

Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia

Heavy metal determination and source emission identification in an industrial location of Bogotá-Colombia

*Jorge Eduardo Pachón**, *Hugo Sarmiento Vela*

Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
Carrera 2ª # 10 - 70 Bloque A Piso 6º, Bogotá, Colombia.

(Recibido el 23 de febrero de 2007. Aceptado el 8 de noviembre de 2007)

Resumen

En el presente estudio se llevó a cabo la caracterización química del material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}) recolectado en la Localidad de Puente Aranda de Bogotá. Durante el período de estudio (junio de 2005 a junio de 2006) se recolectaron 75 muestras de PM_{10} en diferentes condiciones climáticas en tres puntos de monitoreo, dos en la zona industrial y el tercero en una zona remota. Se incluyen en el estudio los días del paro de transportes que tuvo lugar en la ciudad en el 2006. Se determinó la presencia de cadmio, cobre, cromo, plata, hierro, plomo, manganeso, cinc y níquel. Las concentraciones promedio diarias de PM_{10} en Puente Aranda se encontraron entre 65 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el norte de la ciudad variaban entre 20 y 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los principales metales encontrados en la zona industrial fueron Fe y Pb, con concentraciones hasta de 4.000 ng/m^3 . El grupo de metales Cu, Cr, Zn, Ni, Mn presentaron un rango medio de concentración (50 a 700 ng/m^3 en Puente Aranda, <100 ng/m^3 en el norte de la ciudad). Los metales con las menores concentraciones en la atmósfera fueron Cd y Ag. A partir del análisis de material particulado y metales pesados se realizó una aproximación al aporte de las fuentes de emisión.

----- *Palabras clave:* contaminación del aire, material particulado, metales pesados, fuentes de emisión, paro de transportes.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 353 53 60 ext: 2514, fax: + 57 + 1 + 286 83 91, correo electrónico: jpachon@lasalle.edu.co (J. Pachón).

Abstract

During the present study, chemical characterization of particulate matter less than 10 micrometers (PM_{10}) in an industrial zone of Bogotá was performed. A total of 75 samples were collected during one year (June 2005 – July 2006) under wet and dry conditions in three different places, two within the industrial zone and the other one in a remote area. Samples obtained during a public transportation strike, which took place in Bogota during two days in 2006, were also included in the study. Heavy metal concentrations (Cd, Cu, Cr, Ag, Fe, Pb, Mn, Zn, Ni) in PM_{10} fraction were conducted using Atomic Absorption Spectrometry. PM_{10} (24-hour average) concentration was found between 65 and 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the industrial zone, whereas in the northern point was as low as 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10} local standard is 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Pb and Fe were the metals with the highest concentrations in air ($\sim 4,000 \text{ ng}/\text{m}^3$ in the industrial zone, $< 400 \text{ ng}/\text{m}^3$ in the north point). Cu, Cr, Zn, Ni and Mn were assessed in a lower level (50-700 ng/m^3 in the industrial zone, $< 100 \text{ ng}/\text{m}^3$ in the north point) and finally, Cd and Ag were the elements with the lowest concentration. Source emissions were assessed analyzing PM_{10} and heavy metal concentrations in air.

----- *Keywords:* air pollution, PM_{10} , heavy metals, emission sources, transportation strike

Introducción

Como resultado de políticas inconclusas y faltas de un marco general de acción, Bogotá ha venido experimentando en los últimos años un incremento gradual de la contaminación del aire, situación que la ubica como la tercera urbe más contaminada en América Latina, luego de ciudad de México y Santiago de Chile, regiones donde las condiciones topográficas y meteorológicas son extremadamente adversas, perjudicando la dispersión de contaminantes en la atmósfera [1]. Es de particular importancia en Bogotá, la contaminación por partículas generadas en procesos de arrastre por el viento y combustión por fuentes fijas y móviles. Para el año 2006, la concentración promedio anual de material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}) fue de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [2] siendo la norma local $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Igualmente la norma diaria de PM_{10} ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue excedida en numerosas ocasiones durante el año en las localidades ubicadas al occidente de la ciudad, como lo es Puente Aranda. El conocimiento de la composición química de las partículas que se encuentran en el aire es importante desde el punto de vista epidemiológico y técnico, ya que permite por un lado determinar el potencial efecto en la salud humana por la presencia de sustancias tóxicas y cancerígenas adheridas a este diminuto material [3], y por otro, valorar el aporte de las fuentes de emisión a la contaminación del aire ambiente.

Cerca de un 75 a 90% de metales como Cu, Cd, Ni, Zn y Pb se encuentran en la fracción de PM_{10} . Las principales fuentes de metales incluyen la industria, la minería, la fundición de metales y las fuentes móviles [4]. Algunos metales han sido identificados con diversas fuentes: el Al, Si, Ti y Ca son típicamente materiales del suelo y la corteza terrestre; el Br, Pb, Cu y Fe están relacionados con emisiones vehiculares, en tanto que el Mn, Zn y K son principalmente originados en procesos industriales [5]. Elementos mayoritarios como el hierro y el zinc pueden provenir de la resuspensión del polvo al paso de vehículos y de su combustión en el caso de los vehículos diesel [6].

En Bogotá, la caracterización química del material particulado es un tema que se ha abordado en los últimos años. En 1987 [7] se determinaron altos niveles de plomo adherido a Partículas Suspendidas Totales (PST) en el aire de la ciudad, por su utilización como aditivo en la gasolina. Posteriormente, en 1998 [8] muestras de PST y PM_{10} colectadas en la localidad industrial de Puente Aranda, presentaron niveles remanentes de calcio, cadmio, cobre, hierro, magnesio y plomo. Para el cadmio y el plomo se hallaron concentraciones cercanas a los valores máximos permisibles recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), aún cuando en Bogotá el plomo fue retirado de la gasolina desde el año 1991. Simultáneamente se llevó a cabo un estudio de medición de cadmio en las partículas del aire [9], encontrando concentraciones superiores al límite mínimo de detección del equipo. Luego de algunas mejoras en las técnicas de análisis se detectaron otros metales como arsénico, cromo, mercurio, níquel, plata y manganeso [10]. En el año 2006 [11] muestras de PST colectadas en el Campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, detectan la presencia de Cu, Mn, Cd, Ni, Pb y Cr, asociadas a fuentes vehiculares cercanas al punto de monitoreo. Estos estudios precedentes dan cuenta de la diversidad de contaminantes que se podrían encontrar en la atmósfera de la ciudad.

El presente trabajo incluye los resultados del proyecto “Estimación del riesgo en la salud humana por la caracterización de Aerosoles en la ciudad de Bogotá”, liderado por la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Salle, donde se realizó la caracterización física, química y biológica de material particulado colectado en la Localidad de Puente Aranda. Por la extensión que esta investigación representó, sólo se presentan en este artículo los resultados concernientes a partículas y metales pesados en el aire.

Experimentación

Se escogió la Localidad de Puente Aranda en Bogotá como zona de trabajo por las características particulares que alberga, como son la presencia

de un importante y diverso número de industrias y de un alto flujo vehicular que constantemente emiten contaminantes a la atmósfera. Puente Aranda es además un área de confluencia de vientos de la ciudad, que implica el arrastre de contaminantes desde otros puntos, agravando la situación. La inadecuada planificación de la ciudad a lo largo de los años, ha permitido que en esta zona se combinen industrias y comunidad, generando un mayor riesgo en la salud humana por la exposición a contaminantes, en especial en la población más vulnerable. A lo largo de los úl-

timos años, las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) han ocupado los primeros lugares entre las causantes de enfermedad en la población [12].

La localidad abarca una extensión de 1.723 hectáreas, que corresponden al 2% del área total de la ciudad (Figura 1) y de estas aproximadamente 700 Has corresponden a uso industrial y 800 Has a uso residencial. Puente Aranda reúne gran parte del sector industrial y comercial por lo que se constituye en un eje de la producción no sólo local, sino también nacional.

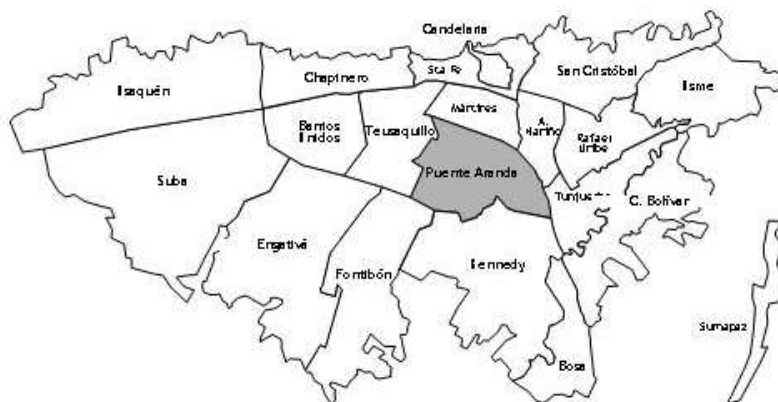


Figura 1 Ubicación de la Localidad de Puente Aranda en Bogotá

Para la colección de muestras de material particulado se seleccionaron dos zonas de la localidad que reunieran condiciones propias para el monitoreo atmosférico e igualmente condiciones de seguridad para los equipos, suministro de servicios y acceso conveniente a los puntos de muestreo. Estos puntos se denominarán INVIMA y MERCED, en virtud de los nombres de las instituciones donde fue posible realizar el monitoreo.

INVIMA es un punto que por ubicarse en la zona más occidental de la Localidad tiene influencia tanto de fuentes industriales como de fuentes móviles, se encuentran avenidas importantes como la Calle 13, la Avenida Boyacá y la Avenida 68 entre otras. La MERCED es un punto cercano a la Calle 13 por donde circula el sistema de transporte masivo de la ciudad Transmilenio, y a otras

importantes avenidas como Las Américas, la Avenida de los Comuneros, la Calle 3a, la Carrera 50, la Avenida 68 y la carrera 30.

Durante el período de estudio, junio de 2005 a junio de 2006, se desarrollaron tres campañas de monitoreo, tal como se describe en la Tabla 1.

Como complemento a los puntos de monitoreo en la Localidad de Puente Aranda, se realizó una medición de material particulado en una zona que sirviera como blanco de referencia, en el Colegio de La Salle sede Norte en la Localidad de Usaquén, lugar ubicado lejos de cualquier presencia industrial en los alrededores y a por lo menos a 200 metros de la Calle 170 (principal corredor vial en la cercanía).

Tabla 1 Campañas de monitoreo durante el proyecto

Campaña	INVIMA	MERGED
Primera	Junio 09 a 28 de 2005	Julio 09 a 17 de 2005
Segunda	Octubre 23 a Nov. 04 de 2005	Nov. 13 a 25 de 2005
Tercera	Marzo 26 a Abril 10 de 2006	Abril 17 a Mayo 04 de 2006
Zona blanco	Colegio la Salle Mayo 29 y 30 de 2006	

Las muestras de PM_{10} fueron tomadas con equipos de referencia de alto volumen (Hi-Vol por sus siglas en inglés) usando filtros de cuarzo QMA, previamente acondicionados durante 36 horas a 25 °C y 50% de humedad relativa, procedimiento que se siguió por igual una vez tomada la muestra. La calibración de los Hi-Vol se hizo de acuerdo al método establecido [13] con discos de orificios, obteniendo en todos los casos caudales de aire en condiciones reales (15°C y 560 mmHg) dentro del intervalo de velocidad de flujo normal 1,0 y 1,8 m³/min recomendado [13].

Para la extracción y análisis de los elementos metálicos se ajustó el método EPA IO-3.2 [14], que establece una digestión del 10% del área del filtro (2,5 x 20 cm), usando una mezcla ácida caliente (5,55% HCl: 16,75% NH_4OH) y posterior enfriamiento y filtración, antes de su lectura por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). De cada filtro se cortaron dos tiras, con el fin de

realizar cada uno de los análisis por duplicado en cada uno de los nueve metales seleccionados: plata, níquel, manganeso, cadmio, hierro, cromo, cobre, cinc y plomo. Las extracciones se realizaron por triplicado a cada una de las dos tiras para garantizar que el metal se diluyera en la solución ácida y no quedara remanente en el filtro.

Todo el material de laboratorio se lavó con jabón, agua caliente y posteriormente se purgó con una solución de ácido sulfúrico 0,25N y dicromato de potasio 0,25N diluidos en un litro de agua desionizada para eliminar residuos de metales. La tabla 2 presenta las interferencias en la lectura de metales pesados que se pueden presentar al utilizar la técnica de EAA y su forma de eliminación. A cada una de las muestras de laboratorio se aplicó este procedimiento.

En la tabla 3 se presentan las condiciones finales bajo las cuales se leyeron los metales en el laboratorio.

Tabla 2 Eliminación de interferencias en la lectura de metales

Metal	Interferencia	Eliminación
Ag	Aluminio y Minerales Ácidos	Adición de CH_3COOH al 5%
Cr	Presencia hierro y níquel	Adición de NH_4Cl al 2%
Fe	Presencia de cobalto, cobre y níquel	Adición de $CaCl_2$ al 0.2%
Mn	Silicatos	Adición de $CaCl_2$ al 0.2%
Ni	Hierro y cromo	Cambio de aire por óxido nitroso en el EAA

Tabla 3 Condiciones de funcionamiento del EAA

<i>Metal</i>	<i>Límite de detección (mg/l)</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Gases combustibles</i>	<i>Color de la llama</i>	<i>Concentración de chequeo (mg/l)</i>
Cadmio (Cd)	0,0008	228,8	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	1,5
Cinc (Zn)	0,00150	213,9	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	1,0
Cobre (Cu)	0,00150	324,8	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	4,0
Cromo (Cr)	0,00300	357,9	Aire-C ₂ H ₂	reductora (amarilla)	4,0
Hierro (Fe)	0,00500	248,3	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	6,0
Manganeso (Mn)	0,00150	279,5	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	2,5
Níquel (Ni)	0,00600	232,0	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	7,0
Plata (Ag)	0,00150	328,1	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	2,5
Plomo (Pb)	0,01500	283,3	Aire-C ₂ H ₂	oxidante (azul)	20,0

La construcción de las curvas de calibración en la lectura de cada uno de los metales, se inició con el uso de una solución patrón de concentración conocida para elaborar los patrones secundarios (dentro del rango de absorbancia del equipo), tal como se observa en la tabla 4.

Para determinar la proporción de cada metal que podría perderse en las etapas de extracción de los filtros y posterior lectura en el EAA, se realizó el cálculo del porcentaje de recuperación, basado en el principio de conservación de la masa. El procedimiento consistió en adicionar la solución patrón a cada una de las tiras de un filtro blanco, realizar el procedimiento de extracción señalado anteriormente y determinar de esta forma el porcentaje de recuperación para cada metal, asumiendo un comportamiento lineal. El resumen de los resultados se presenta en la Tabla 5.

Tabla 4 Concentración de patrones para la curva de calibración en el (EAA)

<i>Metal</i>	<i>Concentración de Patrones (mg/L)</i>				
	1	2	3	4	5
Ag	0,001	0,05	0,1	0,5	1
Cd	0,010	0,10	0,5	1,0	2
Cr	0,010	0,10	1,0	3,0	5
Cu	0,10	1,00	3,0	4	5
Fe	0,05	0,10	1,0	3	6
Mn	0,01	0,10	0,5	1	2
Ni	0,01	0,05	0,5	1	2
Pb	0,01	0,50	5,0	10	20
Zn	0,01	0,05	0,1	0,5	1

Tabla 5 Determinación de porcentajes de recuperación

<i>Metal</i>	<i>Masa adicionada (mg)</i>	<i>Masa recuperada (mg)</i>	<i>Recuperación (%)</i>
Cr	0,010	0,009	90
Mn	0,004	0,003	75
Zn	0,002	0,026	130
Ni	0,004	0,004	100
Cu	0,020	0,020	100
Fe	0,012	0,011	92
Pb	0,040	0,040	100
Ag	0,002	0,002	100
Cd	0,004	0,004	100

El manganeso presentó una recuperación del 75% atribuible a interferencias por silicatos. Para el Zn se obtuvieron resultados por encima del 100%, dado que este elemento hace parte de la constitución de los filtros de cuarzo.

Luego de realizar los procedimientos descritos anteriormente, se determinaron las concentraciones de metales para las tres campañas de monitoreo usando EAA. Estas concentraciones se llevan a concentraciones en el aire ambiente (ng/m^3) teniendo en cuenta el volumen de la alícuota, la relación entre el área del filtro y el área de la tira, el factor de dilución (en caso de que exista) y el volumen de aire colectado en el equipo de altos

volúmenes, tal como lo establece la técnica estándar [13]. Previamente se descuenta la concentración del filtro usado como blanco de referencia.

Resultados

Material particulado

La figura 2 presenta las concentraciones de PM_{10} en las estaciones INVIMA y MERCED durante las tres campañas de monitoreo. Generalmente los descensos de material particulado en las gráficas corresponde a fines de semana, en tanto que las mayores concentraciones se presentan de martes a jueves.

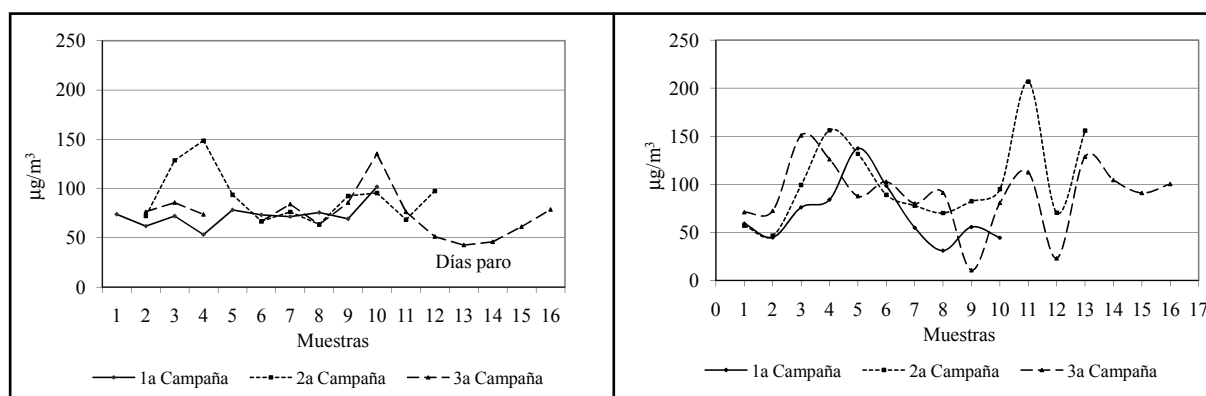


Figura 2 Concentración de PM_{10} en las estaciones INVIMA (izq) y MERCED (der)

En primera instancia, se puede observar que la estación MERCED tiene en promedio mayores valores de concentración de PM_{10} que la estación INVIMA para las tres campañas. En la estación INVIMA, la primera campaña presentó menores valores de concentración de PM_{10} a pesar de llevarse a cabo en un mes extremadamente seco (Índice de precipitación IP 30%)*. La segunda campaña presentó valores más altos, atribuibles a las condiciones secas durante los días de la campaña (IP 60%). Los valores de PM_{10} de la tercera campaña, con excepción del día décimo de monitoreo, son menores a las otras dos, lo cual se atribuye a las altas precipitaciones del mes (IP 115%) y al paro de transporte que tuvo lugar en la ciudad. El día 11 (sábado 29 de abril de 2006), las concentraciones de PM_{10} descienden y se mantienen así hasta el día 14 de monitoreo, día en que inició el paro de transportes, durante el cual la flota de transporte público, con excepción de Transmilenio, no circuló por la ciudad. El día 15 de monitoreo (miércoles 03 de mayo) se presentó un incremento del PM_{10} , pues a todos los vehículos particulares se les permitió circular por la ciudad por el levantamiento de la restricción del pico y placa.

Al igual que en la estación INVIMA, en la estación MERCED se presentan descensos en los valores de PM_{10} , asociados a fines de semana e incrementos entre semana. La segunda campaña presentó mayores valores de concentración de PM_{10} que la primera y la tercera. Al revisar la información meteorológica se encuentra que la segunda campaña fue la más seca (IP 44%), al contrario de la primera (IP 76%) y la tercera (IP 115%) mucho más lluviosas.

Para la estación remota del Colegio La Salle, se obtuvo una concentración de PM_{10} de $20,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el primer día (lunes festivo 29 de mayo de 2006) y de $30,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el segundo. Estos valores son radicalmente menores que los encontrados en Puente Aranda, por la menor presencia de fuentes de emisión tanto fijas como móviles.

Metales pesados en el aire

Los metales pesados de interés para el estudio (Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) fueron analizados en el material particulado atmosférico menor a 10 micrómetros (PM_{10}). La figura 3 presenta los resultados consolidados durante las tres campañas de monitoreo en las dos estaciones de la Localidad de Puente Aranda.

Primera campaña

En la estación INVIMA se observa (figura 3) que el metal con mayor proporción es el cinc (promedio $4.317,9 \pm 2.688,2 \text{ ng}/\text{m}^3$), dado que se trabajó con filtros de fibra de vidrio, los cuales contienen un gran porcentaje de este elemento [14]. El plomo y el hierro también presentan altas concentraciones con promedios de $1.444,9 \pm 2.688,3 \text{ ng}/\text{m}^3$ y de $2.125,8 \pm 471,1 \text{ ng}/\text{m}^3$ respectivamente. Como se observa el promedio para el caso del plomo presenta una gran variación en las concentraciones diarias. El cromo y el cobre se presentan en menor medida, con concentraciones promedio de $249,8 \pm 159,5 \text{ ng}/\text{m}^3$ y $163,7 \pm 76 \text{ ng}/\text{m}^3$.

Para la estación MERCED nuevamente se presenta una alta concentración de plomo, con un valor promedio de $3.926,12 \pm 4.411,92 \text{ ng}/\text{m}^3$ y una alta variedad de los datos. Durante tres días de monitoreo se presentaron picos regulares en la concentración de este metal, lo que podría significar su proveniencia de operaciones industriales, con las cuales se suele relacionar este metal [4]. El hierro presenta valores en su mayoría por encima de los $2.000 \text{ ng}/\text{m}^3$, con un promedio de $3.960,2 \pm 2.604,9 \text{ ng}/\text{m}^3$. Al utilizar filtros de cuarzo la concentración de cinc disminuye notablemente a $729,8 \pm 1534,2 \text{ ng}/\text{m}^3$. En la estación MERCED los menores valores de metales se presentaron en el cromo y el cobre con promedios de $713,35 \pm 360,3 \text{ ng}/\text{m}^3$ y $247,9 \pm 65,5 \text{ ng}/\text{m}^3$ respectivamente. Estos valores son, sin embargo, mayores que los presentados en la estación INVIMA.

* Índice de precipitación de acuerdo a la interpretación del DAMA: 0-30% lluvias muy por debajo de lo normal, 31-60% lluvias moderadamente por debajo de lo normal, 61-90% lluvias ligeramente por debajo de lo normal, 91-110% lluvias normales para el mes, 111-140% lluvias ligeramente por encima de lo normal.

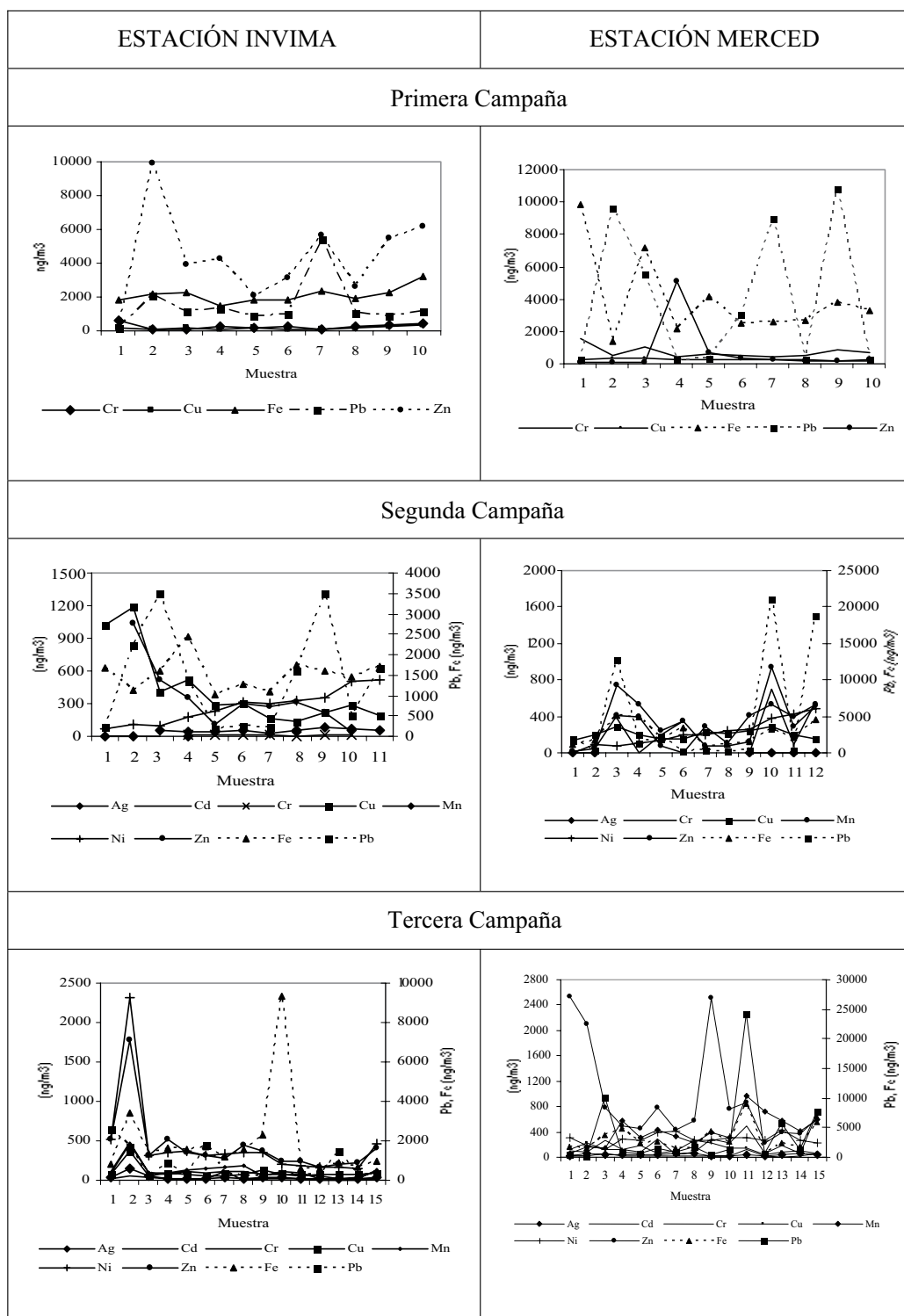


Figura 3 Consolidado de metales pesados durante las tres campañas (para la segunda y tercera campañas, las concentraciones de Fe y Pb se dividieron por 10. Para la tercera campaña en Merced la concentración de Zn se dividió por 10)

Segunda campaña

Para la segunda campaña en la estación INVIMA se leyeron un mayor número de metales (figura 3). Nuevamente se observa una mayor prevalencia del plomo y el hierro sobre los demás metales, con valores promedio de $1.385,7 \pm 1.259,3 \text{ ng/m}^3$ y $1.519,9 \pm 406,5 \text{ ng/m}^3$ respectivamente. El cobre presenta un promedio de $428,17 \pm 354,5 \text{ ng/m}^3$ con valores arriba de 1.000 ng/m^3 los primeros dos días de monitoreo. El cinc y el níquel presentaron valores similares con promedios de $349,7 \pm 292,8 \text{ ng/m}^3$ y $271,9 \pm 155,9 \text{ ng/m}^3$. El cobre presentó un valor máximo de $1.036,3 \text{ ng/m}^3$ el segundo día de monitoreo. El resto de metales presentan valores más bajos de concentración: Mn ($49,61 \pm 17,35 \text{ ng/m}^3$), Cr ($13,96 \pm 6,67 \text{ ng/m}^3$), Cd ($1,83 \pm 0,84 \text{ ng/m}^3$), Ag ($1,04 \pm 0,22 \text{ ng/m}^3$).

Para la estación MERCED el promedio para plomo es de $4.993,5 \pm 7.805,7 \text{ ng/m}^3$ por encima del reportado en INVIMA. Esta concentración es significativamente más alta que la encontrada en otros centros industriales alrededor del mundo [4]. Similarmente, la concentración promedio de hierro $2.643,3 \pm 1.554,4 \text{ ng/m}^3$ es superior. A diferencia de la estación INVIMA, en MERCED el manganeso y el cromo presentaron mayores valores de concentración, con promedios de $327,2 \pm 300,0 \text{ ng/m}^3$ y $254,2 \pm 256,9 \text{ ng/m}^3$ respectivamente. El cinc, níquel y cobre presentaron valores promedio de $291,9 \pm 196 \text{ ng/m}^3$ (Zn), $216,0 \pm 148,72 \text{ ng/m}^3$ (Ni) y $204,0 \pm 52,26 \text{ ng/m}^3$ (Cu). La menor concentración en MERCED estuvo en el metal plata con un promedio de $3,19 \pm 2,43 \text{ ng/m}^3$.

Tercera campaña

Para la tercera campaña en el INVIMA las concentraciones promedio de hierro y de plomo fueron de $1.895,1 \pm 2.187,8 \text{ ng/m}^3$ y $746,01 \pm 763,5 \text{ ng/m}^3$ respectivamente (figura 3). El níquel y el cinc presentaron un comportamiento similar, con valores promedio de $436,44 \pm 530,23 \text{ ng/m}^3$ y $422,97 \pm 389,81 \text{ ng/m}^3$. En un menor nivel de concentración se encuentran el manganeso, cromo y cobre con valores promedio de $122,15 \pm 108,7 \text{ ng/m}^3$, $110,43 \pm 108,20 \text{ ng/m}^3$ y $95,3 \pm 79,04 \text{ ng/m}^3$

respectivamente. Para estos metales los valores fueron homogéneos, con excepción del primer día de monitoreo donde también se presentaron algunos valores fuera de lo común. Los metales de menor concentración fueron plata y cadmio con promedios de $38,93 \pm 34,32 \text{ ng/m}^3$ y $24,63 \pm 28,77 \text{ ng/m}^3$ respectivamente.

Para la estación MERCED se observan concentraciones de plomo y hierro promedio de $3.879,6 \pm 6.416,8 \text{ ng/m}^3$ y $3.150,5 \pm 2.164,5 \text{ ng/m}^3$ respectivamente. El cinc presentó altas concentraciones los dos primeros días de monitoreo, con valores por encima de los 2.000 ng/m^3 y con un promedio para la campaña de $926,62 \pm 779,77 \text{ ng/m}^3$. El manganeso y el níquel presentaron valores promedio de $413,21 \pm 237,44 \text{ ng/m}^3$ y $286,27 \pm 80,15 \text{ ng/m}^3$, con concentraciones homogéneas. El cromo y el cobre también presentaron valores homogéneos con concentraciones promedio de $204,72 \pm 183,20 \text{ ng/m}^3$ y $135,5 \pm 64,22 \text{ ng/m}^3$, respectivamente. Al igual que en el INVIMA, los metales de menor concentración fueron plata y cadmio con promedios de $43,21 \pm 16,05 \text{ ng/m}^3$ y $31,82 \pm 31,29 \text{ ng/m}^3$ respectivamente.

Concentraciones en un área remota de la ciudad

La figura 4 presenta los resultados de los metales pesados obtenidos en el material particulado del Colegio La Salle Norte, escogido como zona blanco de monitoreo. Se observa que ninguno de los metales encontrados supera los 400 ng/m^3 de concentración en el aire ambiente, en contraste con las concentraciones reportadas anteriormente en INVIMA y MERCED.

Al igual que las campañas realizadas en la zona industrial de Puente Aranda, el metal de mayor concentración fue el hierro con un valor de $368,3 \pm 41,16 \text{ ng/m}^3$, inferior al reportado en INVIMA o MERCED, generalmente por encima de los 1.200 ng/m^3 . Su mayor proporción respecto a los demás metales se explica por su origen geológico, siendo parte del polvo resuspendido en el suelo por el viento y el transporte [6]. El plo-

mo, que se presenta en el Colegio con un valor promedio de $211,25 \pm 12,69 \text{ ng/m}^3$, es igualmente inferior a los valores determinados en la zona industrial, y al valor de 430 ng/m^3 en PST existente en la ciudad cuando aún se adicionaba plomo en la gasolina [7], pero es similar a los valores reportados para inmediaciones del Campus de la Universidad Nacional de $99,63 \pm 108,29 \text{ ng/m}^3$ [11].

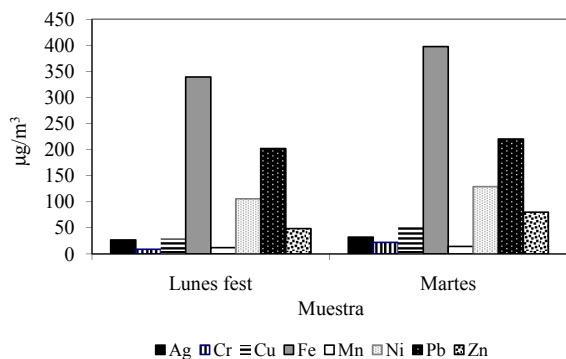


Figura 4 Concentración de metales pesados en el Colegio La Salle Norte (días de monitoreo: lunes festivo 05/29/06 y martes 05/30/06)

El níquel, con un valor promedio de $117,42 \pm 16,63 \text{ ng/m}^3$, corresponde aproximadamente al 50% de las concentraciones halladas en Puente Aranda. El cinc, con una concentración promedio de $64,24 \pm 22,24 \text{ ng/m}^3$, es varios órdenes de magnitud menor al detectado en Puente Aranda, al igual que el cobre que se presenta con un promedio de $40,64 \pm 15,61 \text{ ng/m}^3$. El cobre aumentó en 75% su concentración entre el primer día y el segundo de monitoreo, y dado que la diferencia entre estos días radica en un mayor número de vehículos transitado en un día normal sobre un día festivo, es posible relacionar la presencia del cobre con fuentes móviles, confirmando resultados de otros estudios [4]. Algo similar ocurrió con el cromo, cuyo valor promedio fue de $15,60 \pm 9,26 \text{ ng/m}^3$, varios órdenes de magnitud por debajo de Puente Aranda, pero con un aumento del 145% de un día a otro. El manganeso presentó una concentración de $13,14 \pm 1,72 \text{ ng/m}^3$, mientras que el cadmio estuvo por debajo del límite de detección del equipo de absorción atómica.

Concentraciones durante el paro de transportes

Durante la tercera campaña en la estación INVIMA fue posible captar las concentraciones de PM_{10} durante los días en los cuales la flota de transporte público, con excepción de Transmilenio (sistema de transporte masivo de la ciudad), dejó de circular por la ciudad (martes 05/02/06 y miércoles 05/03/06). Para estos dos días la concentración de metales pesados se mantuvo similar a la concentración del día anterior de monitoreo, correspondiente a un día festivo. La única excepción está en el plomo, que para el día martes aumentó su concentración, como ya se ha mencionado de manera regular cada semana, y atribuible posiblemente a operaciones de fundición de metales presentes en la Localidad.

Al comparar las concentraciones de los diferentes metales para el primer día del paro de transportes (martes 05/02/06), y el mismo día en la semana anterior (04/25/06) se observa una reducción considerable en la concentración de PM_{10} (46%) y de todos los metales adheridos al mismo (porcentaje de reducción entre paréntesis): Ag (13%), Cd (75%), Cr (73%), Fe (48%), Mn (82%), Ni (48%), Pb (17%), Zn (37%). El único metal que presentó incremento del 22% en su concentración fue el cobre.

La concentración de PM_{10} durante el segundo día del paro de transportes (miércoles 05/03/06) y el mismo día de la semana anterior (04/26/06) se mantuvo constante, dado que para este segundo día de cese de actividades, hubo una mayor circulación de vehículos particulares por la suspensión de la restricción vehicular, y por tanto, mayor actividad industrial. En cuanto a la concentración de metales en el PM_{10} su reducción fue similar a la del primer día (porcentaje de reducción entre paréntesis): Ag (43%), Cd (95%), Cr (69%), Fe (40%), Mn (93%), Ni (57%), Pb (50%), Zn (20%). El cobre nuevamente aumentó su concentración en un 30%.

Finalmente, al comparar entre sí los dos días de paro de transportes, la concentración de PM_{10} aumentó en un 34%, por el aumento del número de

vehículos livianos en las calles, pero aún así, las concentraciones de Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni y Pb siguieron disminuyendo, lo que indicaría que su concentración en la atmósfera puede tener relación principalmente con los vehículos pesados que salieron de circulación esos días. Obviamente la reducción en el transporte conllevó a una reducción en la actividad industrial que también puede significar una menor emisión de contaminantes. El cromo y el cinc, durante estos dos días, aumentaron en 47% y 8,7% respectivamente.

Concentraciones en otras ciudades latinoamericanas

Al observar el comportamiento de seis de estos metales (Pb, Fe, Cu, Zn, Ni, Mn) en otras ciudades latinoamericanas (figura 5), se observa que

para la zona norte de Bogotá, las concentraciones de estos metales son similares a las demás ciudades, con excepción del Ni que presenta un valor significativamente superior. Sin embargo, los valores de la zona industrial de Bogotá, con excepción del hierro, en todos los casos superan apreciablemente las concentraciones en las demás urbes, indicando el nivel de contaminación del aire que presenta la Localidad. Es de gran preocupación los altos valores de plomo que se presentan en la atmósfera de Puente Aranda. El plomo es un metal cuyos efectos nocivos en la salud humana son ampliamente conocidos [15], y se legisla bajo la denominación de sustancias cancerígenas [16]. Las concentraciones de este metal reportadas en Puente Aranda, llevadas a un período de tres meses, superarían el estándar considerado seguro para la salud humana (1.500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

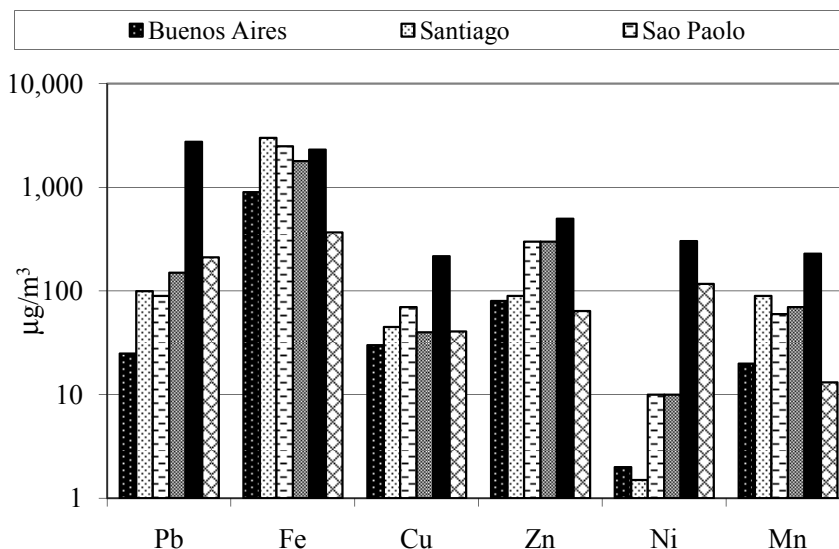


Figura 5. Concentración de metales pesados en otras ciudades latinoamericanas
Información adaptada de [17]

Aporte de las fuentes de emisión

Con el fin de realizar una aproximación al aporte de las fuentes de emisión con base en los resultados de metales pesados previamente

señalados, se presenta un análisis detallado en la Tabla 7.

(La categoría puntual hace referencia a las emisiones industriales. Móvil incluye tanto vehículos pesados como livianos).

Tabla 7 Aporte de las fuentes de emisión

<i>Metal</i>	<i>Posible fuente de emisión</i>	<i>Relación</i>
<i>Pb</i>	Puntual	Picos regulares de concentración los días martes
<i>Fe</i>	Partículas Suspensas	Alta presencia en todos los puntos de monitoreo Reducción del 50% durante el paro de transportes
<i>Cr</i>	Puntual	Mayores valores en la zona industrial
<i>Cu</i>	Puntual	Mayores valores en la zona industrial
	Móvil	Aumento del 22% durante el paro de transportes Aumento del 75% durante un día normal y festivo en la zona norte
<i>Zn</i>	Puntual	Mayores valores en la zona industrial
<i>Ni</i>	Móvil	Reducción del 50% durante el paro de transportes
<i>Mn</i>	Puntual	Mayores valores en la zona industrial
	Móvil	Reducción del 90% durante el paro de transportes
<i>Cd</i>		Concentraciones bajas en la atmósfera
<i>Ag</i>		Concentraciones bajas en la atmósfera

Conclusiones

En la presente investigación fue posible determinar la concentración de partículas y su composición en metales pesados durante el período junio 2005 a junio 2006 en la Localidad de Puente Aranda de Bogotá. Se observaron concentraciones de PM_{10} por encima del valor normativo y superiores a las encontradas en zonas remotas del norte de la ciudad. Durante los días de suspensión del transporte público en la ciudad, las concentraciones de PM_{10} en Puente Aranda disminuyeron en más del 50%, dando cuenta del efecto que en materia de contaminación del aire tiene la flota vehicular pesada que circula por la ciudad.

Las concentraciones de metales pesados fueron mayores en la zona industrial que en el norte de la ciudad, pudiendo relacionarse con las fuentes fijas y móviles que circulan a diario por Puente Aranda. A partir de dichas concentraciones fue posible realizar un análisis aproximado del aporte de las fuentes de emisión, usando los

metales pesados como marcadores de la contaminación.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento de Investigaciones y Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de La Salle, por la financiación de la presente investigación. Así mismo, al Hospital del Sur y la Secretaría de Salud de Bogotá por la cofinanciación. Un agradecimiento especial al Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA), al Centro Educativo Distrital La Merced y al Colegio de La Salle sede Norte, por el acceso a sus instalaciones y facilidad logística para la etapa de monitoreo de contaminantes. Finalmente, este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, que en el desarrollo de su proyecto de grado colaboraron de manera fundamental con esta investigación.

Referencias

1. M. Molina, L. Molina. "Megacities and Atmospheric Pollution". *J. Air & Waste Manage. Assoc.* Vol. 54. 2004. pp. 644–680.
2. DAMA. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. *Reporte de calidad del aire para la ciudad.* Bogotá. 2006. pp. 115.
3. M. Piñeiro, P. López, S. Muniategui, D. Prada, X. Querol, A. Alastuey. "A new method for the simultaneous determination of PAH and metals in samples of atmospheric particulate matter". *Atmospheric Environment.* Vol. 37. 2003. pp. 4171-4175.
4. R. Mohanraj, A. Azeez, T. Priscilla. "Heavy metals in Airborne Particulate Matter of Urban Coimbatore". *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* Vol. 47. 2004. pp. 162–167
5. M. Grazia, S. Vaccano, V. Granluigi, R. Vecchi. "Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in the ambient air of Milan (Italy)". *Atmospheric Environment.* Vol. 35. 2001. pp. 4639 – 4650.
6. W. Ya-Fen, K. Huangb, C. Lic, H. Mia, J. Luoc, P. Tsaid. "Emissions of fuel metals content from a diesel vehicle engine". *Atmospheric Environment.* Vol. 37. 2003. pp. 4637 – 4643.
7. E. Ojeda. *Evaluación de los niveles de contaminación por plomo en el aire a partir de las muestras obtenidas en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá.* Tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad Nacional de Colombia. 1987. pp. 340.
8. M. Pérez. *Determinación de metales pesados en las partículas del aire.* Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Bogotá. 1998. pp. 284.
9. J. Coant. *Medición de cadmio en las partículas del aire.* Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Bogotá. 1998. pp. 212.
10. M. Roa. *Medición de metales en las partículas del aire.* Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Bogotá. 1999. pp. 178.
11. C. Leguía. *Determinación de metales pesados e HAP en inmediaciones del Campus de la Universidad Nacional de Colombia.* Tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria. Universidad Nacional de Colombia. 2004. pp. 322.
12. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. *Reporte de Salud del Distrito Capital.* Bogotá. 2003. pp. 52.
13. ICONTEC. Determinación de la concentración de partículas suspendidas en el aire ambiente. Norma Técnica Colombiana NTC-3704. Bogotá. 1995. pp. 34.
14. EPA. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Method IO-3.2. Determination of metals in ambient particulate matter using atomic absorption (AA) spectroscopy.* Cincinnati, OH. 1999. pp. 27.
15. N. Rojas. Compilador. *Material particulado atmosférico y salud.* Editorial Universidad de Los Andes, Bogotá, 2005. 125 p.
16. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución 601 de Abril 04 de 2006.* República de Colombia. pp. 12.
17. L. Dawidowski. "Composición multielemental de material particulado: de los receptores a las fuentes". *Memorias del Primer Congreso Colombiano de Calidad del Aire y Salud Pública.* Manizales, Colombia. 2007.