

# Caracterización del material particulado en dos vías de transporte público colectivo y masivo en Bogotá

Mónica Espinosa Valderrama, Néstor Y. Rojas, Rigoberto Gómez

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Departamento de Ingeniería Química,  
Departamento de Química  
Universidad de Los Andes, Bogotá

## Resumen

Entre septiembre y octubre de 2005, se recolectaron muestras de material particulado con un impactador de cascada en tres sitios de la ciudad de Bogotá, conformados por un punto de concentración base de baja contaminación, un punto al lado de una vía donde opera el sistema de transporte público colectivo tradicional (buses y busetas), y otro punto ubicado al lado de una vía donde funciona el sistema de transporte masivo Transmilenio. Mediante análisis gravimétrico se determinó la concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Se analizó el contenido de metales (Cd, Pb, Fe y Mn) por espectroscopía de absorción atómica, y mediante análisis termogravimétrico se determinó el contenido de carbono orgánico y elemental en  $PM_{2.5}$ . Las mayores concentraciones de  $PM_{10}$  y de  $PM_{2.5}$  se presentaron en la vía de transporte tradicional. Las mayores concentraciones en  $PM_{10}$  de Fe (1175,0 ng.  $m^{-3}$ ) y de Pb (61,4 ng.  $m^{-3}$ ) se dieron en la vía donde opera Transmilenio, y la mayor concentración de Cd (0,41 ng.  $m^{-3}$ ) se presentó en la vía de transporte público colectivo tradicional.

Palabras clave: Material particulado, transporte colectivo, transporte masivo.

## 1 Introducción

Bogotá cuenta con una red de calidad de aire conformada por catorce estaciones ubicadas alrededor de la ciudad, las cuales dan información general acerca del comportamiento de los principales contaminantes en las diferentes zonas de Bogotá, y de igual manera proveen información acerca de las condiciones meteorológicas de la ciudad. Según los resultados de la red de calidad de aire de Bogotá, el material particulado (MP) constituye el contaminante más crítico en la ciudad, siendo las fuentes móviles, y en especial los buses y camiones con motor diesel, las que más aportan a su concentración. La ciudad de Bogotá cuenta actualmente con dos clases de transporte público colectivo, el sistema tradicional, conformado por buses y busetas y el sistema de transporte masivo Transmilenio. El cambio del sistema tradicional al sistema Transmilenio supone una mejora en la calidad del aire en algunas vías de la ciudad; sin

embargo, este efecto aún no ha sido evaluado. Además, debido a los fenómenos de transporte y de transformación que sufren los contaminantes en la atmósfera una vez han sido emitidos, las concentraciones de los contaminantes reportadas en las estaciones de la red de calidad de aire de la ciudad no son necesariamente las mismas concentraciones a las que se encuentra expuesta la población que permanece y transita en las diferentes zonas.

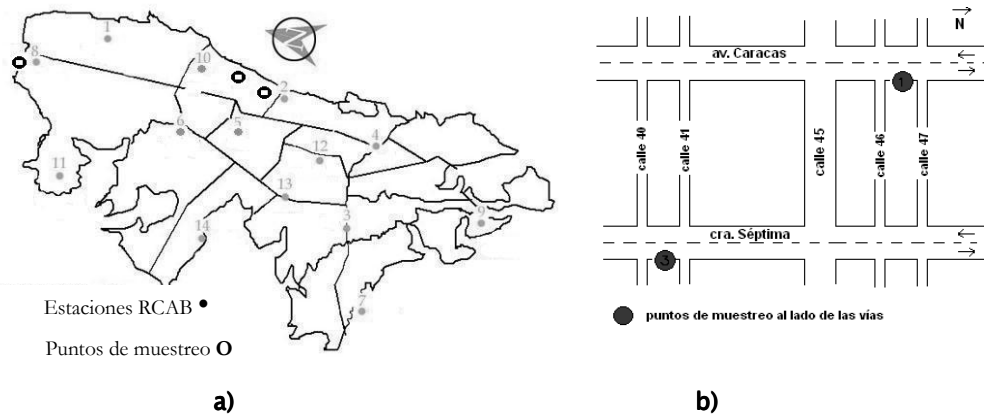
Este trabajo constituye un estudio preliminar acerca de la concentración y algunas características químicas (contenido Fe, Pb, Cd, Mn, carbono orgánico ( $C_{org}$ ) y carbono elemental ( $C_{elem}$ ) de material particulado recolectado al lado de dos vías, en las cuales opera uno de los sistemas de transporte público colectivo y masivo, respectivamente.

## 2 Metodología de muestreo

Entre septiembre y octubre de 2005 se recolectaron muestras de MP con un impactador de cascada construido en la Universidad de Los Andes [5]. La configuración del impactador permitió recolectar MP en cuatro etapas de impactación, con 0,4  $\mu\text{m}$ , 2,5  $\mu\text{m}$ , 9  $\mu\text{m}$  y 19  $\mu\text{m}$  como diámetro medio ( $d_{50}$ ) asociado a cada etapa, respectivamente. Como medio de recolección, se utilizaron filtros de fibra de vidrio de 55 mm de diámetro. El impactador se instaló en balcones con alturas entre 2,5 m y 2,7 m y entre 2,5 m y 3 m de distancia al lado de la vía, medidos desde el borde de la calzada vehicular.

Las muestras de MP se recolectaron en tres sitios de la ciudad (ver Figura 1):

- Sitio de muestreo 1. Sitio de concentración de MP base, un lugar de la ciudad donde la concentración de MP es baja, y no está altamente influenciado por fuentes fijas o móviles cercanas: calle 200, aproximadamente a 2 km de la autopista norte.
- Sitio de muestreo 2. Ubicado al lado de una vía donde opera el sistema de transporte masivo Transmilenio: avenida Caracas con calle 46.
- Sitio de muestreo 3. Ubicado al lado de una vía donde opera el sistema de transporte colectivo público tradicional (buses y busetas): carrera Séptima con calle 40.



**Figura 1:** Mapa de Bogotá adaptado del informe diario de la RCAB (a). Fuente: [7]. Ubicación de los puntos de recolección de las muestras (b).

Con el fin de que las condiciones meteorológicas fueran lo más semejantes posible, los sitios de muestreo al lado de las vías se escogieron en una misma región de la ciudad. Además, se buscó que los dos puntos tuvieran características semejantes en cuanto a volumen vehicular y configuración de la calle. Los puntos de muestreo al lado de las vías se seleccionaron en el centro de la ciudad, esta zona es de uso residencial, comercial e institucional y se caracteriza por el alto movimiento de vehículos y peatones. Los muestreos se realizaron de manera sucesiva, el primero entre el 13 y el 20 de septiembre de 2005, el segundo entre el 25 de septiembre y el 2 de octubre de 2005; y el tercero entre el 5 y el 11 de octubre del mismo año.

Se obtuvieron datos de flujo vehicular de la zona de estudio, de una base de datos de la Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (STT) del año 2004 [12]. Los resultados de los aforos (vehículos/h) para las calles de interés de este trabajo se muestran en las Tablas 1 y 2. Tanto el volumen de autos como el de buses es mayor en la carrera Séptima respecto al de la avenida Caracas, en un 47% y en un 86% respectivamente.

**Tabla 1.** Aforos vehiculares de las vías de estudio

Ubicación	Av. Caracas Sistema Transmilenio	Cra. Séptima Sistema tradicional buses - busetas
Total vehículos/ h	3269	4969
Vehículos	2697	3975
por categoría		
Autos	507	944
Buses	65	50
Camiones		

Fuente: [12]

**Tabla 2.** Composición vehicular de las vías de estudio

Ubicación		Av. Caracas Sistema Transmilenio	Cra. Séptima Sistema tradicional buses - busetas
Composición vehicular (%)	Autos	82,5	80
	Buses	15,5	19
	Camiones	2	1

Fuente: [12]

Respecto al tipo de combustible que utilizan los vehículos en Bogotá, aproximadamente el 85% del total de buses (buses, buses ejecutivos, buses superejecutivos) usan diesel como combustible, así como el 66% de los colectivos y el 82,6% de las busetas [9]. En cuanto al transporte público individual, el 98% de los vehículos utiliza gasolina como combustible, el 1,92% diesel, 0,02% gashol y el 0,02% utiliza gas. Por su parte, casi la totalidad de los buses del sistema Transmilenio utiliza diesel extra como combustible, y sólo dos buses de prueba utilizan gas natural.

### 3 Metodología de análisis de las muestras

La masa de MP recolectada en cada una de las etapas del impactador se determinó mediante análisis gravimétrico, con la diferencia en peso de los filtros antes y después de haber tomado la muestra. Antes de pesar los filtros, se acondicionaron dejándolos mínimo durante 24 horas bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas. La temperatura entre 25°C y 30°C, y la humedad relativa menor al 50% (Método IO 3.1 de la U. S. EPA). Las muestras fueron almacenadas en cajas de Petri, en nevera a 4 °C, durante el tiempo transcurrido entre la toma de las muestras y el análisis químico.

Con el fin de analizar los porcentajes de  $C_{org}$  y de  $C_{elem}$  se realizaron pruebas de análisis termogravimétrico (TGA). Los ensayos se realizaron en un equipo STA (*Simultaneous thermal analyzer*) 409 PC Luxx® de los laboratorios del Departamento de Química de la Universidad de Los Andes. Sólo fue posible realizar análisis de TGA a las muestras de la última etapa de impactación ( $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$ ), debido a que las muestras de las otras etapas eran de menor concentración y ensayos preliminares con muestras que no se encontraban muy concentradas no presentaron resultados satisfactorios.

En el caso de los metales, sólo se analizaron las muestras de las dos últimas etapas de impactación, de diámetros medio de 0,4  $\mu\text{m}$  y 2,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Los análisis de Cd, Pb y Mn se realizaron mediante espectroscopia de absorción atómica (EAA) por horno de grafito; y el de Fe se realizó mediante EAA por llama, debido a que este metal presentó en todos los casos una concentración mucho mayor a la de los otros metales y por lo tanto la sensibilidad de este método era suficiente. La digestión de las muestras se realizó según el Compendio de Métodos para la Determinación de Compuestos Inorgánicos en Aire IO-3.2 y apéndice G de la Parte 50 de la U. S. EPA - Método de

Referencia para la Determinación de Plomo en Material Particulado Suspendido Recolectado en Aire. Para la determinación de los metales por EAA en horno de grafito, se utilizó un equipo Perkin Elmer, Simultaneous Multielement AA Spectrometer, SIMAA 6000.

Los dos análisis químicos utilizados, TGA y EAA, tienen como desventaja el ser métodos destructivos, lo cual limitó el número de análisis a realizar a cada muestra.

#### 4 Resultados y análisis de resultados

La mayor concentración de PM<sub>2,5</sub> se obtuvo en la carrera Séptima (46,39 µg. m<sup>-3</sup>), este valor fue casi tres veces mayor a la que se presentó en la avenida Caracas (16,53 µg. m<sup>-3</sup>) y más de cinco veces mayor a la concentración base (7,18 µg. m<sup>-3</sup>). Las concentraciones de PM<sub>2,5</sub> de la avenida Caracas y de la carrera Séptima sobrepasaron el límite para un promedio anual recomendado por la EPA, igual a 15 µg. m<sup>-3</sup>, y en ninguno de los dos casos se sobrepasó el límite promedio para 24 horas de la EPA igual a 65 µg. m<sup>-3</sup> (ver Tabla 3 y Figura 2).

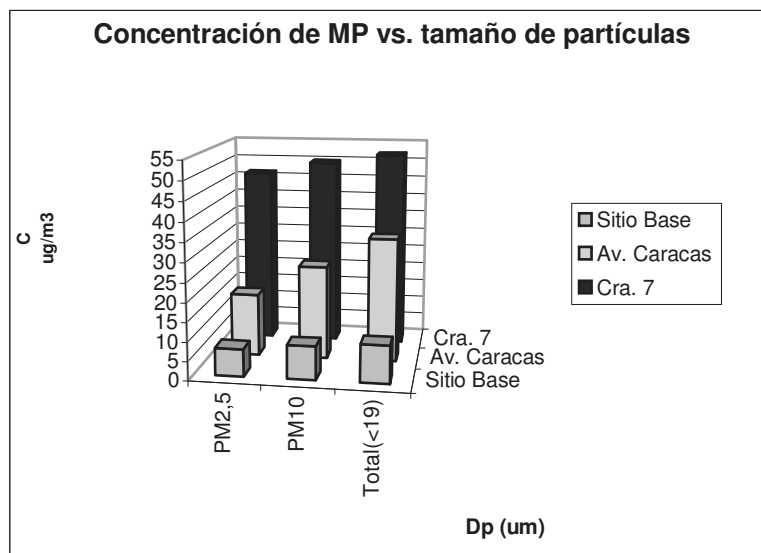


Figura 2: Concentración de PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>.

Tabla 3. Concentración de PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> en los sitios de muestreo

Concentración en el aire por tamaño de partícula (µg. m <sup>-3</sup> )		
Sitio de muestreo	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
Sitio de concentración base	7,18	8,80
Cra. Séptima (Sistema tradicional)	46,39	49,65
Av. Caracas (Sistema Transmilenio)	16,53	24,64

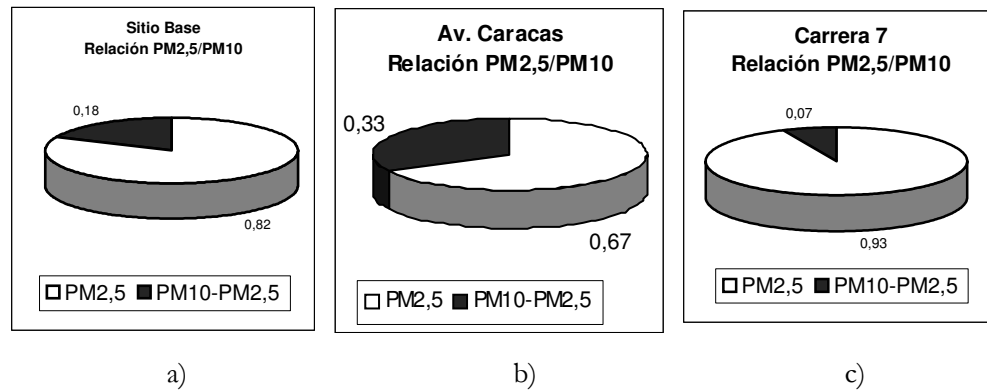
En cuanto a  $PM_{10}$ , la mayor concentración se presentó en la carrera Séptima ( $49,65 \mu\text{g. m}^{-3}$ ), seguido por la avenida Caracas ( $24,64 \mu\text{g. m}^{-3}$ ). El valor de la concentración en la carrera Séptima fue cercano al límite establecido por la EPA como promedio anual, igual a  $50 \mu\text{g. m}^{-3}$ ; del mismo modo, fue menor al límite para promedio anual según la Resolución 391 de 2001 del Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), igual a  $65 \mu\text{g. m}^{-3}$ . La concentración de  $PM_{10}$  en la Séptima fue el doble de la concentración en la avenida Caracas y más de cinco veces mayor a la concentración base que fue de  $8,8 \mu\text{g. m}^{-3}$ .

En la comparación de las concentraciones de MP entre los tres sitios de muestreo se debe tener en cuenta las condiciones meteorológicas. Ninguno de los puntos de muestreo se encuentra dentro de un cañón urbano, por lo que las rosas de vientos de estaciones cercanas de la RCAB estarían dando una buena idea del comportamiento del viento en los sitios de interés de este trabajo. Según la velocidad y la dirección predominante del viento, ambos sitios de muestreo podrían estar recibiendo un aporte de las emisiones producidas en la zona industrial de la ciudad, pero las características del viento a su vez contribuyen a la dispersión de los contaminantes de los sitios de muestreo, una vez cambia la condición de estabilidad atmosférica, típica de Bogotá en las primeras horas de la mañana. El viento no fue un factor que aportara diferencias significativas en las concentraciones de MP entre los sitios de estudio. En cambio la precipitación, que constituye uno de los principales mecanismos de remoción de contaminantes en la atmósfera, fue mucho mayor durante el muestreo en la carrera Séptima, donde la precipitación total registrada durante los días del muestreo fue de 40 mm, respecto a la que se presentó en la avenida Caracas, en la cual la precipitación registrada en la semana de muestreo fue de 8 mm. Los datos de precipitación se obtuvieron de la base de datos de la RCAB de la estación ubicada en la Universidad Santo Tomás, que es la más cercana a los puntos de muestreo con información meteorológica disponible.

Otro de los factores que afecta el nivel de las emisiones es la calidad del combustible. La concentración de azufre en el diesel se encuentra directamente relacionada con las emisiones de MP, a concentraciones más altas, las emisiones de MP también son mayores. Los buses del sistema Transmilenio están diseñados para operar con diesel que cumpla con el estándar Euro II, según el cual el contenido de azufre no debería ser mayor a 200 ppm. Además según la Resolución 0447 de 2003 del Ministerio del Medio Ambiente, a partir del año 2005 el contenido de azufre del diesel debería ser máximo de 500 ppm. Sin embargo el diesel que se utiliza en Bogotá contiene 1.200 ppm de azufre (ECOPETROL).

En cuanto al aporte en masa del  $PM_{2,5}$  al  $PM_{10}$  (ver Figura 3) en el sitio base el aporte fue alto en comparación con los valores que se obtuvieron en los otros dos sitios. Dado que el sitio de concentración base no se encuentra fuertemente influenciado por fuentes que aporten MP fino, el valor de la relación de  $PM_{2,5}/PM_{10}$  tan alto podría ser consecuencia de las partículas formadas por las emisiones gaseosas de los árboles en

presencia de alta humedad relativa. En el MP de la Séptima se observó el mayor aporte de masa de PM<sub>2,5</sub> a la masa total de PM<sub>10</sub>. En la carrera Séptima el MP fino, relacionado con las emisiones vehiculares, constituye el 93% de la masa de PM<sub>10</sub>, mientras que en la avenida Caracas el MP fino constituye el 67% de la masa de PM<sub>10</sub>. No sólo la concentración de PM<sub>10</sub> es más alta en la carrera Séptima además, la mayor parte de la masa de PM<sub>10</sub> se encuentra en el rango de partículas finas, las cuales se relacionan con los mayores daños sobre la salud.



**Figura 3:** a) PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> Sitio base. b) PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> Avenida Caracas. c) PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub> Carrera Séptima

Se analizó la concentración de cadmio (Cd), manganeso (Mn), plomo (Pb) y hierro (Fe) del MP recolectado en las etapas de impactación de d<sub>50</sub> = 2,5 µm y de d<sub>50</sub> = 0,4 µm, de los tres sitios en los que se realizaron muestreos (ver Tabla 4). Los metales se escogieron teniendo en cuenta los resultados de trabajos similares encontrados en la literatura científica, según los cuales, el Cd, Mn, Pb y Fe son los metales que comúnmente presentan las mayores concentraciones en el aire al lado de las vías; y teniendo en cuenta que el Pb y el Cd son los metales que presentan las mayores concentraciones en la ciudad según los informes de la RCAB.

**Tabla 4.** Concentración de metales en MP recolectado en las etapas de d<sub>50</sub> = 2,5 µm y d<sub>50</sub> = 0,4 µm.

Elemento	Concentración en el aire (ng. m <sup>-3</sup> )							
	Cd		Mn		Pb		Fe	
D <sub>50</sub> (µm)	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4	2,5	0,4
Sitio base	0,055	0,037	2,017	7,092	0,496	9,076	33,069	105,844
Cra. 7	0,271	0,142	0,198	0,132	5,440	21,692	16,534	131,668
Av. Caracas	0,061	0,051	2,191	5,280	5,903	55,497	214,947	960,061

El aporte total de metales en los tres sitios de estudio fue mayor en la fracción de MP recolectado en la etapa de  $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$ , es común que en el aire de las vías la mayor fuente de MP sean las emisiones vehiculares, las cuales en su mayor parte son MP fino y ultrafino.

En los tres sitios de muestreo, la concentración de Cd fue mayor en la fracción de  $d_{50} = 2,5 \mu\text{m}$ ; en cambio se encontró mayor concentración de Pb y de Fe en la fracción de MP de  $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$ . Por su parte, el Mn tuvo mayor concentración en el MP de  $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$  en el sitio de concentración base y en la avenida Caracas, pero mayor concentración en la fracción de  $d_{50} = 2,5 \mu\text{m}$  en la carrera Séptima.

Los efectos que tiene el MP sobre la salud se encuentran relacionados con el tamaño de las partículas, a las partículas de menor tamaño se atribuyen efectos más negativos sobre la salud, debido a que alcanzan lugares más profundos en el tracto respiratorio, y por lo tanto el tiempo de residencia dentro de él es mucho mayor. Las partículas de la etapa de recolección de  $d_{50} = 0,4 \mu\text{m}$ , se encuentran dentro de los tamaños de partículas que pueden llegar hasta los alvéolos y las de la etapa de  $d_{50} = 2,5 \mu\text{m}$ , se encuentran dentro del rango de las partículas que tienen la capacidad de llegar hasta los bronquios [11]. Para que las partículas se puedan asociar con efectos negativos sobre la salud se debe tener en cuenta además de la composición, la concentración en que se hallan en el ambiente. Aunque en este trabajo se obtuvieron las concentraciones de Cd, Pb, Mn y Fe en la fracción de  $\text{PM}_{10}$ , y los valores de concentración establecidos en la legislación tienen en cuenta el MP total y no sólo la fracción de  $\text{PM}_{10}$ , se compararon los valores con los establecidos por las normas. En ninguno de los casos se sobrepasó el límite de concentración para promedio anual según la Resolución 391 de 2001 del DAMA. Tampoco se sobrepasó ninguno de los valores establecidos por organizaciones como la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) y la *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) para un ambiente laboral (ver Tablas 5 y 6), que aplicaría para el caso de las personas que trabajan en las calles como celadores, vendedores ambulantes, policías de tránsito, etc.

**Tabla 5.** Concentración de metales en  $\text{PM}_{10}$ .

Concentración (ng metal. $\text{m}^{-3}$ aire)				
Elemento	Cd	Mn	Pb	Fe
Sitio base	0,09	9,11	9,58	138,91
Cra. 7	0,41	0,33	27,13	148,2
Av. Caracas	0,11	7,47	61,4	1175,01



**Tabla 6.** Valores límite de cadmio, plomo y manganeso en el aire según diferentes organizaciones.

Metal	Valor límite ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Tiempo promedio de muestreo	Organización
Cadmio	0,005	Turno laboral 8 horas	OSHA
Compuestos cadmio	0,002	Turno laboral 8 horas	ACGIH
Plomo	50	Turno laboral 8 horas	OSHA
	50	Turno laboral 8 horas	ACGIH
Manganeso	5	Turno laboral 8 horas	OSHA
	0,2	Turno laboral 8 horas	ACGIH

OSHA: *Occupational Safety and Health Administration*

ACGIH: *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*

La concentración de metales no tuvo el mismo comportamiento que la concentración total de  $\text{PM}_{10}$  y el  $\text{PM}_{2,5}$ . Aunque las mayores concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  y de  $\text{PM}_{2,5}$  se presentaron en la carrera Séptima, la mayor concentración total de metales se presentó en la avenida Caracas.

Los tamaños de partícula en los que se ubican los metales dependen de la fuente de emisión. Las partículas más pequeñas provienen de la combustión principalmente y las de mayor tamaño en su mayoría son consecuencia del polvo resuspendido. En este caso se cree que la principal diferencia entre las emisiones de las dos vías se debe al sistema de transporte público colectivo que opera en ellas, tanto por volumen vehicular, tipo de combustible, aceite, aditivos, como por el tipo de suelo (cemento y asfalto) presente en cada uno de los casos. En la carrera Séptima el sistema de transporte público colectivo está conformado por buses y busetas tradicionales que en su mayoría utilizan diesel y en la avenida Caracas está conformado por los buses de Transmilenio, de los cuales la mayor parte usa diesel extra como combustible.

En este sentido, los resultados sugieren que los buses del sistema tradicional emiten mayores concentraciones de Cd lo cual podría ser consecuencia del tipo de combustible y del mayor volumen vehicular, pues en la carrera Séptima circulan 86% más buses que en la avenida Caracas, pero también podría ser consecuencia del mayor volumen de vehículos livianos en la carrera Séptima. Por otra parte, según los resultados de este trabajo, pareciera que el sistema Transmilenio emite mucho más Pb que el que emiten los buses tradicionales en la carrera Séptima. No se cree que esto sea consecuencia de los automóviles, pues el volumen de automóviles es mayor en la Séptima que en la Caracas. En cuanto al Mn, se obtuvo la mayor concentración en el sitio base, por lo que podría indicar que la mayor parte del Mn en el aire al lado de las vías se debe al polvo resuspendido y no a las emisiones vehiculares. Por último, respecto al Fe, las emisiones del sistema Trasmilenio parecen ser mayores respecto a las de los buses y busetas del sistema de transporte colectivo tradicional.

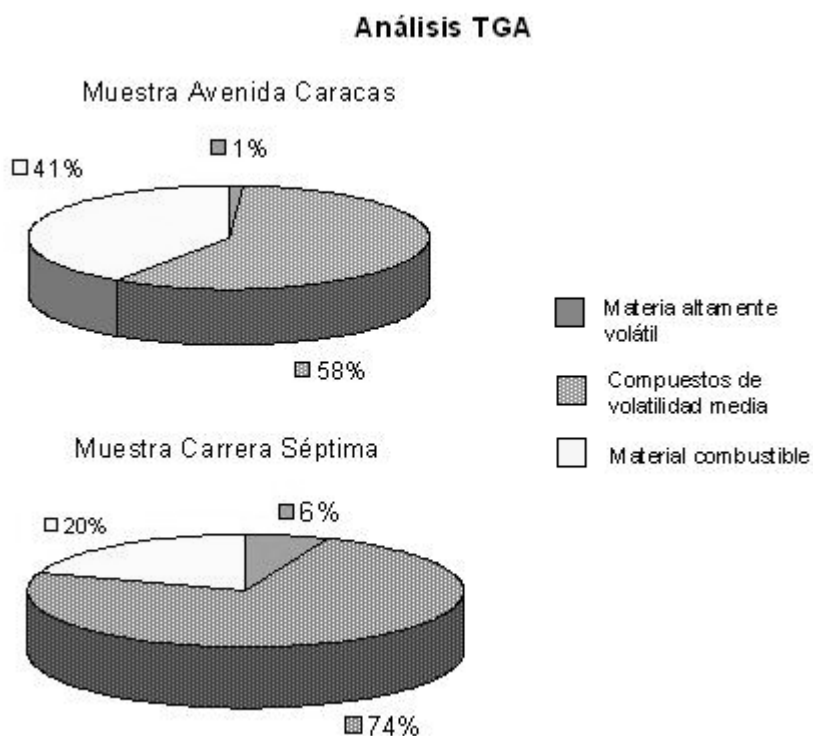
El metal que tuvo la mayor concentración en los tres sitios fue el Fe, llegando a conformar entre el 1% y el 5% de la masa total de  $\text{PM}_{2,5}$ . Después del Fe, el mayor

aporte a la masa total de  $PM_{2,5}$  lo tuvo el Pb, en la muestra de la avenida Caracas, el cual conformó 0,3% de la masa de MP fino.

Con el fin de conocer el grado de relación entre los metales, se halló el coeficiente de correlación Pearson para las diferentes combinaciones posibles. En el caso de Cd vs. Mn para un nivel de significancia de 0,1; se puede decir que existe una relación lineal significativa, el valor de  $R^2$  en este caso fue de 0,98. En el resto de las combinaciones, F fue menor al valor crítico para los niveles de significancia evaluados, por lo que se concluyó que en estos casos no existe una relación lineal entre los metales.

La relación lineal entre el Cd y el Mn, es inversamente proporcional. Este resultado sugiere que la emisión de uno u otro podría ser consecuencia del sistema de transporte público colectivo predominante en cada una de las vías, razón por la cual cuando la concentración de uno aumenta la del otro disminuye.

Finalmente, en la Figura 4 y en la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de TGA. Los porcentajes se hallaron tomando como el 100% la masa del material perdido en el análisis de TGA; por lo tanto, en esas fracciones no se encuentran incluidas las cenizas, de las cuales hace parte el carbono inorgánico.



**Figura 4:** Contenido de material altamente volátil, volatilidad media y material combustible de las muestras de MP recolectadas en la avenida Caracas y en la carrera Séptima.

**Tabla 7.** Relación entre el contenido de carbono orgánico y elemental del MP recolectado en las vías.

Fracción Ci / Ctotal		
Ci	C orgánico	C elemental
Av. Caracas	0,59	0,41
Cra. Séptima	0,80	0,20

El  $C_{elem}$  constituye la mayor parte del MP emitido por los motores [6]. Según el estudio de Wu *et al.* [13], aunque el  $C_{elem}$  se encuentra en proporciones muy altas tanto en el  $PM_{10}$  como en el  $PM_{2,5}$  al lado de las vías, el  $C_{org}$  constituye el principal componente del MP tanto al lado de las vías como en lugares alejados del tráfico vehicular.

El aporte del  $C_{elem}$  al  $C_{total}$  ( $C_{total} = C_{org} + C_{elem}$ ), fue mayor en la avenida Caracas respecto a la carrera Séptima. El carbono elemental se ha utilizado como indicador de las emisiones diesel, por lo que se podría decir que las emisiones de los vehículos diesel aportan una mayor cantidad de masa al total de MP de diámetro menor a  $0,4 \mu m$  en la Caracas respecto a la Séptima, el aporte de los vehículos diesel al total de carros es mayor en la avenida Caracas que en la carrera Séptima.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

Con el fin de corroborar los resultados de este estudio y de aclarar todas las preguntas que quedan abiertas, sería de gran utilidad continuar con el estudio de los diferentes factores que aportan material particulado al aire que se respira al lado de las vías. Este tipo de información es relevante en la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales, ya que la mala calidad del aire es un problema que afecta a todos los habitantes de la ciudad de Bogotá.

En ninguna de las dos vías las concentraciones de metales registradas en este trabajo sobrepasaron los límites establecidos por la legislación o los valores recomendados por las diferentes organizaciones de la salud.

Aunque la mayor concentración de  $PM_{2,5}$  se presentó en la carrera Séptima, la mayor concentración total de metales en  $PM_{2,5}$  se presentó en la avenida Caracas.

Las mayores concentraciones de  $PM_{2,5}$  ( $46,39 \mu g \cdot m^{-3}$ ) y de  $PM_{10}$  ( $49,65 \mu g \cdot m^{-3}$ ) se presentaron en la carrera Séptima.

En este estudio sólo fue posible realizar análisis químico a las muestras recolectadas en las etapas de  $d_{50} = 2,5 \mu m$  y de  $d_{50} = 0,4 \mu m$ , debido a que la cantidad de muestra recolectada en las otras etapas de impactación no fue suficiente para los métodos de

análisis disponibles. Los métodos de análisis químico utilizados en este trabajo, EAA y TGA, tienen como desventaja el ser métodos destructivos; se recomienda utilizar otros métodos de recolección de MP que permitan obtener una mayor cantidad de muestra.

## Referencias

- [1] Agencia Protección Ambiental de EE.UU. *Compendio de Métodos para la Determinación de Compuestos Inorgánicos en Aire. Método IO3.1. Selección, Preparación y Extracción del Material del Filtro*. Centro de Investigación en Información Ambiental. Junio 1999.
- [2] Agencia Protección Ambiental de EE.UU. *Compendio de Métodos para la Determinación de Compuestos Inorgánicos en Aire. Método IO3.2. Determinación de Metales en Muestras de Material Particulado del Ambiente Mediante Espectroscopia de Absorción Atómica*. Centro de Investigación en Información Ambiental. Junio 1999.
- [3] Agencia Protección Ambiental de EE.UU. CFR 40 Parte 50. *Estándares de Calidad de Aire Ambientales Nacionales Para Material Particulado, 1997*. Consultado en página web de la EPA: [http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr\\_notices/pmnaaqs.pdf](http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr_notices/pmnaaqs.pdf)
- [3] Agencia Protección Ambiental de EE.UU. Apéndice G - Parte 50 *Método de Referencia para la Determinación de Plomo en Material Particulado Suspendido Recolectado del Aire*.
- [4] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Consultado en página web: [www.acgih.org](http://www.acgih.org). Consultado en septiembre de 2005.
- [5] Beltrán, D. *Diseño y Construcción de un Equipo para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado en el Aire por el Método de Impactación*. Proyecto de grado Ingeniería Química. Universidad de Los Andes, 2003.
- [6] Burtscher, H. (2004). *Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review*. Journal of Aerosol Science, 36, 896- 932.
- [7] Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Consultado en página web: [www.dama.gov.co](http://www.dama.gov.co). En octubre de 2005.
- [8] ECOPETROL. *Información de los combustibles líquidos, características del diesel corriente y extra.*: Consultado en: [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co) en octubre de 2005.
- [9] Ibáñez, P. (2005). *Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C. y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo*. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [10] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Consultado en página web: [www.osha.gov](http://www.osha.gov), en septiembre de 2005.

- 
- [11] Samara, C.& Voutsas, D. (2005). *Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment*. Journal Chemosphere, 59, 1197-1206.
- [12] Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (STT). *Base de datos de aforos vehiculares de Bogotá del año 2004*.
- [13] Wu, Y., Hao, J., Fu, L., Hu, J., Wang, Z. & Tang, U. (2003). *Chemical characteristics of airborne matter near major roads and at background in Macao, China*. Journal The Science of the total environment, 317, 159-172.