

ESTIMACIÓN DE FACTORES QUE INCIDEN SOBRE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL GENERADA POR FUENTES MÓVILES EN PEREIRA

Estimation of factors that affect on the environmental pollution generated by mobile sources in Pereira

RESUMEN

Se realizó la estimación de emisiones contaminantes por fuentes móviles para la ciudad de Pereira utilizando el software del modelo internacional de emisiones como herramienta de cálculo. Se obtuvo una segunda aproximación del ciclo de conducción de Pereira, con el fin de recolectar parámetros claves para el pre-procesamiento del software. Finalmente se determinó el inventario de emisiones previo donde se analizaron diferentes escenarios de comparación que permitieron reconocer los factores más influyentes en la descarga de contaminantes.

PALABRAS CLAVES: contaminación del aire, calidad de los combustibles, ciclo de conducción, metodologías de cálculo indirecto, inventario de emisiones.

ABSTRACT

This document describes the estimation of pollutant emissions by mobile sources for Pereira's city using the software of the international vehicular emission model as tool of calculation. There was obtained the second approximation of the driving cycle to compiler key parameters for the pre-processing of the software. Finally there was obtained a previous mobile source emissions inventory where we analyzed differents scenes to compare the most important factors that influence the pollution.

KEYWORDS: air pollution, driving cycle, mobile source emissions inventory, pollution

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental ha representando durante las últimas décadas una preocupación latente para los gobiernos, debido a que está afectando directamente el equilibrio de los ecosistemas y la salud pública. Las emisiones de sustancias tóxicas al aire representan un gran porcentaje del total de las emisiones y aumentan proporcionalmente de acuerdo a la cantidad de habitantes de un país y a su grado de desarrollo.

La presente investigación se enfocó en realizar un estimativo del aporte a la contaminación por parte de las fuentes móviles terrestres: vehículos de pasajeros, motocicletas, vehículos de servicio público y de carga, mediante metodologías de estimación indirecta haciendo uso del software del modelo internacional de emisiones IVE desarrollado por la EPA (Agencia de Protección de medio ambiente), teniendo en cuenta sus ventajas con respecto a otros modelos en términos de metodología, tiempo y presupuesto.

2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR FUENTES MÓVILES

La contaminación del aire se produce como consecuencia de la descarga de sustancias contaminantes por todo tipo de fuentes emisoras (móviles, estacionarias, dispersas y

ÁLVARO H. RESTREPO V.

Ingeniero Mecánico, M. Sc.

Profesor Asistente

Facultad de Ingeniería Mecánica

Universidad Tecnológica de Pereira

arestrep@utp.edu.co

SEBASTIÁN IZQUIERDO C.

Ingeniero Mecánico

sic@utp.edu.co

RAFAEL A. LÓPEZ G.

Ingeniero Mecánico

rafa@utp.edu.co

naturales). El efecto de las especies sobre las personas se manifiesta en enfermedades graves como el cáncer y malformaciones congénitas, daños al sistema inmunológico, problemas neurológicos, reproductivos, de desarrollo, respiratorios, entre otros.

Los efectos de las sustancias tóxicas en el medio se manifiestan en 3 grandes fenómenos: lluvia ácida, smog y efecto invernadero.

Formación de los contaminantes

Los vehículos contribuyen aproximadamente en un 80% de monóxido de Carbono, 40% de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos del total de las emisiones de una ciudad. Las emisiones en vehículos automotores contienen un gran número de contaminantes resultantes de diferentes procesos: productos secundarios del proceso de combustión (que son emitidos por el tubo de escape) y evaporación del combustible [1].

Clasificación los contaminantes

Los contaminantes más representativos que afectan la calidad del aire se dividen en: contaminantes criterio, contaminantes tóxicos y contaminantes de efecto invernadero como se muestra en la tabla 1.

CONTAMINANTES		
Criterio	Tóxicos	Efecto invernadero
Óxidos de nitrógeno (NOx)	Plomo (Pb)	Dióxido de carbono (CO ₂)
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Benceno (C ₆ H ₆)	Metano (CH ₄)
Monóxido de carbono (CO)	Amoniaco (NH ₃)	Óxido Nitroso (N ₂ O)
Material Particulado (PM)	1.3 Butadieno	
Óxidos de azufre (SOx)		

Tabla 1. Clasificación de las especies contaminantes

Características de los combustibles

En la tabla 2 se presentan las características de los combustibles que circulan en el país.

	Gasolina corriente	Gasolina Extra	Diesel	Diesel extra
Azufre [ppm]	1000	1000	4000	1000
Plomo [g/l]	0.013	0.013	x	x
Benceno [%]	1.5	1	x	x
Oxigenación [%]	2.5	2.5	x	x
Aromáticos [%]	35	28	35	35
Agua y sedimentos	x	x	0.05	0.05

Tabla 2. Composición de los combustibles

La calidad del combustible colombiano es muy baja lo que se refleja directamente en las emisiones contaminantes, ya que mientras que para todo el país el diesel cuenta con un contenido de azufre de 4000 ppm, en ciudades como Santiago de Chile el diesel cuenta con solo 50 ppm [2].

3. APLICACIÓN DEL MODELO IVE

Las metodologías de cálculo indirecto ayudan a generar inventarios de emisiones con un grado de precisión confiable y a un menor costo. El modelo IVE además de realizar un estimativo de las emisiones contaminantes de una región, permite generar diferentes escenarios con el fin de predecir posibles reducciones en las emisiones alterando los diferentes factores que inciden en la generación de los mismos.

Estructura y proceso de cálculo

El proceso para la estimación de emisiones del modelo consiste en multiplicar la tasa de emisión base por

diferentes factores de corrección asignados de acuerdo a las características de los vehículos, la meteorología y la calidad de los combustibles de cada ciudad. El proceso de cálculo interno que utiliza el modelo se muestra en la ecuación 1 y las variables asociadas se presentan en la tabla 3:

$$Q_{(t)} = B_{(t)} \times K_{(1)(t)} \times K_{(2)(t)} \times \dots \times K_{(n)(t)} \quad (1)$$

Variables locales	Calidad de los combustibles	Variables de Conducción
Temperatura	Gasolina	VSP
Humedad	Contenido de azufre	Aire acondicionado
Altura	Contenido de plomo	Condiciones de partida
Programas I/M	Contenido de benceno	
Ajuste	Oxigenación	
	Diesel	
	azufre	

Tabla 3. Descripción de variables

Metodología

La metodología desarrollada por el modelo IVE permite recopilar información asociada a la distribución tecnológica del parque automotor, patrones de conducción, niveles de actividad vehicular, condiciones ambientales, programas de inspección y mantenimiento entre otros. La campaña de medición se realizó en la ciudad desde el 20 de Febrero hasta el 10 de Mayo de 2007.

Base de datos del parque automotor La tabla 4 muestra el estimativo total de vehículos que circulan en el área metropolitana según la secretaria de tránsito y su clasificación respectiva.

Categoría	Total
VP	46188
MOTO	44301
BUS	1664
TAXI	2696
SITM	136
CAMIÓN	2821
TOTAL	97806

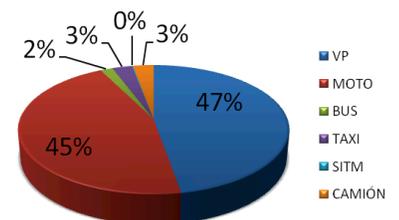


Tabla 4. Distribución vehicular del área metropolitana

Número representativo de encuestas se determinó teniendo en cuenta el porcentaje de participación de cada

categoría vehicular en la flota total, aplicando un modelo estadístico donde se analizaron parámetros cualitativos (tipo de combustible, sistema de aire acondicionado, mantenimiento, control de emisiones, tipo de transmisión, control aire combustible) y cuantitativos (kilometraje, cilindraje, modelo) [3]. El número total de encuestas se muestra en la tabla 5.

Categoría	% Representación	n
VP	47.22	185
Motos	45.30	177
Bus	1.70	7
Taxi	2.76	11
SITM	0.14	1
Camiones	2.88	12
Total	100	393

Tabla 5. Número representativo de encuestas

Cuantificación de variables asociadas a los patrones de conducción En el modelo IVE los patrones de conducción son representados por los siguientes parámetros:

- Potencia específica del vehículo (VSP)
- Demanda del motor (Engine Stress)

La potencia específica de un vehículo es un parámetro fundamental en la determinación de emisiones contaminantes, ya que se deriva de la velocidad instantánea y la aceleración. Con el VSP se garantiza realizar una predicción adecuada de las emisiones de CO₂, sin embargo se debe complementar con el parámetro demanda del motor (Engine Stress) con el objetivo de mejorar la predicción de emisiones de CO, HC, NO_x y NH₃. Para finalizar se debe realizar el cálculo del VSP y ES de manera independiente, sin embargo, en ciudades como Pereira las condiciones de tráfico conllevan a que los vehículos se trasladen a un régimen de flujo muy similar, por tanto se hace la suposición de que se tienen los mismos parámetros de conducción para todas las categorías vehiculares. El ciclo de conducción obtenido y utilizado se muestra en la figura 1

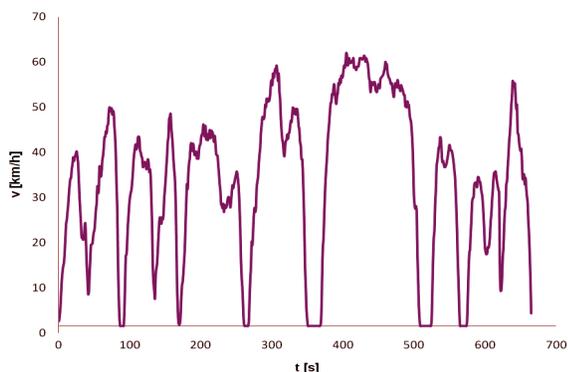


Figura 1. Ciclo de conducción representativo

Además de los parámetros de conducción tomados del ciclo de conducción representativo indicado anteriormente, el modelo IVE tiene presente en la etapa de preprocesamiento la distancia y cantidad de paradas, condiciones de partida, programas de inspección y mantenimiento I/M, uso de aire acondicionado, variables ambientales y las características de los combustibles.

4. INVENTARIO DE EMISIONES

Análisis de datos

Con base en el estudio realizado sobre la actividad vehicular y el porcentaje de ocupación de las vías durante el día se tienen en cuenta horas de bajo, medio y alto flujo vehicular. Por falta de presupuesto y ausencia de personal se realizó una medición por tipo de hora.

Para determinar emisiones totales por día, el modelo simplemente realiza la sumatoria de los contaminantes por hora y no realiza una extrapolación.

Para predecir el comportamiento de las emisiones a diferentes horas del día se suponen comportamientos similares para las horas donde no se realizaron medidas y se realizó una regresión de cuarto orden, dado que fue la mejor aproximación a los resultados obtenidos. En la figura 2 se muestra la curva de ajuste [4].

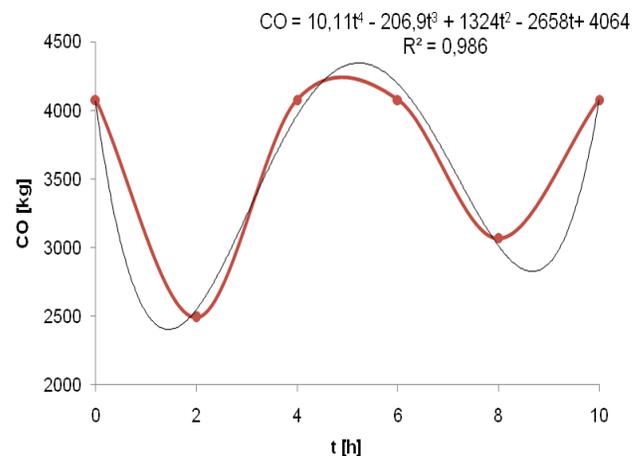


Figura 2. Comportamiento del CO durante el día

Predicción de emisiones totales por día Luego de obtener la mejor curva de ajuste, se calcula el área bajo la curva, con el fin de obtener las emisiones totales.

$$\int_0^{10} (10,11t^4 - 206,9t^3 + 1324t^2 - 2658t + 4064) dt$$

$$= \left(\frac{10,11t^5}{5} - \frac{206,9t^4}{4} + \frac{1324t^3}{3} - \frac{2658t^2}{2} + 4064t \right)_0^{10}$$

$$= 34073 \text{ kg/día}$$

La escala seleccionada con valores de 0 a 10 horas corresponden a la estimación realiza desde las ocho de la mañana a las seis de la tarde dado que en horas de la noche no se realizaron mediciones. Teniendo en cuenta el alto coeficiente de correlación R^2 obtenido, se concluye que la curva obtenida presenta una buena aproximación.

Se realizó el mismo procedimiento para cada contaminante y por categoría vehicular.

Resultados

El inventario desarrollado en esta investigación contiene información sobre el aporte de las diferentes categorías vehiculares al total de las emisiones. La tabla 6 resume los resultados obtenidos por categoría vehicular y la figura 3 muestra el porcentaje de participación de cada categoría al total de las emisiones.

	VP	MOTOS	CAMION	BUS	TAXI	SITM	TOTAL
CO	34073	7700	199.07	125.58	2052.33	16.15	44166.13
VOC	1858	2456.67	31.67	23.90	95.82	3.17	4469.23
NO _x	1139	239.01	215.14	130.05	46.30	17.87	1787.37
SO _x	17	1.71	8.89	5.56	0.53	0.76	34.45
PM	3.12	64.83	18.22	13.80	0.36	0.23	100.56
Plomo	2.57	0.87	0.28	0.18	0.05	0.03	3.98
B	0.95	5.29	0.18	0.14	0.09	0.00	6.65
F	5.37	128.03	2.33	1.86	0.84	0.05	138.48
CO ₂	46430	8956.67	9976.60	5439.33	2185.67	299.49	73287.76

Tabla 6. Emisiones totales de diferentes categorías vehiculares
 B= 1.3 Butadieno
 F=formaldehído
 Las unidades son [kg/día]

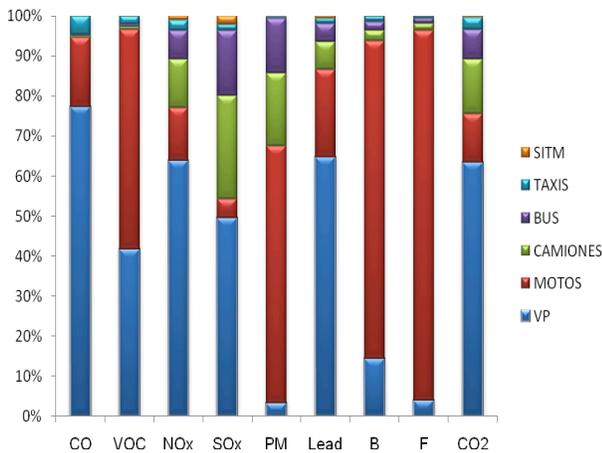


Figura 3. Aporte de las categorías vehiculares al total de las emisiones contaminantes

Análisis de resultados Los resultados arrojados por el modelo guardan coherencia de acuerdo al porcentaje de vehículos particulares y las motos en el total de la flota de la ciudad. En el caso de los VP los resultados

obtenidos son razonables en la medida que más del 90% funcionan con motores a gasolina, provocando mayores emisiones de CO, NO_x y SO_x por procesos de combustión incompleta y emisiones evaporativas de combustible.

Aproximadamente el 50% de las motos de la ciudad aún cuenta con motores de 2 tiempos y muchas no cuentan con control de emisiones. El problema con este tipo de motores radica en el consumo de lubricante, dado que la lubricación se consigue incluyendo una parte de aceite en el combustible. Este aceite penetra con la mezcla en la cámara de combustión y se quema generando contaminación extra.

Los buses no representan un foco notable comparado con otras ciudades, esto se debe a la modernidad de la flota de buses de la ciudad, además de que casi un 100% opera con combustible diesel lo que se refleja en su aporte mínimo a las emisiones de CO.

El sistema integrado de transporte masivo se muestra como una alternativa de transporte muy limpia, dado que representa un porcentaje muy bajo en el total de las emisiones. Sin embargo, debido a la falta de planeación de entidades encargadas al momento de realizar las obras, la ciudad presenta embotellamientos notables en las vías donde se implementó generando problemas de tráfico, velocidades bajas y muchas detenciones que se manifiestan en las emisiones de otras categorías vehiculares.

Inventario de emisiones bajo diferentes escenarios

• **Escenario mejorando la calidad de los combustibles** Se disminuye el contenido de azufre a 50 ppm para la gasolina y para el diesel. Los resultados se muestran en la figura 4.

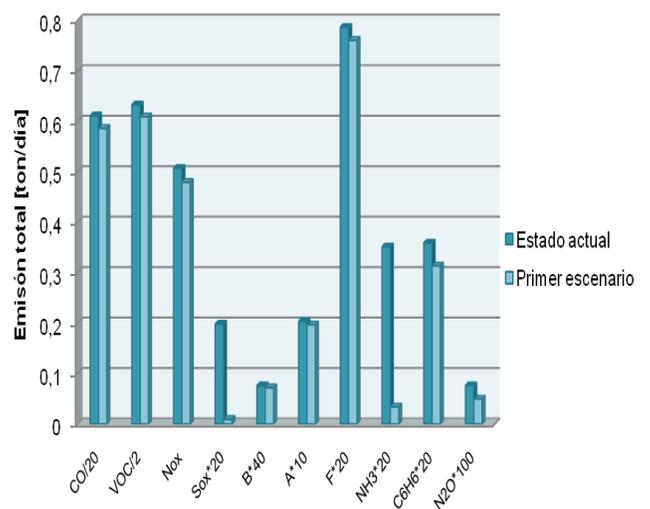


Figura 4. Mejoras en la calidad del diesel y la gasolina

La mejora en la calidad de los combustibles conlleva a que las nuevas tecnologías desarrolladas para contrarrestar las emisiones de contaminantes puedan ser utilizadas, debido a que el alto contenido de azufre en los combustibles hace imposible el correcto funcionamiento de los mismos.

- **Escenario eliminando el contenido de plomo de la gasolina** en la figura 5 se muestran los resultados.

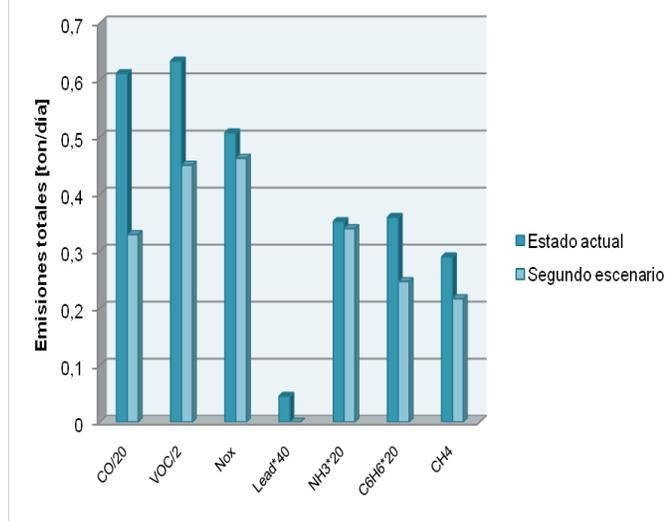


Figura 5. Escenario eliminando el contenido de plomo

Los resultados arrojados muestran una disminución aproximada del 46% en las emisiones de CO, también se presentaron reducciones significativas en el caso de los compuestos orgánicos volátiles VOC del orden del 30% e hidrocarburos como el benceno C₆H₆, metano CH₄.

- **Escenario múltiple** El tercer escenario se evalúa combinando los dos escenarios previos y adicionalmente disminuyendo el contenido de benceno y mejorando los programas de inspección y mantenimiento. Los resultados se muestran en la figura 6.

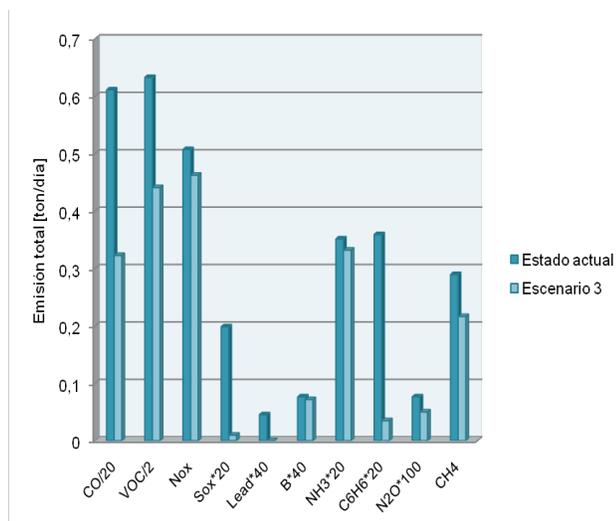


Figura 6. Escenario múltiple

Implementando los requerimientos propuestos se obtiene reducción significativa de algunas especies contaminantes, 47% de CO, 30% de VOC, 95% de SO_x, 90% de benceno, 35% de N₂O y 25% de metano.

- **Escenario requiriendo control de emisiones para las motos y caso ideal de todas las motos con motores a cuatro tiempos** Los resultados se muestran en la figura 7.

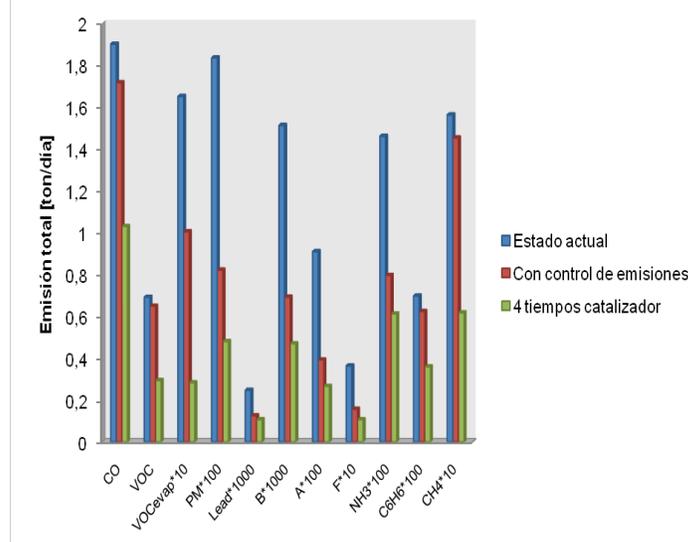


Figura 7. Escenario de evaluación para las motos

Los 2 escenarios muestran mejoras significativas con respecto al estado actual de la flota de motos, siendo los resultados más representativos en términos de emisiones de: metano, VOC_{evap}, 1,3 Butadieno, acetaldehído, formaldehído y PM con disminuciones hasta del 50%.

5. PROPUESTAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE

Calidad de los combustibles

Debido a los elevados contenidos de azufre en la gasolina y el diesel se generan contaminantes peligrosos como el PM₁₀, dióxido de azufre (SO₂), partículas de sulfato entre otros. Una alternativa a largo plazo consiste en el uso de combustibles más limpios, tales como energía eléctrica, gas natural, gas propano y el alcohol, los cuales están libres de elementos tóxicos como azufre, plomo y benceno además de producir los niveles más bajos de elementos como el butadieno [5].

Programas de inspección y mantenimiento

Otro factor importante que se debe tener en cuenta con el fin de reducir la descarga de contaminantes consiste en mejorar programas de inspección y mantenimiento que ayuden a evitar fallas en los sistemas de control de emisiones y en el desempeño en general del automóvil. Cabe resaltar que las instituciones encargadas de realizar

estas pruebas deberán contar con los equipos necesarios para realizar oportuna y adecuadamente las revisiones respectivas.

Flota vehicular

Por las condiciones viales de la ciudad las motos representan el medio de transporte de mayor acogida. Teniendo en cuenta los resultados críticos arrojados por esta categoría vehicular se deben implementar estrictos controles encaminados a fomentar la salida de circulación de las motos con motores a dos tiempos y mejorar los sistemas de control a las que cuentan con motores a cuatro tiempos; esta normativa debe tener en cuenta la gran cantidad de personas que utilizan este medio de transporte como alternativa laboral.

Utilizar sistemas integrado de transporte masivo SITM eficientes, seguros y que abarquen toda el área metropolitana.

Renovación del parque automotor de la ciudad donde se utilicen tecnologías de control y reducción de emisiones eficaces.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estimó el inventario de emisiones preliminar de la ciudad haciendo uso del software del modelo internacional de emisiones. Se realizó una extrapolación con el fin de determinar la emisión total de contaminantes diarias para la ciudad utilizando una curva de ajuste de cuarto orden con un coeficiente de correlación mayor que 0,9. Esto generó información acerca de la descarga de contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernal.

Se estimaron los aportes de cada categoría vehicular siendo los resultados más críticos para los vehículos particulares que aportan más del 80% de las emisiones de CO, el 60% de CO₂, 65% de NO_x, 40% de SO_x y en las motos que aportan alrededor del 65% de PM, más del 80% de 1,3 butadieno, acetaldehído, formaldehído y 55% de las emisiones de COV.

Se determinó que la mejor estrategia para reducir las emisiones en la ciudad consiste en mejorar la calidad de los combustibles, gasolina y diesel. Sin embargo, otras alternativas menos efectivas pero de igual importancia consisten en mejorar los programas de inspección y mantenimiento, fomentar el uso de tecnologías encaminadas a los controles de emisiones y el uso frecuente de sistemas de transporte masivo más eficientes. Los organismos de control deben estar enfocados a las categorías de los buses, camiones y motos responsables de la emisión de material particulado, el contaminante más importante en términos de salud pública.

La reducción de la contaminación en una ciudad no es una tarea fácil ni corta y requiere una gran inversión que a largo plazo va a repercutir en una mejor calidad del aire que se respira, por esto es necesario que las entidades encargadas de manejar esta problemática evalúen la viabilidad de todo tipo de propuestas y adopten las que consideren más convenientes.

Para futuras investigaciones se recomienda:

- Investigar la variación de la flota, actividad y calidad de los combustibles en sectores aledaños a la ciudad con el fin de realizar una extrapolación para toda el área metropolitana.
- Utilizar métodos de estimación directa que permitan corroborar los resultados obtenidos
- Realizar estudios que complementen los resultados obtenidos que permitan evaluar la viabilidad de algunas de las medidas propuestas en la sección 5, desde el punto de vista económico.

7. AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría Académica y al Centro de Investigaciones y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira. A los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica involucrados en el proyecto y al CIMA – ITESM por la asesoría recibida

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] OSSES Mauricio; DURSBECK Frank y CORVALÁN, Roberto. Modelo de emisión de contaminantes atmosféricos producidos por el transporte urbano: el caso de Santiago de Chile. Chile. Pág 10.
- [2] GIRALDO, Liliana; BEHRENTZ, Eduardo. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. Bogotá. Enero de 2005. 16 p.
- [3] SCHEAFFER, Richard L. Et All. Elementos de muestreo. México. Editorial Iberoamérica S.A. Agosto de 2000. Pág. 45-86-99.
- [4] LEVIN, Richard; RUBIN, David. Estadística para administradores. 6 ed. México, 1996. 1083 p.
- [5] BLUMBERG, Katherine; WALSH, Michael y PERA, Charlotte. Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares. 2003. 3 p.