la contaminación por PM_{10} en la zona de Guayabal, que revela altos índices de contaminación y los posibles problemas en la salud, pero no elaboran una correlación entre ambas variables [40]. Lenis y Ospina buscaron una relación cualitativa entre material particulado y enfermedades respiratorias [41]. Muñoz y otros, empleando espirometría y mediciones antropométricas en adultos en diferentes niveles de exposición para varios municipios del Valle de Aburrá, hallaron que no hay diferencia, en términos de salud, entre los individuos expuestos y los no expuestos [20]. El informe “Medellín como vamos” presentó un estudio acerca del riesgo que tienen estudiantes de preescolar desufrir problemas respiratorios después de una exposición prolongada a ciertos contaminantes [38]. Martínez comparó el aire de Medellín con el de una población del oriente cercano, y observó la relación con problemas respiratorios. A pesar de lo que indican estos estudios, no se corrobora con modelos econométricos que la contaminación por material particulado tenga incidencia en la salud humana. El siguiente apartado emplea modelos econométricos para validar la incidencia que la contaminación por material particulado tiene sobre la salud humana (medido por consultas externas y por urgencias a causa de enfermedades respiratorias) [42].

Metodología

Para medir la relación entre consultas por problemas respiratorios y contaminación por material particulado, se emplean registros diarios para PM_{10} y $PM_{2.5}$ de marzo del 2008 a diciembre del 2009, datos suministrados por Redaire. Los promedios de PM_{10} se tomaron de las estaciones de medición automática para Medellín ubicadas en el parque de San Antonio, el Politécnico Jaime Isaza Cadavid y la Universidad Nacional (Facultad de Minas). Para el $PM_{2.5}$, el promedio se obtuvo de las estaciones automáticas del edificio Miguel de Aguinaga y de El Poblado. Los datos sobre las consultas externas y por urgencias diarias por problemas respiratorios en Medellín fueron suministrados por Metrosalud. Las enfermedades tomadas son las que corresponden a los grupos de asma, bronquitis, infecciones, rinitis y total de enfermedades.

Para este análisis se emplearon modelos de series de tiempo. Se estimaron diez modelos por mínimos cuadrados ordinarios con corrección de White para ajustar problemas de heterocedasticidad (causada posiblemente por la amplitud de las variables respecto a su media o por la omisión de variables), con lo cual los coeficientes se pueden emplear para hacer inferencia estadística: cinco modelos con consultas por enfermedades respiratorias y PM_{10} y cinco modelos con consultas por enfermedades respiratorias y $PM_{2.5}$. Para la estimación de los modelos se empleó el paquete estadístico E-views 7.

Los modelos buscan validar la relación positiva entre contaminación por material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y cada uno de los grupos de enfermedades. Con el fin de suavizar la amplitud de la varianza para las series de tiempo y para facilitar el análisis, las variables se transformaron en logaritmos (con lo cual el modelo estimado es log-log). La representación del modelo es la siguiente:

$$\ln y_t = c + \beta_1 \ln x_t + \beta_2 \ln \text{Prep}_t(-7) - \beta_3 \text{dsab}_t - \beta_4 \text{ddom}_t + AR(6) + \mu_t$$

donde se refiere al logaritmo de las consultas por enfermedades (por grupo asma, bronquitis, infecciones, rinitis y total enfermedades); $\ln x_t$ es el logaritmo de la contaminación (expresada en el modelo como LNPM_{10} o $\text{LNPM}_{2.5}$). De las variables climáticas posibles para emplear (*humedad* y *precipitación*), se eligió, empleando test de correlación de Spearman, la *precipitación*, que evidenció un mejor ajuste con la variable consultas; además, las variables *humedad* y *precipitación* presentaban una alta correlación entre ellas. Así, $\text{LN PREP}_t(-7)$ es el lo-

garitmo de la precipitación que recoge efectos relacionados con el clima, como sugieren diferentes trabajos (esta se representa en los resultados como LNPREP(-7)). Asimismo, DSAB* y DDOM† son variables *dummy*‡ para sábado y domingo que recogen efectos de fin de semana (menor promedio de consultas hospitalarias). Se incluyó un modelo autorregresivo de orden seis (AR(6)), debido a la dependencia de *lny*, de sus valores anteriores; esto implica una relación marcada de la variable dependiente con sus valores, hasta seis días atrás. La inclusión de variables *dummy* y del vector AR mejora el modelo, aumentando la robustez de los residuales§ y eliminando problemas de correlación serial. Para la selección de las variables se emplearon pruebas de correlación de Spearman, lo que determinó la independencia de las variables del modelo. Adicionalmente, se estableció el empleo del mecanismo de introducción progresiva (*forward step wise regression*), teniendo como criterio el estadístico *t*. Como resultado, el modelo deben incluir como variable regresoras solo una variable de contaminación (PM₁₀ o PM_{2,5}) y solo una variable climática (precipitación).

Se espera que la contaminación por PM₁₀ y PM_{2,5} sea significativa y positiva. Dada la naturaleza de la contaminación (fuentes móviles) y los datos de consultas de las Unidades Prestadoras de Servicios de Salud (UPSS), se estima que las personas afectadas pertenecen al régimen subsidiado (estratos 1, 2 y 3) y que, por ende, son personas con mayor vulnerabilidad frente a problemas respiratorios relacionados con la contaminación [24].

Similarmente, se supone que el hecho de estar en el sistema subsidiado implica que posiblemente las fuentes de ingresos provengan de actividades económicas informales (vendedores ambulantes, actividades propias o de rebusque).

Resultados

En general, los modelos estimados establecen una relación positiva entre consultas hospitalarias para cada uno de los grupos (asma, bronquitis, infecciones, rinitis y total de enfermedades) y la contaminación por material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}). Desagregando los modelos para material particulado PM₁₀, las variables material particulado y precipitación explican positivamente las consultas por grupo de enfermedad. Según el R^{2**} ajustado, las variables regresoras explican las consultas por grupos en más de 60% de los casos. Los coeficientes hallados (tabla 1) se asumen como las elasticidades, es decir, que un aumento de 10% en la emisión de PM₁₀ genera un aumento de 6,2% en el total de admisiones hospitalarias. Por grupos, el mayor coeficiente se presenta para el grupo rinitis (1,45) y el menor, para el grupo asma (0,38). El efecto de la variable climática (precipitación) es positivo y significativo para el séptimo rezago; así, un aumento de 10% en la precipitación aumenta las consultas totales en la siguiente semana en 0,2%. El mayor efecto sucede sobre las consultas por rinitis (0,07) y el menor, sobre infecciones (0,022).

Tabla 1. Coeficientes de relación entre consultas por grupo de enfermedades y contaminación por material particulado (PM₁₀)

| Variables independientes | PM ₁₀ | | | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Ama | Bronquitis | Infecciones | Rinitis | Total enfermedades |
| LNPM10 | 0,3822 (0,000) | 0,6667 (0,000) | 0,5376 (0,000) | 1,4506 (0,000) | 0,6170 (0,000) |
| LNPREP(-7) | 0,0233 (0,002) | 0,0279 (0,007) | 0,0222 (0,009) | 0,0669 (0,024) | 0,0241 (0,002) |
| DSAB | -0,2782 (0,000) | -0,2783 (0,000) | -0,4872 (0,000) | -0,4529 (0,000) | -0,8752 (0,000) |

* Variable de efecto fijo del sábado

† Variable de efecto fijo del domingo

‡ Son variables cualitativas, también conocidas como indicativas, binarias, categóricas y dicotómicas. Sólo pueden asumir los valores 0 y 1, indicando respectivamente ausencia o presencia de una cualidad o atributo.

§ La estimación del modelo sin variables *dummy* y sin el vector autorregresivo mostraba tendencia sinusoidal para los días del fin de semana; su inclusión eliminó dicho efecto y suavizó los residuales.

** Indica la proporción de variación en la variable dependiente o criterio explicada por las variables predictoras o independientes.

Continuación tabla 1

| Variables independientes | PM ₁₀ | | | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Ama | Bronquitis | Infecciones | Rinitis | Total enfermedades |
| DDOM | -0,5407 (0,000) | -0,8204 (0,000) | -0,9402 (0,000) | -2,5373 (0,000) | -0,4053 (0,000) |
| C | 2,4134 (0,000) | 0,9429 (0,043) | 2,4357 (0,000) | -2,6426 (0,034) | 2,9085 (0,000) |
| AR(1) | 0,3570 (0,000) | 0,2412 (0,000) | 0,1761 (0,000) | 0,2282 (0,001) | 0,2853 (0,000) |
| AR(2) | — | 0,1027 (0,010) | — | — | — |
| AR(3) | — | — | — | — | 0,0769 (0,024) |
| AR(4) | 0,1584 (0,000) | — | 0,0892 (0,009) | — | 0,0853 (0,009) |
| AR(6) | 0,1807 (0,000) | 0,1552 (0,000) | 0,1059 (0,017) | 0,1412 (0,010) | 0,1257 (0,003) |
| R ² | 0,6354 | 0,6046 | 0,7143 | 0,7608 | 0,7565 |
| R ² ajustado | 0,6313 | 0,6002 | 0,7111 | 0,7562 | 0,7533 |
| Durbin-Watson | 2,0823 | 2,0645 | 2,0067 | 2,1542 | 2,0132 |

LNPM10: logaritmo PM₁₀

LNPREP(-7): logaritmo de precipitaciones rezagado

DSAB: variable de efecto fijo del sábado

DDOM: variable de efecto fijo del domingo

C: constante

AR(N): evidencia la relación de la variable dependiente, con sus valores pasados hasta el sexto día. En alguno de los modelos estimados, los AR(N) no fueron significativos y se omitieron

Fuente: Elaboración del autor

Las variables DSAB y DDOM presentan un efecto negativo y significativo, lo que implica que las consultas por enfermedades disminuyen y la emisión se reduce, pero no en similar proporción. Esta tendencia es uniforme en todos los modelos estimados. El proceso autorregresivo de orden seis (AR(6)) se acentúa para algunos días en particular, dependiendo del modelo estimado; esto implica que en algunos modelos las consultas dependen de las consultas de días anteriores hasta el sexto día. Además, para todos los modelos, el valor del coeficiente AR(5) fue no significativo. El primer dato de la serie de tiempo corresponde al día viernes (28-03-2008), lo cual implica que el viernes y el inicio del fin de semana tienen un efecto relevante en el modelo estimado.

Análogamente, en los modelos con material particulado PM_{2,5} (tabla 2), la contaminación por PM_{2,5} y la precipitación explican positivamente las consultas totales

hasta en 71% de los casos. El comportamiento resulta equivalente para los modelos por grupos de enfermedad, donde el menor valor se da para las consultas por bronquitis (0,57) y el mayor, para las consultas por rinitis (0,73). Los coeficientes muestran la sensibilidad (elasticidad) entre PM_{2,5} y las consultas, de forma tal que un aumento de 10% en la contaminación por PM_{2,5} aumenta las consultas totales por enfermedades respiratorias en 3,4%. Una tendencia similar sucede por grupo de enfermedades, donde el mayor coeficiente se presenta en las consultas por rinitis (0,98) y el menor, en las consultas por asma (0,22). Igualmente, las variables DSAB y DDOM evidencian un efecto negativo significativo para el fin de semana (igual que para modelos con PM₁₀). El total de consultas totales depende de sus valores anteriores hasta seis días atrás (AR(6)); en algunos modelos los coeficientes de los valores pasados (AR) fueron no significativos.

Tabla 2. Coeficientes de relación entre consultas por grupo de enfermedades y contaminación por material particulado ($PM_{2,5}$)

| Variables independientes | $PM_{2,5}$ | | | | |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Asma | Bronquitis | Infecciones | Rinitis | Total enfermedades |
| LNPM2_5 | 0,2168 (0,000) | 0,4560 (0,000) | 0,2960 (0,000) | 0,9798 (0,000) | 0,3416 (0,000) |
| LNPREP(-7) | 0,0237 (0,002) | 0,0294 (0,006) | 0,0251 (0,007) | 0,0589 (0,003) | 0,0252 (0,012) |
| DSAB | -0,2862 (0,000) | -0,3248 (0,000) | -0,5045 (0,000) | -0,5034 (0,000) | -0,3995 (0,000) |
| DDOM | -0,6101 (0,000) | -0,9900 (0,000) | -1,0492 (0,000) | -2,8685 (0,000) | -0,9716 (0,000) |
| c | 3,2338 (0,000) | 2,1270 (0,000) | 3,6211 (0,000) | — | 4,2565 (0,000) |
| AR(1) | 0,3698 (0,000) | 0,2404 (0,000) | 0,1689 (0,000) | 0,1746 (0,010) | 0,2981 (0,000) |
| AR(2) | — | 0,0970 (0,0177) | — | 0,1067 (0,002) | — |
| AR(3) | 0,1385 (0,000) | 0,1011 (0,009) | — | — | — |
| AR(4) | 0,2008 (0,000) | — | 0,0754 (0,017) | — | 0,0659 (0,050) |
| AR(5) | — | 0,1660 (0,000) | — | — | — |
| AR(6) | — | — | 0,1185 (0,007) | — | 0,1670 (0,000) |
| R² | 0,6048 | 0,5803 | 0,6802 | 0,7330 | 0,7140 |
| R² ajustado | 0,6004 | 0,5749 | 0,6766 | 0,7303 | 0,7108 |
| Durbin-Watson | 2,0951 | 2,0500 | 2,0094 | 2,1107 | 2,0407 |

LNPM2_5: logaritmo de $PM_{2,5}$

LNPREP(-7): logaritmo de precipitaciones rezagado

DSAB: variable efecto fijo sábado

DDOM: variable efecto fijo domingo

AR(N): evidencia la relación de la variable dependiente, con sus valores pasados hasta el sexto día. En alguno de los modelos estimados, los AR(N) no fueron significativos y se omitieron

Fuente: Elaboración del autor

Al comparar por grupos la contaminación por PM_{10} , esta tiene un efecto superior sobre cada uno de los grupos de enfermedades que la contaminación por $PM_{2,5}$. En particular, para los modelos con consultas por asma, bronquitis e infecciones, el efecto de LNPREP(-7), DSAB y DDOM es mayor con $PM_{2,5}$. En términos comparativos, las variables regre-

soras de los modelos con PM_{10} explican mejor la variable dependiente que con $PM_{2,5}$, aunque en la literatura, la OMS y otros investigadores reconocen que los efectos del material particulado menor de 2,5 tienen mayor incidencia en problemas respiratorios a causa del tipo de partícula, que resulta difícil de filtrar por medio de los bellos nasales.

Conclusiones

La evidencia empírica sobre la relación entre diferentes tipos de material particulado es abundante, sin embargo, este tipo de relaciones (econométricas) no se han elaborado para la ciudad de Medellín. Los modelos estimados por grupo de enfermedades y total de enfermedades confirman que existe una correlación positiva entre contaminación por material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y consultas por enfermedades respiratorias. Los coeficientes en cada uno de los modelos estimados evidencian un efecto superior de PM_{10} que por contaminación por $PM_{2,5}$. En el caso de las variables climáticas, las cuales buscan incluir otros factores adicionales que pueden incidir en problemas respiratorios, la evidencia establece que sí tienen incidencia positiva, aunque menor que la del efecto que tiene la contaminación por material particulado. En especial, esta variable $LNPREP(-7)$ establece que un efecto de la precipitación se ve una semana después en las consultas por grupo de enfermedad.

La relevancia de las variables *dummy* de fin de semana en todos los modelos estimados muestra que especialmente los sábados y domingos exponen una tendencia inversa: un nivel promedio de contaminación con menores consultas. En general, en promedio, en el fin de semana hay una disminución de las emisiones de PM_{10} y $PM_{2,5}$, al igual de lo que sucede con el número de personas que consultan por problemas respiratorios. Dada la naturaleza de los datos (diarios), el tipo de contaminación empleada (material particulado por fuentes móviles) y los datos de salud obtenidos de entidades públicas que atienden en su mayoría a personas del nivel subsidiado, tiene sentido que una mayor exposición a la contaminación durante la semana implique mayores casos de enfermedades respiratorias, mientras que los fines de semana, cuando el promedio de contaminación se reduce, el número de consultas por enfermedades respiratorias también desciende.

Este primer acercamiento sirve como herramienta para elaborar otros estudios que midan los costos asociados al tratamiento de problemas respiratorios: en la medida en que la contaminación del aire provoque un efecto negativo en la salud humana, asimismo genera un problema de salud pública. Un tratamiento que puede sugerirse es el de valorar los efectos que esto produce en la formación de capital humano o la pérdida que genera a través de los días laborales perdidos. Adicionalmente, como lo sugieren diferentes investigadores, pueden abordarse no solo problemas respiratorios, sino cardiovasculares o, incluso, puede analizarse el efecto de la contaminación sobre las tasas de morbilidad y de mortalidad (por muertes no violentas) para determinar con

mayores elementos la relación existente entre contaminación y salud humana.

Discusión

Este tipo de análisis es pionero en la ciudad y refleja lo que otros estudios han encontrado con respecto a la relación entre la contaminación y sus efectos sobre la salud, con cuyos resultados coinciden [10, 27, 31, 37, 40-43]. Así, para cada uno de los modelos estimados en el presente estudio por grupos de enfermedades, las tendencias son similares, no solo en la significancia de las variables, sino en los signos que presentan. Este resultado refuerza la evidencia presentada para Medellín sobre la forma en que la contaminación del aire genera problemas respiratorios [20, 38, 40, 42].

Aunque los efectos de la contaminación del aire sobre la salud difieren en intensidad en los individuos, es evidente que dichos efectos existen. Mientras en algunos individuos pueden manifestarse algunos síntomas menores (como ojos llorosos, nariz acuosa o alergias), en otros individuos puede causar síntomas agudos (infecciones pulmonares, bronquitis u otras enfermedades). El grupo de enfermedades seleccionadas incluyó solo un grupo de enfermedades respiratorias; sin embargo, podrían incluirse otras enfermedades o síntomas de las vías respiratorias superiores y estimar las relaciones existentes entre la contaminación y dichos efectos. Lo que sí establecen diferentes estudios, que a su vez se plantea como futura investigación, es que los grupos con menor estatus socioeconómico son generalmente grupos vulnerables cuando se exponen a un grado de contaminación de manera continua. Por ejemplo, como ya se ha discutido en el presente estudio, dada la naturaleza de los datos de consultas por enfermedades respiratorias, se espera que estos individuos pertenezcan a estratos socioeconómicos bajos (1, 2 o 3) y que, por ende, estén dentro del grupo que se clasifica como vulnerable. Sin embargo, es necesario realizar estudios futuros para estimar dicha relación.

Similarmente, los resultados encontrados muestran que la incidencia de PM_{10} es superior a $PM_{2,5}$, aunque en estudios elaborados por la OMS se establece que este último tiende a tener un efecto superior en la salud humana. Esto implica que posiblemente deban medirse los efectos de largo plazo y no los de corto plazo. Cada organismo es diferente y la exposición a la contaminación no necesariamente se manifiesta de manera inmediata, sino en un periodo de tiempo (una o dos semanas después o cuando haya transcurrido un cierto grado de exposición diaria de manera continua).

Sin embargo, este primer acercamiento estadístico para Medellín muestra cómo el número de consultas

por enfermedades respiratorias están relacionadas con el grado de contaminación del aire en la ciudad. En este sentido, este estudio puede ayudar a establecer futuras investigaciones en problemas relacionados con salud pública. No es una novedad que existe un problema de contaminación del aire en la ciudad, causado en parte por la combustión excesiva de combustibles fósiles de mala calidad. Aunque los niveles de contaminación del aire han mejorado en los últimos años (con evidencia en la disminución en los promedios de emisiones por material particulado), sigue teniendo incidencia en la salud humana, dado que los estándares todavía se encuentran por debajo de los niveles internacionales establecidos por la OMS.

Por otra parte, no existen suficientes estudios que valoren el impacto sobre los sistemas de salud o que identifiquen relaciones entre este problema y la aplicación de medidas que busquen mitigar dichos efectos. El problema de la contaminación, dados sus efectos en la salud humana, se considera un problema de salud pública con consecuencias significativas sobre la tasa de morbilidad y mortalidad (por causas no violentas) en la ciudad. Así, este tipo de estudio puede replicarse para otros contaminantes relacionados con emisiones móviles y su incidencia en la salud humana, considerando que probablemente los efectos de la exposición no se manifiestan de forma inmediata; ello puede tardar varios días, según diferentes condiciones sociales o de características físicas de los individuos.

Una aproximación más acertada para medir diferentes efectos en la salud se ha presentado en varios estudios, que incluyen problemas cardio-respiratorios en las admisiones hospitalarias en especial para $PM_{2.5}$; según la OMS, este último genera mayor incidencia en tales casos. Aunque es difícil establecer la incidencia directa entre cuál de los contaminantes afecta en mayor medida la salud, es posible que en futuras investigaciones se elaboren modelos para múltiples contaminantes, no solo sobre las consultas por enfermedades respiratorias, sino sobre tasas de morbilidad o mortalidad (por causas no violentas).

Agradecimientos

Se agradece a Metrosalud, la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire (Redaire) y al Centro de Investigaciones y Consultorías (CIC), de la Facultad de Ciencias Económicas por su apoyo en el desarrollo del presente artículo. A Sergio Restrepo e Isabel Cristina Garcés por sus comentarios y apreciaciones. A Sweet, por su comprensión.

Referencias

- 1 Chappie M, Lave L. The Health Effects of Air Pollution: A Reanalysis. *Journal of Urban Economics* 1981; 12: 346-376.
- 2 Atkinson RW, Bremner, SA, Anderson HR, Strachan DP, Bland JM., de Leon A. Short-term Associations between Emergency Hospital Admissions for Respiratory and Cardiovascular Disease and Outdoor Air Pollution in London. *Archives of Environmental Health* 1999; 54: 398-411.
- 3 Glasser M, Greenburg L, Field F. Mortality and Morbidity During a Period of High Levels of Air Pollution. *Archives of Environmental Health* 1966; 15: 684-694.
- 4 McCarroll J. Measurements of Morbidity and Mortality Related to Air Pollution. *Journal of Air Pollution and Control Association* 1967; 17: 203-209.
- 5 Dean G. Air Pollution and Health. *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health* 1968;88: 31-32.
- 6 Waddell T. The Economic Damages of Air Pollution. *Economic Analysis Branch*. Washington Environmental Research Center: Washington D.C; 1974.
- 7 Page WP, Fellner W. Exploratory Techniques for the Determination of Potential Dose-Response Relationships between Human Health and Air Pollution. *Journal of Environmental Economics and Management* 1978; 5: 376-389.
- 8 Mendelsohn R, Orcutt G. An Empirical Analysis of Air Pollution Dose-Response Curve. *Journal of Environmental Economics and Management* 1979; 6: 85-106.
- 9 Dockery DW, Pope AC. Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annual Review of Public Health* 1994; 15: 107-132.
- 10 Pope AC, Bates DV, Raizenne ME. Health Effects of Particulate Air Pollution: Time for Reassessment?. *Environmental Health Perspectives* [revista en internet] 1995. [acceso 10 de Junio de 2010]; 1: 472-480. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1523269/pdf/envhper00354-0064.pdf>.
- 11 Bates D, Sitzo R. Air Pollution and Hospital Admissions in Southern Ontario: The Acid Summer Haze Effect. *Environmental Research* 1987; 43: 317-331.
- 12 Bates D; Baker AM, Sitzo R. Asthma Attack Periodicity: A Study of Hospital Emergency Visits in Vancouver. *Environmental Research* 1990; 51: 51-70.
- 13 Schwartz J, Spix C, Wichmann HE, Malin E. Air Pollution and Acute Respiratory Illness in Five German Communities. *Environmental Research* 1991; 56: 1-14.
- 14 Lipfert, FW, Hammerstrom T. Temporal Patterns in Air Pollution and Hospital Admissions. *Environmental Research* 1992; 59: 374-399.
- 15 Zuidema, T, Nentjes A. Health Damage of Air Pollution: An Estimate of a Dose-Response Relationship for the Netherlands. *Environmental and Resource Economics* 1997; 9: 291-308.
- 16 Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Evaluación de los niveles de contaminación en las zonas del valle de Aburrá: calidad del aire en el Valle de Aburrá en el 2008 [internet]. Medellín, Universidad Nacional; 2009. [acceso 15 de Febrero de 2010]. Disponible en: <http://www.metropol.gov.co/aire/compartidos/>.
- 17 Adonis M, Cáceres D, Moreno G, Gil L. Contaminación del aire en espacios interiores. *Ambiente y Desarrollo* 1995; 11: 79-89.
- 18 Organización Mundial de la Salud. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. OMS; 2008

- 19 Matthew N. Air Pollution, Health, and Socio-Economic Status: The Effect of Outdoor Air Quality on Childhood Asthma. *Journal of Health Economics* 2004; 23(6): 1209-1236.
- 20 Muñoz AM, Paz JJ, Quiroz CM. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública* 2007; 25(2): 85-94.
- 21 Uribe E. Air Pollution Management in Two Colombian Cities: Case Study. *Revista Desarrollo y Sociedad* 2004; 54: 1-50.
- 22 Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Calidad del aire en el valle de Aburrá en el 2009. Universidad Nacional de Colombia: Medellín; 2009.
- 23 Shy CM. Epidemiologic evidence and the United States air quality standards. *American Journal of Epidemiology* 1979; 110: 661-671.
- 24 O'Neill MS, Jerrett M, Kawachi I, Levy JJ, Cohen AJ, Gouveia N, Wilkinson P, Fletcher T, Cifuentes L, Schwartz J. Health, Wealth, and Air Pollution: Advancing Theory and Methods. *Environmental Health Perspectives* 2003; 111: 1861-1870.
- 25 Burnett R, Doiron MS, Stieb D, Sabit M, Brook JR. Effects of Particulate and Gaseous Air Pollution on Cardiorespiratory Hospitalizations. *Archives of Environmental Health* 1999; 54(2): 130-139.
- 26 Linn W, Szlachcic Y, Gong H, Kinney P, Berhan K. Air Pollution and Daily Hospital Admissions in Metropolitan Los Angeles. *Environmental Health Perspectives* 2000; 108 (5): 427-434.
- 27 Zanobetti A, Schwartz J. Air Pollution and Emergency Admissions in Boston, MA. *Journal of Epidemiology Community Health* 2006; 60: 890-895.
- 28 Bell M, Ebisu K, Peng RD, Walker J, Samet JM, Zeger S, Dominici F. Seasonal and Regional Short-term Effects of Fine Particles on Hospital Admissions in 202 US Counties, 1999-2005. *American Journal of Epidemiology* 2008; 168 (11): 1301-1310.
- 29 Bell M, Ebisu K, Peng RD, Samet JM, Dominici F. Hospital Admissions and Chemical Composition of Fine Particle Air Pollution. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 2009; 179: 1115-1120.
- 30 Campos J, Palomo I. Polución aérea y estado protrombótico. *Anuario Facultad de Medicina [revista en internet]* 2009. [acceso 12 de Abril de 2010]; 70(1): 41-44. Disponible en: [www.http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832009000100007&lng=es&nrm=iso](http://revistas.concytec.gob.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832009000100007&lng=es&nrm=iso). ISSN 1025-5583.
- 31 Zanobetti A, Meredith F, Koutrakis P, Schwartz J. Fine Particulate Air Pollution and Its Components in Association with Cause-Specific Emergency Admissions. *Environmental Health* 2009;8(1): 58-70.
- 32 Atkinson RW, Ross A, Sunyer J, Ayres J, Baccini M, Vonk JM, Boumghar A, Forastiere F, Forsberg B, Touloumi G, Schwartz J, Katsouyanni K. Acute Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Admissions: Results from APHEA-2 Project. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 2001; 164: 1860-1866.
- 33 Bates D. The Health Effects of Air Pollution. *Journal of Respiratory Diseases* 1980; 1: 29-37.
- 34 Korn EL, Whittemore AS. Methods of Analyzing Panel Studies of Acute Health Effects of Air Pollution. *Biometrics* 1979; 35: 745-802.
- 35 Fauroux B, Sampil M, Quenel P, Lemoulec Y. Ozone: A Trigger for Hospital Pediatric Asthma Emergency Room Visits. *Pediatric Pulmonology* 2000; 30: 41-46.
- 36 Leavy D, Lumley T, Sheppard L, Kaufman J, Checkoway H. Referent Selection in Case-Crossover Analyses of Acute Health Effects of Air Pollution. *Epidemiology* 2001; 12: 186-92.
- 37 Brunekreef B, Holgate S. Air pollution and health. *The Lancet* 2002; 360: 1233-1242.
- 38 Proantioquia, Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, El Colombiano, Universidad Eafit, Casa Editorial El Tiempo, Fundación Corona, Cámara de Comercio de Bogotá. Medellín Como Vamos: Presentación mesa de trabajo sobre aire, 2008; [internet]. Medellín; 2008 [acceso 15 abril de 2010]; 24-27. Disponible en: <http://www.medellincomovamos.org/bitcache/127a6e8099e89bf85d1f0bae446c32d2730d89fa?vid=332&disposition=inlinen&op=view>
- 39 Ortiz CH, Escobar J, García D. Contaminación atmosférica y salud: estimación de una función dosis-respuesta para Cali. Documentos de trabajo CIDSE: Universidad del Valle 1996; 1: 1-21.
- 40 Gómez A; Henao E; Molina E, Molina F. Evaluación de las partículas totales (PST) y partículas respirables (PM10) en la zona de Guayabal, Medellín, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería* 2003; 30: 24-33.
- 41 Lenis J, Ospina J. El material particulado respirable emitido por el parque automotor y su relación con las enfermedades respiratorias reportadas por la secretaria de salud de Medellín 2003 [Monografía de grado]. Medellín: Facultad Nacional de Salud Pública; 2003.
- 42 Martínez E. Contaminación Atmosférica: efectos sobre la salud en Medellín [internet]. Medellín; 2008 [acceso 10 de febrero de 2010]. Disponible en: <http://www.medellincomovamos.org/presentacion-contaminacion-atmosferica-los-efectos-sobre-la-salud-en-medellin>.
- 43 Courant P, Porter R. Averting Expenditure and the Cost of Pollution. *Journal of Environmental Economics and Management* 1981; 8: 321-329.