

# Valoración económica del efecto sobre la salud de la contaminación atmosférica por fuentes móviles en Pereira

Economic valuation of health effects of air pollution from mobile sources in Pereira.

Tito Morales Pinzón<sup>1</sup>, Jorge Andrés Martínez Carmona<sup>2</sup>, Sara Marcela Varela Montoya<sup>3</sup>

*Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia*

tito@utp.edu.co

andresmartinez804@gmail.com

smvarela@utp.edu.co

**Resumen**— Se realizó un estudio para valorar los costos ambientales asociados al impacto sobre la salud de la contaminación atmosférica derivada de fuentes móviles en la ciudad de Pereira. Por medio de esta investigación, se pudo establecer que la contaminación atmosférica por material particulado ( $PM_{10}$ ) es una variable estadísticamente significativa, aunque no la única, para explicar la morbilidad por infección respiratoria aguda (IRA) en grupo etéreo mayor a 5 años. A partir de análisis de correlación y un modelo de simulación construidos, se logró estimar que un aumento de  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  de exposición anual a  $PM_{10}$ , ocasiona que 1979 personas se enfermen por IRA y que el umbral para que se presente IRA en la población es de  $23,17\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$  anual, además, que los costos ambientales estimados en el municipio de Pereira, generados por el impacto a la salud, son al menos 332 millones de pesos/año (estimado para el 2010). Fruto de esta investigación, se proponen estrategias para mitigar el efecto de la contaminación atmosférica y asignar la responsabilidad que corresponde al propietario de vehículo.

**Palabras clave**— contaminación del aire, costos evitados, dinámica de sistemas, infección respiratoria aguda, material particulado.

**Abstract**— A study was conducted to assess the environmental costs associated with the health impact of air pollution resulting from mobile sources in the city of Pereira. Through this research, it was found that air pollution by particulate matter ( $PM_{10}$ ) is a statistically significant variable, although not the only way to explain the morbidity from acute respiratory infection (ARI) in age group over 5 years. From correlation analysis and a simulation model built, it was possible to estimate that an increase in annual exposure  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  of  $PM_{10}$  can produce 1979 of sick people by ARI and

that the threshold for this ARI in the population is of  $23.17\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$  of  $PM_{10}$ . Also it is estimated that environmental costs in the city of Pereira, generated by the impact to health, are at least 332 million of Colombian pesos by year (estimated for 2010 year). Finally, we proposed strategies for mitigate the effect of air pollution and to assign responsibility to owner of vehicle.

**Key Word** — acute respiratory infection, air pollution, avoided costs, particulate matter, system dynamics.

## I. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Pereira ha enfrentado un deterioro de su componente natural especialmente desde la década de los 60's debido al acelerado crecimiento demográfico y al desarrollo industrial y comercial que empezaba a enfrentar la urbe [1]

En la actualidad, la ciudad es considerada como “Centro de Centros”, debido a su privilegiada localización geográfica, lo que ha venido posicionándola como un sitio propicio para el desarrollo comercial del occidente colombiano [2], y con esto, se ha visto disminuida la calidad ambiental del municipio, principalmente del recurso aire, ubicándola dentro de las 8 ciudades con mayor contaminación atmosférica en el país. [3]

Entre las principales fuentes de emisiones contaminantes se encuentran las fuentes móviles, con un aporte promedio del 75% del total de las emisiones, de las cuales aproximadamente la mitad son generadas por los automóviles privados [4]. Uno de los mayores impactos que sufren los habitantes de las ciudades con altos índices de contaminación atmosférica, son los relacionados con la salud pública, y los costos que de ésta se derivan. La valoración ambiental de la contaminación atmosférica es un tema de interés público ya que permite dar una mayor visibilidad al problema.

Los automotores impulsados por motores diesel son la mayor fuente de contaminantes atmosféricos, aportando cerca del 80%

<sup>1</sup> Administrador Ambiental PhD. Profesor Asociado Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira.

<sup>2</sup> Administrador Ambiental, Semillero de Investigación en Sistemas Complejos, Universidad Tecnológica de Pereira.

<sup>3</sup> Administrador Ambiental, Semillero de Investigación en Sistemas Complejos, Universidad Tecnológica de Pereira.

de MP, 60% de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , 65% de  $\text{SO}_x$  y 50% de CO. Esto debido al alto contenido de azufre en este tipo de combustible, a la ausencia de tecnologías de control de emisión, a la antigüedad de estos vehículos y a los problemas de diseño y mantenimiento de vías [5].

En la ciudad de Pereira y en el país en general, el monitoreo de la calidad del aire ha despertado interés en los últimos años, a pesar de estos esfuerzos, la información científica obtenida al respecto es poca; es por esto que el presente estudio se enfoca en visualizar la problemática, los impactos y los costos ambientales de la contaminación atmosférica derivada de fuentes móviles en Pereira.

La investigación desarrollada busca estimar los costos ambientales de la contaminación atmosférica en la ciudad de Pereira. Como objetivos específicos se plantearon:

- Evaluar las relaciones funcionales entre la contaminación atmosférica por el material particulado, el parque automotor y la infección respiratoria aguda.
- Desarrollar un modelo de simulación que permita estimar los costos ambientales de la contaminación atmosférica
- Evaluar estrategias de reducción de la contaminación atmosférica que puedan ser implementadas en la ciudad.

## II. METODOLOGÍA

Como punto de partida, se llevó a cabo una revisión documental en las diferentes instituciones que se consideraron relevantes para el estudio por su relación con el tema de contaminación atmosférica, fuentes móviles y salud en el municipio de Pereira. Se recolectó información de series de datos mensuales y anuales del período 1996-2010.

Se construyó una base de datos con la información obtenida de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), el Instituto Municipal de Tránsito y Transporte de Pereira, la Secretaría Departamental de Salud, la Secretaría de Salud y Seguridad Social de Pereira y el Hospital Universitario San Jorge. Las variables seleccionadas fueron son las siguientes:

- a) Estadísticas sobre infección respiratoria aguda (IRA) en rangos etarios “población menor a 5 años” y “población mayor a 5 años”, conforme a la clasificación utilizada por la Secretaría de Departamental de Salud
- b) Contaminación atmosférica derivada de fuentes móviles, medido como material particulado ( $\text{MP}_{10}$ )
- c) Parque automotor registrado y circulante en el área urbana del municipio de Pereira (PA)
- d) Costos relacionados con la atención hospitalaria de la IRA (CH)

Sobre las tres primeras variables (IRA,  $\text{MP}_{10}$  y PA) se aplicaron técnicas de correlación (especialmente no paramétrica de Spearman) y modelos de regresión lineal como guía para detectar relaciones funcionales que permitieran el posterior desarrollo del modelo de simulación. Usando los modelos lineales, se encontró una función que relaciona la morbilidad por  $\text{IRA} > 5$  años con el material particulado ( $\text{MP}_{10}$ ) y este último con el parque automotor circulante.

Partiendo de las relaciones significativas halladas entre las variables en estudio, se utilizó el método de simulación Monte Carlo para completar la serie de datos faltante no encontrada en las instituciones para los casos de morbilidad por IRA (1996-2005), con lo cual, se obtuvo la serie definitiva 1996-2010 como base que permitiera estimar un modelo de función dosis-respuesta para explicar la IRA a partir del comportamiento del parque automotor.

Una vez definida la relación entre la morbilidad en población  $> 5$  años y la contaminación atmosférica (MP), se valoraron los costos asociados con dicha contaminación. Para realizar estas estimaciones, en primer lugar, se calculó el número de casos por infección respiratoria aguda (IRA), una vez obtenido este dato, conforme al comportamiento de los casos atendidos en el Hospital Universitario San Jorge (HUSJ), se calculó el costo total de atención (urgencias, hospitalización, medicamentos) y se asumió que cada consulta requiere de fórmula médica.

Se desarrolló un modelo de simulación para representar el comportamiento del sistema en las variables estudiadas (parque automotor, contaminación con  $-\text{MP}-$ , infección respiratoria aguda  $-\text{IRA}-$ , costos ambientales), como soporte a la toma de decisiones administrativas, utilizando el programa Stella, el cual es un software que aplica la metodología de dinámica de sistemas desarrollada por Jay Forrester [6]. Usando esta metodología se puede representar cualquier sistema a partir de los conceptos de nivel y flujo, siendo el primero de ellos el componente que tiene la función de acumular o servir de “depósito” y el segundo el que define la cantidad de cambio del nivel (variación) en función del tiempo.

Finalmente, se valoró el costo ambiental por afectación en la salud asociado con una determinada concentración de contaminante ( $\text{MP}_{10}$ ) en el aire.

El análisis de los costos asociados a la atención hospitalaria por IRA (CH), se seleccionó la población atendida en el Hospital Universitario San Jorge durante el año 2010, dicha base de datos representaba un total 677 historias clínicas que correspondían a IRA (con código CIE-10 del J00 al J22 según registros de la base de datos del hospital). Con las 677 historias, se realizó un muestreo aleatorio sistemático que finalmente arrojó 85 historias clínicas para evaluar y de las cuales se obtuvieron los valores estimados de CH.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Crecimiento del parque automotor en el municipio de Pereira

Para afrontar la contaminación del recurso aire derivada de fuentes móviles en el municipio de Pereira, se hace necesario el conocimiento del total del parque automotor registrado y circulante en la ciudad, puesto que según la agenda ambiental del municipio, Pereira se convierte en un paso obligado de los automotores que se dirigen hacia otras zonas del país [7].

Al realizar indagaciones sobre el parque automotor, se obtuvo en el Instituto Municipal de Tránsito y Transporte de Pereira (IMTT), el consolidado de vehículos registrados en él desde el año 1996 (ver Tabla 1).

El parque automotor circulante, según información brindada por la Subdirección General de Control Interno del Instituto Municipal de Tránsito y Transporte de Pereira, éste se estima aumentando en un 30% el parque automotor matriculado (valor de referencia utilizado debido a la ausencia de datos), ajustando el parque automotor total debido a los vehículos que circulan de ciudades vecinas (ver Tabla 1). Los datos presentados en la Tabla 1, evidencian un crecimiento importante del parque automotor, especialmente en los años 1997, 2006 y 2007, estos últimos dos años posiblemente asociados al incremento de la dinámica comercial de la ciudad de Pereira.

Año	Parque Automotor		Crecimiento (%)
	Registrado	Circulante	
1996	41.683	54.188	0
1997	51.652	67.148	23,92
1998	54.085	70.311	4,71
1999	54.989	71.486	1,67
2000	56.122	72.959	2,06
2001	57.461	74.699	2,39
2002	59.337	77.138	3,26
2003	61.797	80.336	4,15
2004	65.498	85.147	5,99
2005	71.415	92.840	9,03
2006	80.823	105.070	13,17
2007	89.510	116.363	10,75
2008	95.030	123.539	6,17
2009	98.114	127.548	3,25
2010	101.545	132.009	3,50

Tabla 1. Parque automotor registrado. Elaboración propia a partir de datos del IMTT 1996-2010

La mayor parte del parque automotor la conforman vehículos particulares (53,9%) y motos (42,5%), mientras que la menor proporción es para los vehículos públicos (1,0%) y volquetas y camiones (2,3%) (ver Figura 1).

Este comportamiento es similar al identificado en otras ciudades como en la ciudad de Bogotá, donde se reporta,

según el estudio del impuesto sobre vehículos de la ciudad, que el 92% de los vehículos que conforman el parque automotor son vehículos particulares [8], y similar situación se evidencia en el Valle de Aburrá, donde a 2004 existían 283.616 autos particulares [9].

Por el tamaño de la ciudad de Pereira y comparado con estas dos grandes ciudades, se puede afirmar que la tasa de motorización es muy alta. Mientras Bogotá (una ciudad de 7.555.165 habitantes proyectados a 2012 [10]) tiene una tasa de motorización de 208 vehículos por cada mil habitantes (calculado a partir de [8] y [10]) y Medellín tiene una tasa de motorización de 111 vehículos por cada mil habitantes (estimado de [11] y [10]), Pereira tiene una tasa de motorización de 344 vehículos por cada mil habitantes (estimaciones propias a partir de información suministrada por IMTT y [10]).

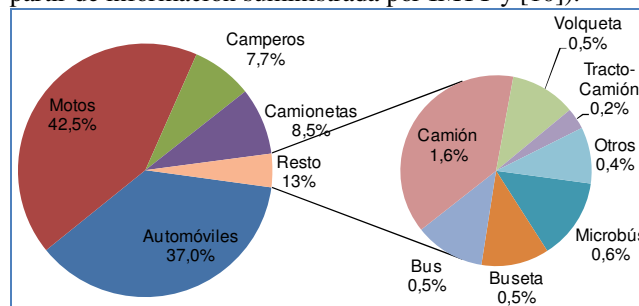


Figura 1. Composición del parque automotor en Pereira en 2010. A partir de datos del IMTT 1996-2010

Se encontró que la cantidad de vehículos según tipología de vehículos crece en forma proporcional al parque automotor, evidenciado mediante una correlación positiva significativa (ver Tabla 2). Esta relación es en especial importante para vehículos particulares (motos, automóviles, camperos, camionetas y microbuses) como soporte del modelo de simulación.

Tipología	Rho de Spearman	Significancia
Automóviles	0.99	+
Motos	0.99	+
Camperos	0.99	+
Camionetas	0.99	+
Microbús	0.98	+
Buseta	-0.13	NS
Bus	-0.34	NS
Camión	0.21	NS
Volqueta	-0.78	-
Tracto-Camión	0.71	+
Maquinaria Agrícola	0.92	+
Otros	0.82	+

NS: no significativo (p>0,05)

Tabla 2. Correlación entre parque automotor circulante y tipología de vehículo.

B. Estimaciones de los aportes de MP

Al analizar las relaciones entre las diferentes tipologías del parque automotor y el aporte de MP<sub>10</sub> del municipio, se

evidencian correlaciones positivas y altamente significativas para la mayoría de las categorías evaluadas (ver Tabla 3). Estos resultados pueden ser evidencia de la relación entre contaminación atmosférica y el parque automotor. Los resultados encontrados son importantes ya que en algunos estudios [12], [13] y [14] se afirma que el 70% de la contaminación atmosférica en los centros urbanos, es ocasionada por las fuentes móviles.

Tipología	Rho de Spearman	Significancia
Automóviles	0,90	+
Motos	0,90	+
Camperos	0,90	+
Camionetas	0,90	+
Microbús	0,81	+
Buseta	0,90	+
Bus	0,90	+
Camión	0,90	+
Volqueta	0,90	+
Tracto-Camión	0,15	NS
Maquinaria Agrícola	0,23	NS
Otros	0,90	+

NS: no significativo (p>0,05)

Tabla 3. Correlación entre tipología de vehículo y aportes de material particulado (MP<sub>10</sub>).

En lo concerniente a las tipologías que no presentan una correlación significativa (Tracto-camión y Maquinaria Agrícola) se debe posiblemente, al bajo número existente en el municipio.

C. Comportamiento de la contaminación por MP y su efecto sobre la salud

Al aplicar el coeficiente de correlación de Spearman entre la tipología de vehículo y la morbilidad por IRA, no se encontraron correlaciones significativas, contrario a lo esperado, ya que se esperaba encontrar al tipo de asociación directa. En teoría las tipologías de vehículos que funcionan con combustible Diesel (Busetas, bus, camión, volqueta, tracto-camión, maquinaria agrícola) deben afectar más la salud humana debido a las emisiones que provoca dicho combustible.

Sin embargo, se encontraron correlaciones positivas entre la morbilidad por IRA en población > 5 años y la concentración de MP en el aire (Tabla 4).

Variable	MP (µg/m <sup>3</sup> )	Significancia
Morbilidad < 5 años	-0.70	NS
Morbilidad > 5 años	0.90	+
Morbilidad total	0.70	NS

NS: no significativo (p>0,05)

Tabla 4. Correlación significativa (p<0.05) entre morbilidad por IRA y concentración de MP.

Es un hecho que la población menor a 5 años es la más vulnerable, además, las infección respiratoria aguda (IRA) es la principal causa de enfermedades agudas en todo el mundo y causa más importante de mortalidad infantil; y se estima que la IRA representa cerca de 2 millones de muertes cada año (70% en África y el sudeste de Asiático) [15]. Sin embargo, la falta de correlación encontrada en nuestro estudio, entre la población infantil y MP<sub>10</sub>, se da muy probablemente porque la población mayor a 5 años, es la que se encuentra en mayor medida expuesta a las emisiones de las fuentes móviles.

D. Definición de relaciones funcionales entre PA, MP e IRA

Se encontraron tres relaciones funcionales entre las variables parque automotor circulante (PA), material particulado (MP) e infección respiratoria aguda (IRA). El PA se encuentra altamente relacionado con la concentración de MP (R<sup>2</sup>= 0,98), mientras que MP se encuentra relacionado con la IRA (R<sup>2</sup>= 0,94). Uniendo ambas expresiones, se puede afirmar que el PA afecta al IRA, dicha relación se puede expresar mediante un modelo lineal (R<sup>2</sup>=0,91) (ver Figura 2).

Esta relación puede ser descrita mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$IRA_{>5 \text{ años}} = 1.979 * MP_{10} - 45.864 + \varepsilon \quad \text{Ec.1}$$

$$PA = 2.897 * MP_{10} - 1.707 + \varepsilon \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

- IRA<sub>>5 años</sub>: Población mayor de 5 años afectada por IRA.
- MP<sub>10</sub>: Material particulado medio anual menor a 10µ.
- PA: Parque automotor circulante.

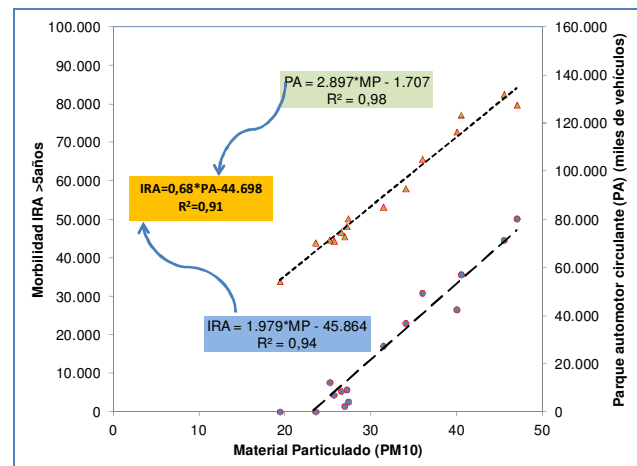


Figura 2. Modelo de regresión entre MP10 y morbilidad por IRA en > 5 años.

Al integrar los modelos Eq.1 y Eq.2 en Eq.3, se deduce que por cada 1000 vehículos nuevos que circulen en el año en la ciudad de Pereira, se estima que una población de 680 habitantes más (mayores de 5 años), se verán afectados por IRA en dicho ese año.

$$IRA_{>5 \text{ años}} = 0,68 * PA - 44.698 + \varepsilon \quad \text{Ec.3}$$

A pesar de las limitaciones de información y la poca sistematización de datos encontrada en las instituciones visitadas, se pudo encontrar que cada  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  de exposición anual a material particulado, puede incrementar en 1.979 los enfermos por IRA (ver figura 2). Igualmente, según el modelo, a partir de una concentración anual de  $23,17\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{MP}_{10}$ , se pueden presentar enfermos por IRA. Lo anterior considerando el material particulado como uno de los mayores factores que contribuye a dicha enfermedad. Por otra parte, un incremento o disminución en 1% de la contaminación por  $\text{MP}_{10}$  produce un incremento o disminución de  $\text{IRA}_{>5 \text{ años}}$  de 0,52% como una cota superior estimada del verdadero valor que se podría encontrar teniendo una serie histórica de registros más larga (Eq.4).

$$t_{\text{IRA}_{>5 \text{ años}}} = 0,52 * \text{MP} - 11,96 \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

$\text{IRA}_{>5 \text{ años}}$ : Tasa de morbilidad por IRA en población mayor de 5 años.

### E. Costos ambientales de la contaminación atmosférica en Pereira

Al revisar las historias clínicas seleccionadas con el muestreo realizado en el HUSJ, se encontró que la población tratada tiene una edad promedio de 9 años, maneja un tiempo de hospitalización de 5 días aproximadamente y en su mayoría pertenecen al régimen subsidiado (ver Figura 3).

Se estimó que la población afectada por IRA que es susceptible de hospitalización asciende al 0,48% del total de los datos de morbilidad.

Se encontró como promedio de costos por enfermedad (consulta, hospitalización y tratamiento) un valor de \$4.061.328. Este valor es asumido como copagos efectuados según el régimen al que se encuentra afiliado y el nivel social del mismo (ver Tabla 5).

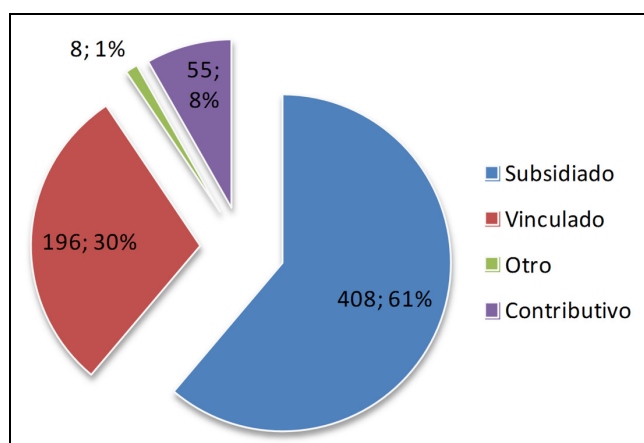


Figura 3. Población atendida según el régimen de salud al que pertenece en el HUSJ

Criterio	Estimación
Edad promedio (años)	32
Tiempo promedio de hospitalización (días)	8
Costo promedio día de hospitalización	\$4.061.329
% casos con hospitalización en HUSJ	0,48%

Fuente: Elaboración propia a partir de muestreo en HUSJ.

Tabla 5. Estimaciones base para el cálculo de los costos ambientales

### F. Modelo de la dinámica de los costos ambientales de la contaminación del aire por $\text{MP}_{10}$

El modelo construido está compuesto por cuatro subsistemas (ver Figura 4):

- 1) El componente población está conformado por un nivel (Población) que se ve afectado por un flujo (Crecimiento poblacional), esto representa, la afectación directa que tiene sobre la población de la ciudad de Pereira, la tasa de crecimiento poblacional asociada estimada a partir de los datos del DANE [10]. Como punto de partida y valor inicial del nivel (rectángulo) “Población”, que representa la población de Pereira, se tomó como dato inicial la información la población de la cabecera (área urbana) para el año 2005 [10].
- 2) El nivel correspondiente al parque automotor, cuyo dato inicial se tomó de la información suministrada por tránsito al año 2005, se encuentra afectado directamente por la tasa de crecimiento asociada (calculada a partir de datos Secretaría de Tránsito en el periodo 2005-2010), por la población del municipio y por el límite máximo de vehículos propuesto para el modelo (60% del total de la población)<sup>4</sup>, a su vez, este nivel, afecta directamente la proporción de motos, automóviles y buses y camiones circulantes. El parque automotor circulante, sirvió como variable de entrada para el cálculo del segundo nivel “vehículos que no circulan”, este está condicionado por el factor de disminución (pico y placa).
- 3) La conformación del parque automotor circulante, es afectada por los factores de emisión por tipología de vehículo y por el recorrido medio anual de los mismos (Variables auxiliares), constituyendo el dato de emisiones diarias de  $\text{MP}_{10}$  (Variable auxiliar), que afecta el nivel de concentración de material particulado en la ciudad. El nivel de concentración de  $\text{MP}_{10}$ , toma como valor inicial, el obtenido de las mediciones realizadas por CARDER para finales del año 2005, este es afectado por el tiempo de disipación (20 días para el modelo)<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Este valor fue definido por los autores como límite esperado para los 10 años de corrida del modelo (2015).

<sup>5</sup> Este un valor hipotético y se considera una tasa media de disipación reducida. Valores altos pueden ser simulados en el modelo para observar su efecto sobre el sistema.

- 4) El componente de IRA, se construye con 4 niveles (MP10, IRA atribuible a MP, Población sana e IRA acumulado), 4 flujos y 4 variables auxiliares. La población sana inicial se calculó al restar los valores de DANE (Población mayor de 5 años) para el 2005 con los casos de IRA presentes en el municipio para la misma fecha, obtenidos de la Secretaría de Salud. Este nivel, es afectado por los nuevos casos de IRA, calculados a partir de la ecuación hallada mediante los modelos lineales estimados. El nivel correspondiente a nuevos casos de IRA, se ve afectado directamente por el tiempo de recuperación, el cual fue calculado con el muestreo de los datos suministrados por el Hospital Universitario San Jorge para el año 2010 (8 días).
- 5) Los costos ambientales, se evalúan con la población hospitalizada, que a su vez es calculada con la información obtenida del muestreo de datos en el Hospital Universitario San Jorge (0,48% de los casos de IRA). La población hospitalizada, es segregada en los diferentes regímenes y niveles existentes en el sistema de salud colombiano, cuyos datos fueron obtenidos del informe de estadísticas sociales del municipio de Pereira para el año 2006 [16]. La composición según régimen es afectada por el porcentaje de pago definido para la misma, con lo cual, se obtienen los datos correspondientes a los costos pagados por los usuarios debido al tratamiento y hospitalización. Finalmente, en este componente se calculan los costos totales por atención para los casos de IRA en mayores de 5 años atribuibles a MP, para lo cual, se utilizó como valor promedio el hallado en los muestreos del hospital.

**1. Supuestos del modelo**

El componente parque automotor se trabajó con los siguientes supuestos:

- 1) La tasa de motorización y el crecimiento del parque automotor presentan el mismo comportamiento que se ha evidenciado desde el año 1996 al 2010 y se mantendrá entre 3.5 y 3.6% hasta el 2015.
- 2) La composición del parque automotor sigue siendo la misma que se presentó en la serie de datos estudiada.
- 3) Se estableció como limitante para el número de vehículos el correspondiente al 60% de la población total de la ciudad.

- 4) El parque automotor circulante se calculó aumentando el 30% sobre el parque automotor registrado.
- 5) Se asume que la distribución del número final de las placas es igual para todos, por lo tanto, existe un 10% de cada número (0-9).

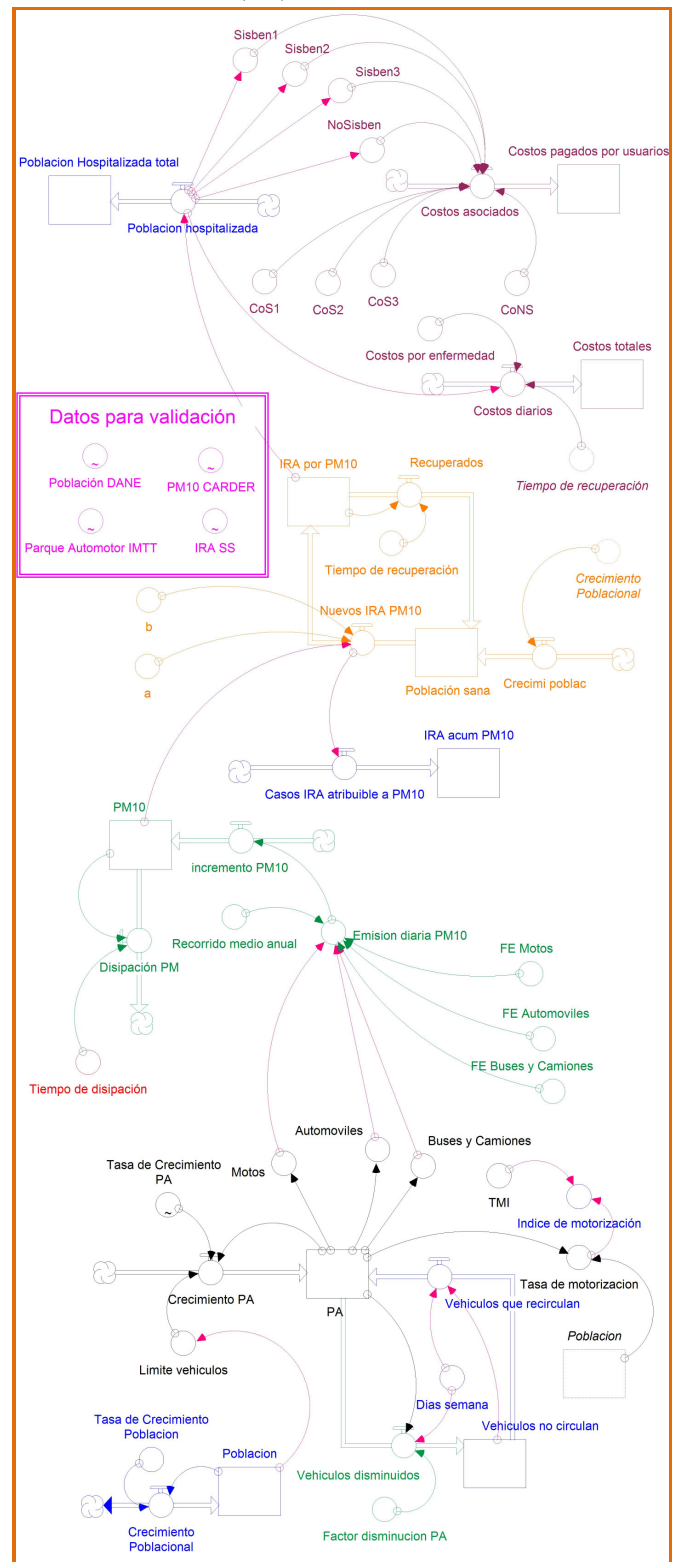


Figura 4. Modelo de simulación de los costos ambientales derivados de la contaminación atmosférica por MP<sub>10</sub>

- 6) El parque automotor circulante se mantiene constante durante todos los días de la semana.
- 7) Se partió del supuesto que los automotores tienen un recorrido anual promedio que se comporta como una variable con una distribución normal con una media de 15.000 km/año, con una desviación estándar de 3.000 km/año. Así mismo, se estableció un factor de emisión promedio para los automotores, según el tipo de combustible que utilizan.
- 8) Se trabajó con un tiempo de disipación del MP<sub>10</sub> de 20 días.
- 9) Los nuevos casos de personas afectadas por IRA, se modelaron según los resultados obtenidos del modelo de regresión lineal.
- 10) Se trabajó con un tiempo de recuperación promedio de 8 días.
- 11) Se asumió que la población afectada por IRA que es susceptible de hospitalización asciende al 0,48% del total de los datos de morbilidad.
- 12) Se trabajó con un promedio de costos por enfermedad (consulta, hospitalización y tratamiento) de \$4.061.328.
- 13) Los copagos efectuados según el régimen al que se encuentra afiliado y el nivel del mismo se establecieron como:
  - a. 0% para Sisbén y vinculados de nivel 0 y 1.
  - b. 10% para Sisbén 2
  - c. 30% para Sisbén 3
  - d. 100% para régimen contributivo.

Para efectos del modelo y conforme al Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales (Sisbén), los valores de pago que deben ser asumidos por el usuario del servicio de salud son los siguientes:

- 0% para nivel Sisbén 0 y 1 y vinculados
- 10% para Sisbén 2
- 30% para Sisbén 3
- 100% para régimen contributivo

Como resultado del Sisbén, aproximadamente el 90% de la población atendida en el HUSJ, que pertenece a niveles 0 y 1, no realizan pago alguno por el servicio.

## 2. Validación del modelo

Para validar el Modelo, este se realizaron 1000 corridas para un periodo de 5 años (2006 a 2010) y se contrastaron el promedio de los resultados con los datos reales obtenidos de las distintas fuentes consultadas. Es de aclarar que para validar los datos del Parque Automotor Total (circulante y no circulante), el factor de disminución (debido a la aplicación de alguna política de reducción) se hace igual a cero.

En promedio el nivel ajuste encontrado con el modelo es muy bueno, con desviaciones medias menores al 0.1% para la variable Población y menor al 3% para las variables Parque Automotor y material particulado (MP<sub>10</sub>).

## G. Resultados del modelo de simulación

### 1. Línea base de referencia

Según la situación simulada, sin factor de reducción en el parque automotor circulante (0%), los costos de atención a población mayor de 5 años, hospitalizados por IRA atribuible a MP<sub>10</sub>, en el periodo modelado (10 años), se estiman en 19.525 millones de pesos, de los cuales, 10.133 millones serían asumidos por los usuarios y los restantes 9.392 millones serían obtenidos del presupuesto municipal (ver Figura 5).

En lo referente al número de casos de IRA atribuibles a materia particulado en los 10 años simulados, estos se encuentran alrededor de 1.004.000, de los cuales, 38.500 aproximadamente requieren hospitalización (ver Figura 6).

### 2. Situación actual

Se evaluó la situación actual con la política de pico y placa (2 dígitos por día) con la finalidad de compararla con la situación de referencia, los resultados se presentan a continuación.

Al analizar los datos obtenidos para el escenario actual, es evidente la reducción que se presenta tanto en costos como en casos de IRA con referencia a la información obtenida para el escenario de referencia, lo que indica el éxito de la política de restricción en lo referente a la disminución de emisiones atmosféricas vehiculares.

Los costos ambientales derivados de la asistencia hospitalaria por IRA atribuible a MP<sub>10</sub> son de 9.191 millones de pesos en el escenario actual, con factor de reducción en el parque automotor circulante del 20%, lo que indica una disminución en los costos de 53% con relación a la línea base de referencia. La tendencia es igual en los costos asumidos por los usuarios, con una reducción de 5.363 millones de pesos (57%) para el periodo comprendido entre los años 2005 y 2015 (ver Figura 5).

Durante el mismo lapso de tiempo, al evaluar el total de casos de IRA generados por el MP<sub>10</sub>, se presenta una disminución cercana a los 526.000 casos, en cuanto a los casos que requieren hospitalización, la reducción es de 20.300 casos (ver Figura 6).

H. Propuestas de acciones de mejoramiento

Como propuestas para el mejoramiento de la situación actual en lo referido a casos por IRA en mayores de 5 años derivados de la contaminación atmosférica por fuentes móviles en el municipio de Pereira y basados en la información obtenida durante el estudio y en los resultados arrojados por los diferentes modelos, se plantean dos propuestas: intensificación de la política de restricción (pico y placa) y creación de una sobretasa a la circulación vehicular para suplir los costos ambientales asociados a la IRA derivada de MP<sub>10</sub>.

1. Intensificación de la política de restricción (pico y placa)

Por los datos obtenidos al comparar la situación de referencia con la situación actual, se considera conveniente como medida de mejoramiento de la calidad ambiental, y con ello de la reducción de casos de IRA atribuibles a material particulado, y por ende de los costos ambientales asociados a estos, el aumento del factor de restricción para la circulación de automotores en la ciudad de Pereira en los días de semana, pasando del 20% que existe hoy en día (2 dígitos diarios), a un 40% (4 dígitos al día).

Dicha política ocasionaría que cada vehículo dejará de circular 2 días a la semana generando así una disminución en los casos por IRA y en los costos ambientales del 84% con relación a la línea base de referencia (ver Figura 5).

La reducción de casos de IRA con respecto al escenario actual es del 57%, equivalente a un total de 36.961 casos/año (ver Figura 6).

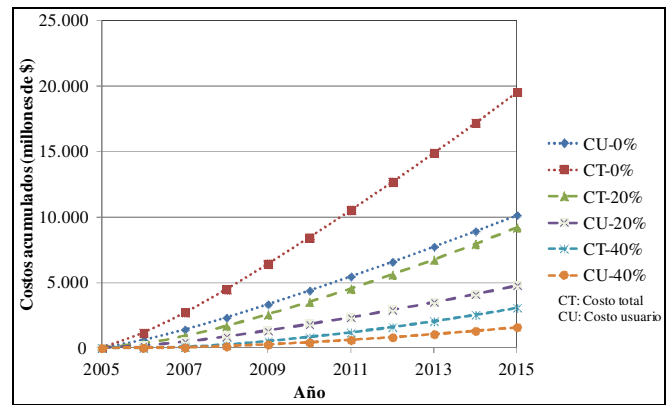


Figura 5. Costos ambientales totales y pagados por usuarios estimados de la contaminación por MP<sub>10</sub>

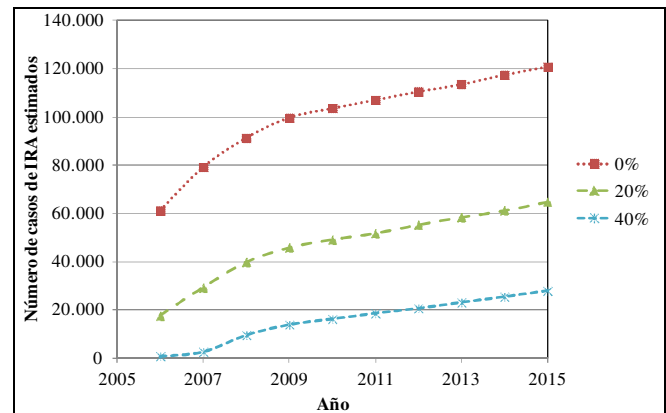


Figura 6. Número de casos estimados de IRA asociados a la contaminación por MP<sub>10</sub>

2. Sobretasa a la circulación vehicular para suplir los costos ambientales asociados a la ira derivada de MP<sub>10</sub>

Bajo el supuesto que el modelo representa correctamente la situación estudiada, y por causa de los altos costos derivados de la atención hospitalaria a los pacientes mayores de 5 años con IRA atribuible a material particulado, es posible pensar en la incorporación de una sobretasa por circulación a los propietarios de vehículos en el municipio de Pereira, con miras a subsidiar dichos tratamientos.

La sobretasa se calcularía a partir de la relación entre los costos ambientales totales del IRA por MP<sub>10</sub> sobre los vehículos circulantes en la ciudad y aplicando un factor de circulación (Ecuación 5).

$$S = \frac{CA}{V} \cdot F$$

Donde:

- S: Sobretasa de circulación vehicular
- CA: Costos ambientales de IRA por MP<sub>10</sub>
- V: Parque automotor registrado
- F: Factor de circulación vehicular



El valor de F asume el valor de 1 cuando se asume que todos los vehículos tienen la misma circulación o el vehículo tiene una circulación equivalente a la media de circulación de los vehículos matriculados en la ciudad.

La Tabla 6 presenta una estimación de los costos reducidos por la implementación de la tasa, bajo el supuesto de que el valor recaudado se destine completamente al sector salud para cubrir los costos por IRA. Se ha usado un factor de circulación promedio ( $F=1$ ).

Dado que el dinero recogido con la sobretasa propuesta no cubriría la totalidad de los costos generados por IRA atribuible a  $MP_{10}$ , debido a que solo sería cancelado por los vehículos matriculados en el municipio de Pereira, los costos excedentes serían asumidos de la misma forma como se ha venido haciendo hasta el momento y por lo tanto no se recaudarían como tasa.

Item	Valor (\$)
Valor del tasa por vehículo	2.515
Costos asumidos vía tasa	255.384.615
Costos Excedentes (no recaudados)	76.615.385
Costos asumidos por los usuarios	39.763.385
Costos asumidos por el municipio	36.852.000
Costos Totales	332.000.000

Tabla 6. Resumen de costos asumidos vía tasa vehicular por IRA atribuible a  $MP_{10}$  en el año 2010.

Los costos totales no cubiertos (excedentes) serían un 23% de los costos totales al año 2010 en el escenario actual, por lo tanto, la reducción en los costos asumidos tanto por los usuarios como por el municipio sería aproximadamente de 77%.

Al evaluar el dinero cancelado por los propietarios de vehículos derivados de la tasa, en el periodo de tiempo estudiado (2006-2015), bajo las condiciones actuales (factor de disminución de 20%), este asciende aproximadamente a \$46.500. Estos costos serían mucho menores si se aplicaran la estrategia de reducción al 40% del parque automotor circulante, donde para el mismo periodo, cada propietario asumiría solo \$15.544. Esta estimación si bien no considera la tipología del vehículo, da una idea general de los costos ambientales que podrían ser cubiertos por los propietarios de vehículos y cuya recaudación, debería redirigirse a la atención de salud de

pacientes con IRA y la investigación aplicada para el mejoramiento de la calidad ambiental del aire en la ciudad de Pereira.

Una segunda opción para lograr un mayor impacto en la asignación de la tasa recaudada, consistiría en aplicar un porcentaje destinado al sector salud y el resto para investigación aplicada en el mejoramiento de las condiciones de calidad del aire en la ciudad de Pereira.

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La contaminación atmosférica por material particulado ( $MP_{10}$ ) derivada de fuentes móviles, es una variable significativa, aunque no la única, para explicar la morbilidad por infección respiratoria aguda (IRA).

A partir de los datos existentes, se estableció una relación de afectación entre población enferma por IRA y  $MP_{10}$ . Las personas más vulnerables a las afecciones respiratorias (IRA) atribuibles a  $MP_{10}$ , son los mayores de 5 años, posiblemente como consecuencia de una mayor exposición a las emisiones de los vehículos.

A partir de un modelo de simulación y reconociendo que este no es más que una representación simplificada de la realidad, se ha podido estudiar el comportamiento de la contaminación por  $MP_{10}$  y su relación con la IRA.

Se estimó que por cada  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  de exposición anual a  $MP_{10}$ , se producen 1.974 casos de IRA por año y se aumenta la tasa de morbilidad por IRA en un 0,52%. Así mismo, se halló el umbral de exposición a  $MP_{10}$ , indicando que a partir de  $23,17\mu\text{g}/\text{m}^3$  se producen enfermos por IRA.

Un incremento de 1.000 vehículos circulando por año, podrían incrementar en un  $0,34\mu\text{g}/\text{m}^3$  la concentración media anual de  $MP_{10}$ , y generando 667 nuevos casos de IRA.

Se estima que un aumento o disminución de un 1% en la contaminación por  $MP_{10}$  produce un incremento o disminución de 2,32% en la tasa de morbilidad por IRA en población mayor a 5 años.

Los costos ambientales totales para IRA en el municipio de Pereira, se encuentran en el orden de los 332 millones de pesos/año (estimado para el 2010) como un límite inferior de los costos ambientales reales, ya que solo fueron incluidos los costos por hospitalización.

Los costos evitados en el periodo estudiado (2006-2015), de ser implementada la propuesta de intensificación de la política de restricción (pico y placa) al 40%, ascenderían a 6.119 millones de pesos.

Haciendo uso del instrumento económico de sobretasa a la circulación vehicular, es posible recaudar un 77% del total de costos ambientales asociados a la contaminación por MP<sub>10</sub>.

El modelo propuesto, constituye solo una aproximación y puede ser perfeccionado a partir de mejores estimaciones de las variables consideradas en el estudio, sin embargo, puede ser de gran utilidad para los tomadores de decisiones y organismos de control.

## RECOMENDACIONES

Es necesario mejorar el sistema de registro de datos por parte de las instituciones encargadas de la medición de variables ambientales, registro del parque automotor y estadísticas de salud. Sería ideal poder contar con registros de menor escala temporal (mensuales y diarios).

Se debe analizar por parte de los gestores y tomadores de decisión, la viabilidad de aplicación de las propuestas presentadas en este estudio. Desde una reducción del parque automotor circulante hasta el cobro de una sobretasa a la circulación vehicular.

Dado el potencial impacto de que acciones conjuntas de investigación aplicada y mejoramiento de la calidad de aire pueden tener sugerimos que la potencial sobretasa recaudada se destine un 30% al sector salud y el restante 70% a un fondo de investigación que puede ser complementado con recursos propios de instituciones como la Universidad Tecnológica de Pereira vía convocatoria interna de financiación de proyectos de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Hugo Ángel Jaramillo, *Pereira*, Tomo II. Pereira: Gráficas Olímpica, 1983.
- [2] *Concejo Municipal de Pereira*, Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pereira, 2006.
- [3] *Consejo Nacional de Política Económica y Social*, CONPES 3344, Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire. 2005.
- [4] C. Sheinbaum, S. Meyers, Transportation in the Mexico City Metropolitan Area. Energy for Sustainable Development, vol. 2, N°. 3. 1995.
- [5] ROJAS, Néstor. Aire y Problemas Ambientales de Bogotá. Foro Nacional Ambiental. 2007.
- [6] High Performance Systems. (2004). Stella software - An Introduction to Systems Thinking. (H. P. Systems,

Productor) Recuperado en Noviembre de 2011, de <http://www.iseesystems.com/>

- [7] Alcaldía de Pereira, Agenda Ambiental del Municipio de Pereira, 2007.
- [8] *Secretaría Distrital de Movilidad, Alcaldía Mayor de Bogotá*, Movilidad en cifras 2011, 2012. Recuperado en Mayo de 2012 de [http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx\\_archivos/audio\\_y\\_video/boletin%20cifras.pdf](http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/boletin%20cifras.pdf)
- [9] Grupo de Investigaciones Ambientales. Universidad Pontificia Bolivariana, *Modelo de Inventario de Emisiones MODEMED versión 2. Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles ETROME*, Medellín, 2008.
- [10] Departamento Nacional de Estadísticas DANE, Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020, 2012. Recuperado en Mayo de 2012 de [http://www.dane.gov.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=75&Itemid=72](http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=72)
- [11] Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín, “Total vehículos matriculados en la STTM”, 2012. Recuperado en Mayo de 2012 de [http://www.medellin.gov.co/transito/archivos/linea\\_base/historicos/parque\\_automotor\\_matriculado\\_sttm.pdf](http://www.medellin.gov.co/transito/archivos/linea_base/historicos/parque_automotor_matriculado_sttm.pdf).
- [12] H. Mayer, *Air pollution in cities*. Atmospheric Environment, vol. 33. 1999.
- [13] A. Machado, N. García, C. García y N. Ferrer. *Primer inventario de emisiones del transporte público en Maracaibo*, Parte I: vehículos de pasajeros de cinco puestos. 2004.
- [14] *Environmental Protection Agency*, Compilation of air pollutant emission factors, Mobile sources. Quinta edición. 2000.
- [15] Rudan, I., Tomaskovic, L., Boschi-Pinto, C., Campbell, H. 2004. Global estimate of the incidence of clinical pneumonia among children under five years of age. Bull. World Health Organ. 82:895-903.
- [16] DUQUE, E. Libia. Estadísticas sociales municipio de Pereira 2006. Alcaldía de Pereira, Secretaría de Planeación. 2007

## AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestros agradecimientos a las instituciones que facilitaron la información que hizo posible esta investigación: Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Secretaría de Salud de Risaralda, Secretaria de Salud y Seguridad Social de Pereira, Instituto Municipal de Tránsito y Transporte de Pereira, Hospital Universitario San Jorge. Igualmente agradecemos el apoyo técnico y financiero de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y el Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial (GAT) con el proyecto de investigación “Modelado de la dinámica de Oferta y Demanda de Recursos Naturales bajo criterios de Sostenibilidad”.