

Fortalecimiento de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire en el Valle de Aburrá con Medidores Pasivos

Recibido para evaluación: 19 de Octubre de 2007

Aceptación: 13 de Marzo de 2008

Recibido versión final: 6 de Mayo de 2008

Carmen Elena Zapata Sánchez¹

Ricardo Quijano Hurtado²

Eliana Molina Vásquez³

Claudia Marcela Rubiano Hernández⁴

Gustavo Londoño Gaviria⁵

RESUMEN

Esta investigación fue realizada por la Universidad Nacional de Colombia en Convenio con el área metropolitana del Valle de Aburrá. El objetivo fue fortalecer la monitoría de la calidad del aire del Valle de Aburrá mediante los muestreadores pasivos de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, compuestos orgánicos volátiles específicamente benceno, tolueno y xilenos (BTX) y la tasa de sedimentación de partículas en las principales vías. Los muestreadores se instalaron en 15 sitios del Área Metropolitana durante un año. En la medición de gases se utilizaron los tubos pasivos de difusión y en la medición de partículas sedimentables se utilizó el principio de gravedad; posteriormente, las muestras se analizaron mediante sólidos totales.

Los resultados de los dióxidos de azufre y nitrógeno no sobrepasaron la Norma Colombiana Anual, pero en 12 estaciones de monitoreo se superó el valor guía de la OMS para dióxido de nitrógeno. Los niveles de ozono muestran la formación de este contaminante en las zonas de ladera y en 9 estaciones se sobrepasó la Norma Colombiana Anual para benceno y todas las estaciones superaron la Guía de la OMS. Las mayores tasas de sedimentación de partículas se obtuvieron en los sitios de monitoreo influenciados por actividades de construcción y mantenimiento de vías. El uso de medidores pasivos permite identificar zonas críticas y evaluar de manera sencilla las tendencias de contaminación atmosférica. Se propone que en Colombia se apruebe esta técnica para la medición de la calidad del aire.

PALABRAS CLAVE: Tubos pasivos de difusión, Partículas sedimentables, Dióxido de azufre, Dióxido de nitrógeno, Ozono, Benceno, Tolueno, Xileno, Calidad del aire, Valle de Aburrá.

ABSTRACT

This investigation was made by the National University of Colombia in agreement with the Metropolitan Area of the Aburrá Valley. The principal objective was to enforcing the monitoring of the quality of the air of the Aburrá valley by means of the passive testers of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, volatile organic compounds (BTX) and the rate of particle sedimentation in main road routes. Testers were settled in 15 Stations of the Metropolitan Area for a year. In gas measurement passive tubes of diffusion were used. Settleable particle measurement uses the principle of the gravity and the samples are analyzed by means of total solids.

The results of sulfur dioxide and nitrogen do not exceed the Annual Colombian Norm, but in 12 stations of testing the value is surpassed guides of the WHO for nitrogen dioxide. The ozone levels show formation of this one polluting agent in the zones of slope. In 9 stations the Annual Colombian Norm for benzene is exceeded and all the stations the WHO Norm was not fulfilled. The greater rates of particle sedimentation are obtained in the sites of testing influenced by activities of construction and maintenance of ways. The use of passive measurers allows to identify critic zones and to evaluate of simple way the tendencies of atmospheric contamination. We suggest that in Colombia this technique for the measurement of the quality of the air is approved.

KEYWORDS: Passive tubes of diffusion, TSP, Sulfur Dioxide, Nitrogen Oxide, Ozone, Benzene, Toluene, Xylene, Air Quality, Aburrá Valley.

1. I. *Petróleos. M.Sc. Profesora Asociada Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

2. I. *Mecánico. M.Sc. Coinvestigador proyecto Redaire, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

3. I. *Sanitaria. Investigadora, proyecto Redaire, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

4. I. *Petróleos. Proyecto Redaire, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.*

5. I. *Químico. M.Sc., Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Interventor*

cezapata@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de muestreo pasivo son ampliamente utilizados para la evaluación de la calidad del aire, especialmente en países en desarrollo, por su bajo costo y manejo sencillo, en comparación con los métodos convencionales (analizadores automáticos y equipos activos manuales). Estos métodos sirven como indicativo de la contaminación, permiten llevar a cabo evaluaciones de tendencias a largo plazo, e identificar zonas de riesgo que deben ser monitoreadas con métodos convencionales para verificar el cumplimiento de la legislación ambiental.

El uso de captadores difusivos para medir la calidad del aire está reglamentado por la Comunidad Europea a través de la Norma EN 13528 de 2003. De acuerdo con el Reglamento Interior del Comité Europeo de Normalización (CEN/CENELEC), están obligados a adoptar esta norma europea como norma nacional los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Eslovaquia, España, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza. En Europa, los captadores difusivos han sido validados en campo y son utilizados para el diseño y optimización de redes automáticas, ya que permiten evaluar a más bajo costo, la representatividad de diferentes sitios de monitoreo. Por ejemplo, en Francia han sido validados para la determinación de la contaminación por ozono y sus efectos en la salud (Nadine et al, 1999); en Alemania se han estudiado los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios con tráfico vehicular importante (Pfeffer et al, 2006).

La medición de partículas sedimentables en el aire, conocida también a nivel internacional como precipitación de polvo ó polvo sedimentable, está reglamentada por el Método Estándar D1739-98 de la ASTM y en Colombia, es un método de referencia para la evaluación y seguimiento de la calidad del aire, establecido en la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. En países de Centro América, esta metodología se utiliza en estudios de calidad del aire. En Alemania y Suiza, es ampliamente utilizada para conocer el flujo de sustancias tóxicas, por ejemplo metales pesados, que son aportadas al suelo.

En Antioquia se realizaron mediciones por parte de Corantioquia en los años 2003, 2004 y 2005 usando muestreadores pasivos de SO_2 , NO_2 , O_3 y Material Particulado. Los estudios concluyen que los sensores pasivos son una herramienta útil en la evaluación rápida de línea base de calidad del aire. (Corantioquia y Universidad de Antioquia, 2004 y Corantioquia, Universidad de Antioquia y Universidad Pontificia Bolivariana, 2006)

En el presente estudio, los medidores pasivos fueron utilizados para evaluar la calidad del aire en las principales vías del área metropolitana del Valle de Aburrá, con el fin de conocer la contaminación aportada principalmente por las fuentes móviles. Se determinaron las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), compuestos orgánicos volátiles (BTX) y la tasa de sedimentación de partículas.

1.1. Generalidades de los contaminantes evaluados y sus efectos en la salud

Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es un gas incoloro, de olor acre, soluble en agua, reactivo e irritante para el sistema respiratorio y puede conducir, con una exposición de larga duración, al incremento de enfermedades de las vías respiratorias como la bronquitis. En períodos cortos de exposición puede producir cambios en la función pulmonar en asmáticos (OMS, 2004).

El dióxido de azufre proviene en gran parte de la quema de combustibles fósiles sobre todo del carbón sulfurado y en menor parte, de los gases de escape de los vehículos que funcionan con diesel, así como de la quema de leña. Los volcanes son una fuente natural del dióxido de azufre.

El dióxido de azufre es una sustancia que contribuye en la formación de la lluvia ácida. La oxidación del SO_2 genera SO_3 que rápidamente experimenta la hidratación para formar ácido sulfúrico.

Las concentraciones medias anuales oscilan entre 20 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de las ciudades de los países desarrollados y las medias diarias generalmente no son mayores de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El SO_2 también puede alcanzar altas concentraciones en algunos ambientes interiores a través del uso de combustibles que contienen azufre, como el carbón usado para la calefacción y la cocina (OMS, 2004).

Dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno es un gas tóxico, relativamente insoluble en agua. Este gas puede inhalarse en grandes cantidades y penetrar a las vías respiratorias inferiores del pulmón afectando este sistema. Al igual que el SO_2 , los individuos que padecen de asma son más susceptibles de desarrollar una respuesta de constricción bronquial. Se ha comprobado que el dióxido de nitrógeno es unas cuatro veces más tóxico que el monóxido de nitrógeno; presenta toxicidad cruzada con el ozono y de ahí su importancia toxicológica al formar nitratos de peracilo (Capó Martí, 2002).

Su origen puede ser natural, ya que se forma en las tempestades y erupciones volcánicas. Las fuentes antropogénicas son el tráfico motorizado, principalmente por la combustión en motores diesel, así como los fuegos domésticos y procesos industriales de combustión. El dióxido de nitrógeno juega un papel importante como precursor en la formación de ozono y oxidantes, que son también tóxicos en especial para las plantas. El NO_2 es un contaminante tanto primario como secundario. Los vehículos automotores emiten NO y NO_2 . En la atmósfera, el NO se oxida y se transforma a dióxido lentamente en reacción con el oxígeno, pero rápidamente en reacción con el O_3 . Esto explica las bajas concentraciones de O_3 que generalmente se observan cerca de las fuentes de óxido de nitrógeno.

Las concentraciones ambientales de NO_2 en el aire son variables. Las concentraciones naturales de fondo en el aire ambiental pueden ubicarse en el rango de menos de 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a más de 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones anuales medias en el aire ambiental urbano pueden variar entre 20 y 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con concentraciones máximas de 75 a 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora. Las concentraciones de NO_2 en interiores pueden alcanzar concentraciones promedio de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante varios días, con concentraciones máximas de 2.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora en los casos en que hay dispositivos de calefacción de gas con poca ventilación (OMS, 2004).

Ozono

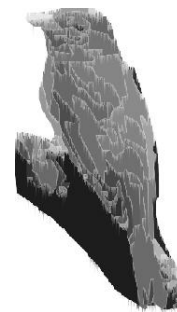
El ozono es una forma alotrópica del oxígeno en condiciones normales; es un gas relativamente insoluble en agua, de color azulado y de olor picante. Es un gas tóxico, oxidante, irritante para los ojos y las vías respiratorias y que tiene un efecto fitotóxico importante. En contraste con el SO_2 y el NO_2 , hay muy poca diferencia en la respuesta de la función pulmonar entre los asmáticos y los individuos sanos. No obstante, todavía no se ha llegado a comprender la gran variabilidad de las respuestas individuales (OMS, 2004).

El ozono es un contaminante secundario que se forma en la atmósfera a partir de la reacción de los óxidos de nitrógeno con la luz solar y por oxidación de los hidrocarburos, puede ser originado por descargas eléctricas, radiaciones X, radiaciones UVA, arcos voltaicos (Capó Martí, 2002).

Es un constituyente normal del aire, cuya concentración aumenta con la altura, puesto que en las capas altas de la atmósfera es formado más intensamente por la acción de los rayos ultravioleta sobre el oxígeno. Cerca del suelo, su concentración es muy variable, pero podemos señalar que en ambientes limpios varía entre 40 y 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en ambientes muy contaminados puede tomar dos caminos: desaparecer por reaccionar con los hidrocarburos o alcanzar proporciones peligrosas formando la niebla oxidante, con concentraciones que llegan hasta 1.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Capó Martí, 2002).

Compuestos orgánicos volátiles (BTX)

Los hidrocarburos juegan un papel importante en los procesos fotoquímicos en la atmósfera y contribuyen en la formación de ozono. Los BTX. son compuestos aromáticos que



son adicionados a la gasolina para aumentar su octanaje y son generados por la combustión de dicho combustible. Los compuestos aromáticos presentan propiedades tóxicas y anestésicas.

El benceno es un componente que tiene un significado toxicológico para el hombre por sus efectos cancerígenos y puede generar efectos en la salud como leucemia en trabajadores expuestos (OMS, 2004).

El tolueno, agente utilizado a menudo como disolvente, es un elemento volátil que tiene efectos en el sistema nervioso central de trabajadores y es causante de malos olores (OMS, 2004).

Los xilenos, en particular el m-xileno, es un elemento activo fotoquímicamente en la formación de ozono, se ha comprobado los efectos en el sistema nervioso central en humanos voluntarios, neurotoxicidad en ratas y malos olores (OMS, 2004).

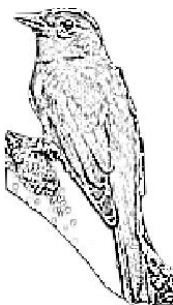
Partículas sedimentables

Las partículas presentes en la atmósfera que tienen velocidades de sedimentación apreciables, permaneciendo allí por cortos períodos de tiempo, se conocen como partículas sedimentables. La velocidad de sedimentación de una partícula con un diámetro de 1 micra es de 0.006 cm/s. Los movimientos verticales del aire en el exterior normalmente son mayores que ese valor, de modo que las partículas de este tamaño no se sedimentan con rapidez en la atmósfera, como lo haría la arena gruesa, sino en lugar de ello se mueven con el gas y permanecen en suspensión durante largos períodos (De Nevers, 1998).

Partículas de diámetro superior a 20μ ($= 0.02$ mm), como la arena, poseen velocidades de sedimentación apreciables, de modo que es raro que el viento sople esas partículas hacia arriba o las sostenga arriba una vez que se encuentren en el aire. La velocidad de sedimentación en el aire para una partícula con un diámetro de 100 micras es de 45 cm/s aproximadamente (Capó Martí, 2002).

Las partículas sedimentables se diferencian de las partículas en suspensión, en que las últimas sedimentan con tanta lentitud, que puede considerarse que permanecen en la atmósfera hasta que son eliminadas por precipitación. No existe una línea divisoria clara y simple entre las dos categorías, pero si se debe hacer una distinción arbitraria de este tipo, se haría en alguna parte cerca de un diámetro de partícula de 10 micras ($= 0.01$ mm) (De Nevers, 1998). En el área de la salud ambiental, las partículas de diámetro mayor a 10 micras son retenidas en la nariz y la garganta y no alcanzan a ingresar a los pulmones, mientras que las partículas menores de 10 micras penetran directamente por las vías respiratorias y ocasionan alteraciones en este sistema en diferentes sitios (Nieto, 1993).

El polvo sedimentable, como se conocen también las partículas sedimentables, es creado básicamente por el rompimiento de grandes partículas en procesos tales como: trituración, pulverización, perforaciones, explosiones; en la mezcla de materiales y operaciones como: transporte, tamizado, barreduras (Henaó, 1993). La actividad de la construcción es una de las principales fuentes de generación de este contaminante. El desgaste de los neumáticos y el polvo de las vías generan partículas que no permanecen largo tiempo en la atmósfera. Las partículas presentes en la atmósfera que tienen velocidades de sedimentación apreciables, permaneciendo allí por cortos períodos de tiempo, se conocen como partículas sedimentables.



2. METODOLOGÍA

La evaluación de contaminantes se realizó en 15 sitios del área metropolitana del Valle de Aburrá, localizados cerca de vías de flujo vehicular importante. La duración del programa de monitoreo fue de un año. Esto permitió determinar los niveles de contaminación del aire en las épocas secas y lluviosas del año, hacer comparaciones con los valores límites anuales establecidos por la Norma Colombiana de Calidad del Aire y hacer correlaciones con los métodos activos utilizados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá. La frecuencia

de muestreo fue semanal para el ozono y cada 28 días para SO₂, NO₂, ozono, BTX y partículas sedimentables.

2.1. Tubos pasivos de difusión

Los captadores difusivos de gases se rigen por la Ley de Fick que relaciona el flujo de gas que difunde desde una región de alta concentración (externo abierto del tubo), con el tiempo de exposición y el área del captador, que está expuesto al contaminante (Delgado, 2004).

La Ley de Fick se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$F = D * [X] / L \quad (1)$$

Siendo,

F Flujo del contaminante X (mol/cm².min)

D Coeficiente de difusión del gas (cm²/min)

[X] Concentración ambiental del contaminante X (mol/cm³)

L Longitud de la zona de difusión (cm). Dada por la geometría del captador.

La cantidad de gas Q en moles, que difunde a través de un captador pasivo con un área a (cm²) y una longitud L (cm) por unidad de tiempo es:

$$Q = F * a * t \quad (2)$$

Sustituyendo el valor de F de la expresión (1):

$$Q = D * [X] * a * t / L \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que el cociente de captación, S (cm³/min) es:

$$S = D * a / L \quad (4)$$

Sustituyendo en la ecuación (3) se obtiene:

$$Q = S * [X] * t \quad (5)$$

Y despejando

$$[X] = Q / S * t \quad (6)$$

Por lo tanto, conociendo el coeficiente de captación S del captador pasivo, la cantidad de gas en moles que ha difundido a través del captador (Q) y el tiempo que ha estado expuesto (t), se conocerá la concentración ambiental promedio del contaminante X en el aire durante el periodo muestreado (Galan Madruga et al., 2001).

En el mercado se ofrecen diferentes clases de captadores difusivos, los cuales deben cumplir con los requerimientos establecidos por la Norma Europea EN 13528 de 2003, relacionados con los principios de operación de los dispositivos, la elección del absorbente, la geometría del captador, la influencia de los factores ambientales, entre otros. En el presente estudio se utilizaron los tubos pasivos Passam, desarrollados en el Federal Institute of Technology, Zurich (Suiza), por el Dr. Markus Hangartner. Permiten medir contaminantes como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, ozono, BTX, sulfuro de hidrógeno y amoníaco.

Captador pasivo Passam para SO₂

El muestreador pasivo para dióxido de azufre está basado en el principio de la difusión pasiva de moléculas de dióxido de azufre hacia un medio absorbente en este caso de carbonato de potasio y de glicol. Los muestreadores utilizados consisten en un estuche de polipropileno con una apertura de 20 mm de diámetro, como se muestra en la Figura 1. Para disminuir la influencia del viento se fija una membrana de teflón sostenida por una red metálica. Se recomienda un dispositivo de suspensión especialmente fabricado para proteger el muestreador de las



influencias atmosféricas y del viento. La cantidad de dióxido de azufre absorbida es proporcional a la concentración en el ambiente. Después de una exposición de una semana a un mes, se extrae la cantidad total de dióxido de azufre y se determina por cromatografía iónica.

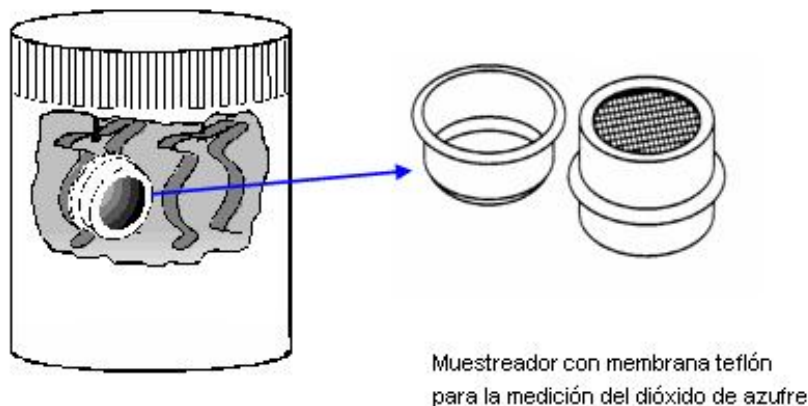


Figura 1.
Captador pasivo Passam para SO_2

Dispositivo de suspensión como protección contra las influencias atmosféricas

Captador pasivo Passam para NO_2

El muestreador está basado en el principio de difusión molecular de dióxido de nitrógeno hacia un medio absorbente, en este caso de trietanolamina; el muestreador consiste en un tubo de polipropileno de 7.4 cm de largo y de 9.5 mm de diámetro interno. Los muestreadores se colocan en un dispositivo especial, para protegerlos de la lluvia y minimizar la influencia del viento. La cantidad de dióxido de nitrógeno absorbida es proporcional a la concentración en el ambiente y después de una exposición de una semana a un mes, se extrae la cantidad total de dióxido de nitrógeno que se determina según la reacción de Saltzman a 540nm utilizando un espectrofotómetro.

Captador pasivo Passam para Ozono

El captador difusivo para el ozono consiste en un tubo de polipropileno de 4.9 cm de largo y 0.9 cm de diámetro y en la extremidad cerrada hay un filtro de vidrio sumergido en solución ácida de Dipridilenoetileno, DPE. Para proteger los muestreadores de las condiciones ambientales y para eliminar el efecto de la luz sobre el DPE, se desarrolló un dispositivo especial, que permite también suspenderlos. El muestreador está basado en la difusión del ozono a lo largo de un tubo hacia un medio absorbente. La quimiabsorción del ozono se lleva a cabo por reacción con 1,2-di(4-piridil)etileno (DPE), el ozónido formado se divide y produce un aldehído, la cantidad de aldehído es determinada por espectrofotometría con el método MBTH a 442 nm.

No existen referencias de un coeficiente de difusión del ozono en la literatura, además, la división del DPE no es estequiométrica. Por estas razones, el sistema completo se calibró de manera continua, en 9 sitios de medición, durante seis meses de buena temporada. El factor de calibración pudo ser verificado posteriormente en 9 sitios de medición diferentes al año siguiente.

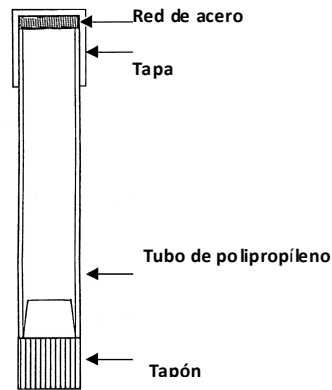
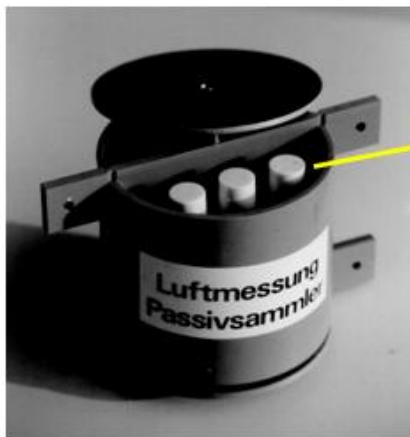


Figura 2.
Captador pasivo Passam para NO_2



Dispositivo de protección contra la influencia atmosférica y de suspensión



Características muestreador pasivo de ozono

Figura 3.
Captador pasivo Passam para Ozono.

Captador pasivo Passam para BTX

Consiste en un tubo pequeño relleno con un absorbente granular, similar a los usados en el muestreo activo. No es un tubo de tipo abierto como en el caso del captador para NO_2 y ozono. La distancia de difusión está limitada por una capa de acetato de celulosa, la cual permite también una disminución de la influencia del viento. Se conoce como muestreo ORSA y está construido de la siguiente manera:

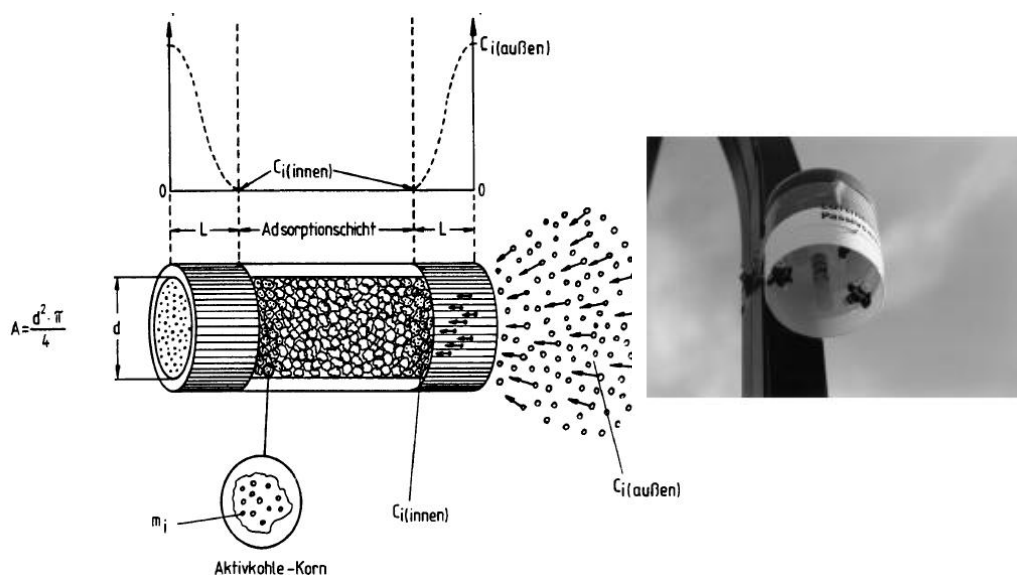


Figura 4.
Captador pasivo Passam para
BTX.

La cantidad absorbida de BTX (benceno, tolueno y xilenos) es proporcional a la concentración en el medio ambiente y los porcentajes de acumulación se establecieron experimentalmente bajo condiciones de laboratorio. Después de la exposición se extrae el carbón activado gracias al sulfuro de carbono y se determina el BTX por cromatografía gaseosa; el método también permite determinar el etilbenceno.

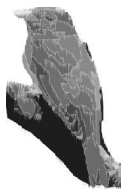
2.2. Medición de partículas sedimentables

La medición de polvo sedimentable es un método sencillo y económico para estimar el flujo de partículas del aire al suelo. Para la determinación de la cantidad de polvo que se sedimenta, se utiliza el "Método estándar para análisis y colección de polvo sedimentable (partículas sedimentables)" D1739-98 de la ASTM, reprobada por la ASTM en el 2004.

El equipo consiste básicamente en un colector de tamaño y forma estándar, el cual se expone a la atmósfera por un período de 30 ± 2 días. Terminado el muestreo, se evapora la muestra en el laboratorio y se determina el peso del material particulado sedimentado. Los requerimientos que debe cumplir el colector son:

- Cilindro abierto en la parte superior de mínimo 6" (150 mm) de diámetro y altura no menor a dos veces el diámetro.
- Material en acero inoxidable o plástico resistente al agua.
- Debe permitir rotulado de identificación a prueba de agua.
- Cada recipiente debe tener una tapa que ajuste bien.

El soporte para el recipiente debe sostener la parte superior del recipiente a 2 m sobre el piso. Debe tener una mampara, construida según la Figura 5. La mampara debe tener un aro para protección contra pájaros y una barrera contra el viento para mejorar las condiciones de sedimentación en la entrada del colector y evitar que ingresen partículas arrastradas horizontalmente por acción del viento.



Mampara (barrera contra vientos)

Sección de corte de la mampara

Figura 5.
Diseño del colector de polvo sedimentable según Norma ASTM D1739-98.

Durante el periodo de exposición también entrará agua en el recipiente, e igualmente se evaporará de éste; puede haber líquido en los recipientes cuando se recogen. Este líquido se procesa posteriormente y por lo tanto no se debe desechar y si existe la duda de que el recipiente se rebosó por lluvia, se debe invalidar la muestra correspondiente.

La tasa de precipitación de polvo, D, se expresa en tonelada depositada de polvo/Kilómetro²-30 días, o en g/m²-30 días y se calcula así:

$$D = W/Axt;$$

donde:

D = Tasa de precipitación de polvo, g/m²-30 días ó t/km²-mes.

A = Área de colección (seccional transversal interna del colector), m².

W = Peso de partículas, gramos o tonelada
(Material soluble e insoluble en la muestra).

t = Tiempo de exposición, 30 días.

3. RESULTADOS

La Figura 6 muestra la ubicación de las 15 estaciones de muestreo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá con las coordenadas correspondientes a cada punto en coordenadas planas con los siguientes parámetros:

Origen: Bogotá

Sistema de Proyección: Colombia_Bogota_Zone

Proyección: Transversa de Mercator

Falso Este: 1.000.000

Falso Norte: 1.000.000

Meridiano Central: -74,08091667

Factor de Escala: 1.0

Latitud de Origen: 4,59904722

Unidad Lineal: Metro.

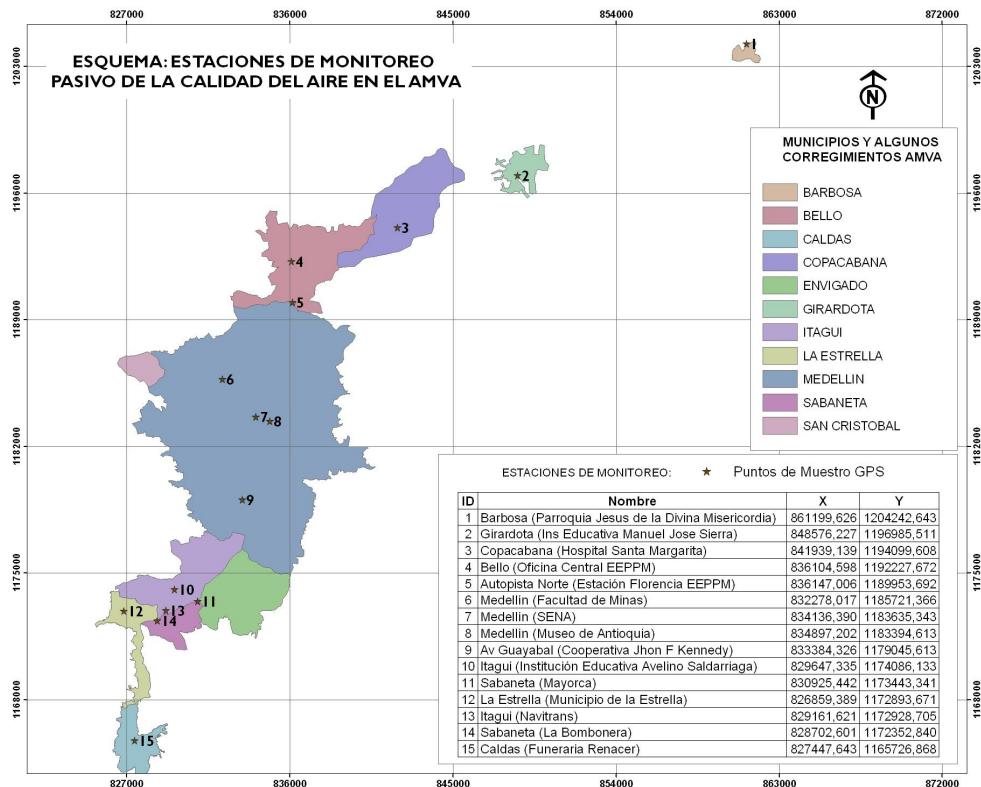


Figura 6.
Esquema de ubicación de las estaciones de monitoreo pasivo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

La Figura 7 muestra las concentraciones promedio de dióxido de azufre obtenidas en 15 estaciones de monitoreo del área metropolitana del Valle de Aburrá, para un año de monitoreo comprendido entre el 01 agosto/06 y el 06 agosto/07. Los niveles encontrados no superan la Norma Colombiana Anual de Calidad del Aire de 80 µg/m³ y la concentración promedio más alta es de 66.7 µg/m³ y se registra en la estación Autopista Norte. El gran aporte de SO₂ que se registra en esta estación se debe a la influencia de la zona industrial circundante, donde se identifica el uso de carbón bituminoso como combustible, el cual genera emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera. La dirección predominante de los vientos en el sector, en el sentido norte-sur, favorece la dispersión de los contaminantes hacia el sitio de monitoreo, el cual está ubicado al sur de la zona industrial y a una altura de 10 metros sobre el nivel del suelo. Por estas razones, los niveles de dióxido de azufre medidos en la estación Autopista Norte, son representativos de la zona industrial que allí se asienta.

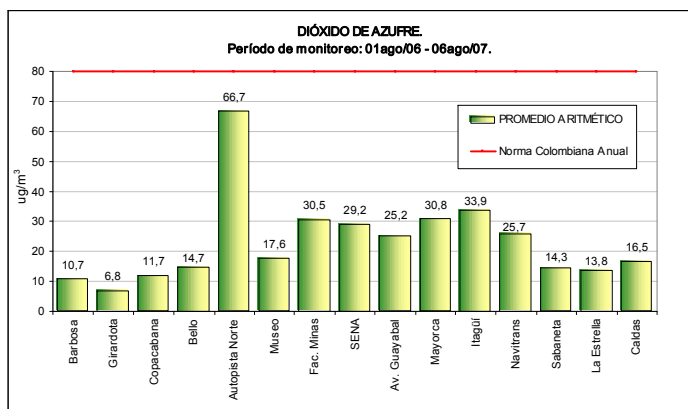


Figura 7.
Concentración de SO₂ por monitor pasivo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) no establece un valor guía anual para el dióxido de azufre, por considerar que el valor guía para 24 horas ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) asegurará niveles bajos del promedio anual. Al analizar los promedios anuales de dióxido de azufre, se observa que las estaciones Autopista Norte, Facultad de Minas, SENA, Avenida Guayabal, Mayorca, Itagüí y Navitrans superan la Guía para 24 horas de la OMS. Es importante anotar que el dióxido de azufre es un gas irritante para el sistema respiratorio y puede conducir, con una exposición de larga duración, al incremento de enfermedades de las vías respiratorias como la bronquitis.

La distribución de los niveles de dióxido de azufre en el área metropolitana muestra que las mayores concentraciones se presentan en la zona centro del Valle de Aburrá, observando una asociación con la quema de combustibles tanto a nivel industrial como vehicular. Las estaciones ubicadas en los extremos norte y sur del valle reportan las menores concentraciones de SO_2 y se caracterizan por una menor actividad vehicular en comparación con la actividad que se presenta en el centro de la ciudad de Medellín.

Las concentraciones promedio anuales de dióxido de nitrógeno en el área metropolitana del Valle de Aburrá son ilustradas en la Figura 8, las cuales no superan la Norma Colombiana Anual de Calidad del Aire para NO_2 de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, 12 de las 15 estaciones de monitoreo sí superan la Guía Anual de la OMS de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este gas puede tener efectos en la salud, al inhalarse en grandes cantidades y penetrar a las vías respiratorias inferiores del pulmón, afectando este sistema. Al igual que con el dióxido de azufre, los individuos que padecen de asma se encuentran entre la población más susceptible de desarrollar una respuesta de constricción bronquial. Es importante destacar que la Norma Europea de Calidad del Aire también establece un valor máximo permisible anual de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los promedios anuales más bajos de NO_2 se registran en las estaciones Barbosa, Girardota y Copacabana, reflejando la poca actividad vehicular en las vías cercanas. Estos 3 sitios de monitoreo son los únicos que reportan niveles inferiores al valor guía de la OMS para la protección de la salud pública. Los mayores niveles de NO_2 se registran en las estaciones Facultad de Minas y SENA, con valores de 60.7 y $59.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Estos sitios de monitoreo están ubicados cerca a vías de flujo vehicular importante y no se identifica la influencia de fuentes fijas de dióxido de nitrógeno, Por lo tanto los niveles de contaminación medidos, se consideran representativos de las emisiones producidas por los vehículos.

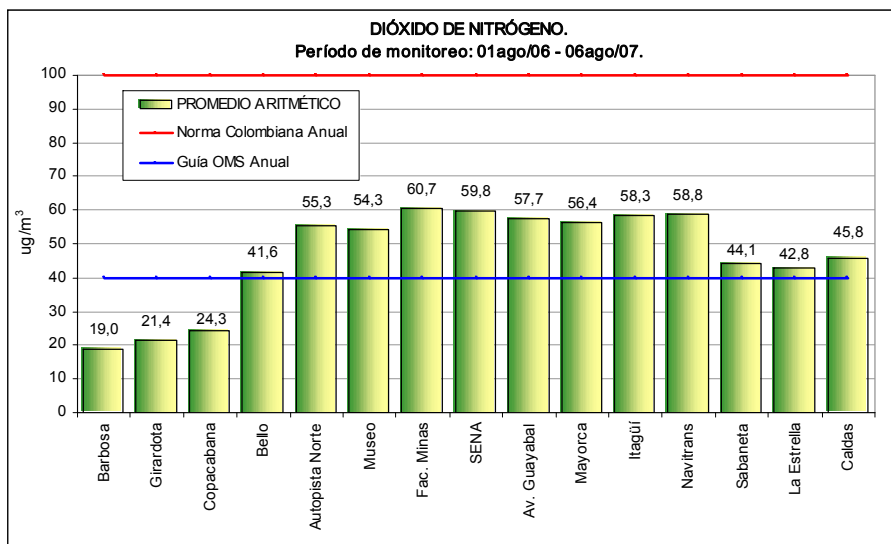


Figura 8. Concentración de NO_2 por monitor pasivo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Se observa un comportamiento muy definido en la distribución de los niveles de dióxido de nitrógeno en el área metropolitana del Valle de Aburrá. En la zona norte, los niveles son los más bajos y empiezan a incrementarse a medida que se tienen sitios de medición más cerca de la zona centro del valle. En la zona sur (Sabaneta, La Estrella y Caldas), los niveles vuelven a

disminuir y las menores concentraciones se registran en la estación La Estrella. Este comportamiento está asociado principalmente con el uso de la gasolina en los motores de combustión interna y la mayor actividad vehicular que reporta el centro de Medellín, en comparación con otros municipios del área metropolitana.

Las concentraciones promedio anuales de ozono registradas en el área metropolitana del Valle de Aburrá e ilustradas en la Figura 9, están por debajo de la Norma Colombiana Horaria ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Octohoraria ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de Calidad del Aire. Las estaciones Sabaneta y La Estrella reportan las mayores concentraciones de ozono, con valores de 44.2 y $47.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

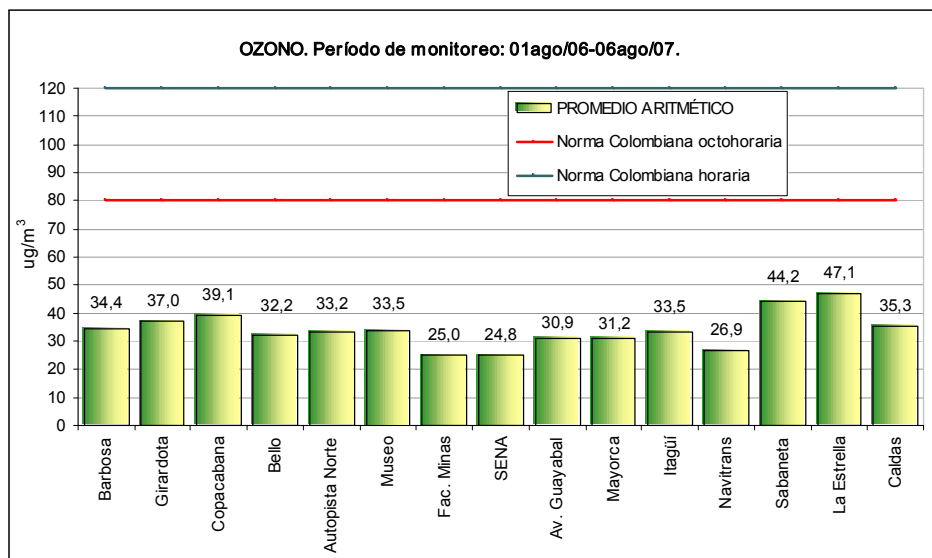


Figura 9.
Concentración de ozono por monitor pasivo en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

La evaluación del ozono permite corroborar el comportamiento de este contaminante en el Valle de Aburrá, de acuerdo con los estudios llevados a cabo con medidores automáticos. A diferencia del dióxido de azufre y del dióxido de nitrógeno, los mayores niveles de ozono se registran en la zona norte y sur del área metropolitana. Este comportamiento se atribuye a las características de formación de este contaminante en la atmósfera, por reacciones fotoquímicas de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, que al dispersarse en el aire, tiende a acumularse en las laderas, tal como se ha evidenciado en estudios de calidad del aire con monitores automáticos en el Valle de Aburrá. Es importante anotar que los resultados de ozono con métodos pasivos son un indicativo de la contaminación y que el cumplimiento de la norma horaria y octohoraria se deberá verificar con métodos automáticos.

Las concentraciones promedio anuales de benceno en el área metropolitana del Valle de Aburrá para el período comprendido entre el 01 agosto/06 y el 06 agosto/07 son ilustradas en la Figura 10. Los promedios anuales de benceno en la zona centro del Valle de Aburrá superan la Norma Colombiana Anual de Calidad del Aire de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las estaciones que superan el valor máximo permisible para benceno en el aire son: Autopista Norte, Museo, Facultad de Minas, SENA, Avenida Guayabal, Mayorca, Itagüí, Navitrans y Sabaneta. La Organización Mundial de la Salud no recomienda un valor seguro de exposición para este contaminante, por considerarlo un cancerígeno. Por lo tanto en los 15 sitios de monitoreo se está incumpliendo esta guía mundial para la protección de la salud pública. La situación encontrada en el área metropolitana es preocupante si se considera el significado toxicológico que tiene el benceno para el hombre por sus efectos cancerígenos, principalmente leucemia en trabajadores expuestos. En el caso del presente estudio, la población que vive ó transita por los sitios evaluados, se encuentra en riesgo, ya que el benceno puede ser cancerígeno a niveles bajos por largos períodos de exposición.

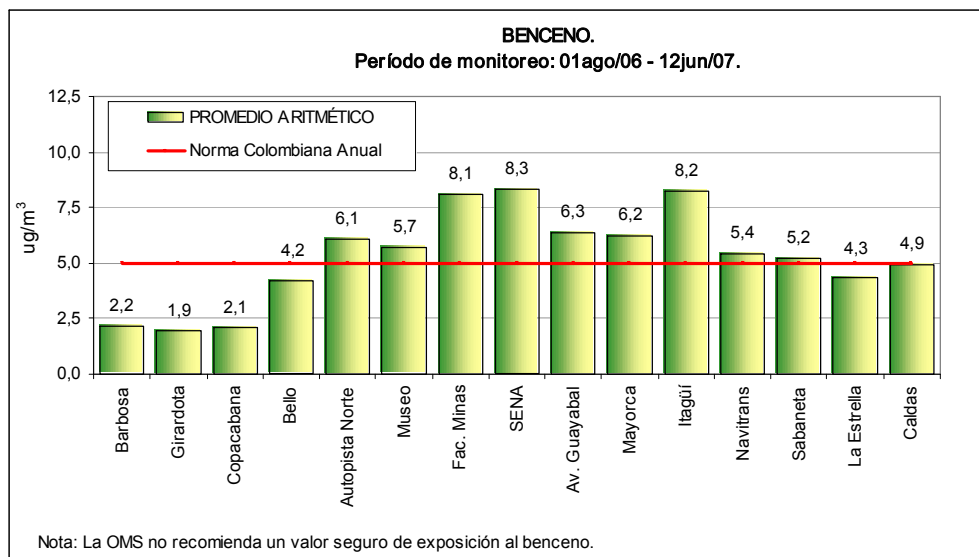


Figura 10. Concentración promedio de benceno por monitor pasivo en el área metropolitana del Valle de Aburrá.

Es importante resaltar que en estudios realizados en ciudad de México, se ha observado que las concentraciones de los contaminantes en el interior de los vehículos que viajan lentamente, con tráfico vehicular intenso, son generalmente más altas que las concentraciones en el aire ambiente. En un estudio de 1998 (Lemire, S. et al; 1998), se evaluó la exposición ambiental a compuestos orgánicos volátiles mediante la determinación de las concentraciones sanguíneas en usuarios de transporte en la Ciudad de México. Las concentraciones promedio de benceno en sangre, etilbenceno, m-/p-xileno y tolueno fueron aproximadamente dos veces más elevadas que en la submuestra de no fumadores de la Tercera Encuesta de Nutrición y Salud (Third National Health and Nutrition Examination Survey) en la población de Estados Unidos de América. Este estudio reflejó el problema de contaminación en la Ciudad de México, asociado al bajo control de emisiones en los vehículos viejos y las pobres prácticas de mantenimiento y además enfatizó la necesidad de iniciativas regulatorias y alternativas para disminuir el tráfico vehicular intenso en la Ciudad de México.

Las concentraciones más altas de benceno registradas en el presente estudio se presentan en las estaciones SENA, Facultad de Minas, e Itagüí, donde el valor permisible anual es superado en un 54% (7.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 56% (7.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 64% (8.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente. Estos niveles están asociados directamente con las emisiones de los vehículos que funcionan a gasolina, como taxis, particulares, camionetas y microbuses que utilizan la gasolina como combustible. Estudios realizados en Estados Unidos (Wallace, L.; 1990) y en el Reino Unido (UK, Department of the Environment) atribuyen el 82% y el 97% de las emisiones de benceno, respectivamente, a las emisiones vehiculares. Es importante destacar el nivel promedio anual de benceno alcanzado en la estación de Caldas de 4.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donde se debe continuar el seguimiento de este contaminante por su valor cercano a la Norma Colombiana.

La Figura 11 ilustra la tasa de sedimentación de partículas promedio anual en 15 sitios de monitoreo del área metropolitana del Valle de Aburrá. La mayoría de las estaciones superan la Norma Anual Suiza de 6 t/km² - 30 días. Sólo las estaciones Barbosa, Girardota y Museo reportan tasas de sedimentación de partículas inferiores a dicha norma. Las vías cercanas a las estaciones Barbosa y Girardota se caracterizan por la poca actividad vehicular en comparación con las vías de la zona centro del área metropolitana. En el caso de la estación Museo, ubicada en la zona centro de Medellín, es posible que por ser la estación de monitoreo de mayor altura sobre el nivel del suelo (17.2 m), no se alcanza a captar el polvo generado en la Avenida de Greiff (calle 52).

Las estaciones Autopista Norte, Navitrans, Itagüí y Sabaneta reportan promedios anuales superiores a la Norma Argentina de 10 t/km² - 30 días. La mayor tasa de sedimentación de

partículas promedio se registra en la estación Navitrans, la cual se caracteriza por medir el impacto del flujo vehicular de la Autopista Sur. Es de anotar que entre el 17 de enero y el 7 de marzo de 2007, se registraron trabajos de repavimentación en la vía, afectando la medición de partículas sedimentables en dicho período.

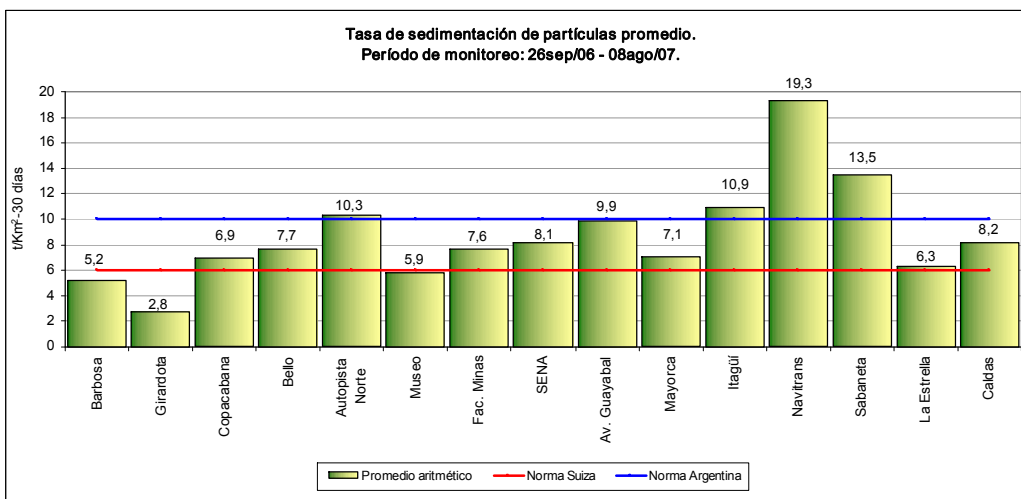


Figura 11.
Tasa de sedimentación de partículas promedio en el área metropolitana del Valle de Aburrá.

La resuspensión de polvos en las vías y el desgaste de los neumáticos en los vehículos se encuentran entre las principales causas de la presencia de este contaminante en la atmósfera. Las actividades de construcción y demolición en el área metropolitana del Valle de Aburrá son otra fuente importante de emisión de partículas sedimentables, en donde se llevan a cabo procesos de trituración y pulverización de grandes partículas.

Correlación con los métodos de medición activos

Estudios de medición de calidad del aire realizados en Europa con captadores difusivos Passam han demostrado una alta correlación con los medidores automáticos ó continuos. En el presente estudio, no fue posible hacer comparaciones con los medidores automáticos que utiliza la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá debido a que éstos funcionaron en otros sitios del área metropolitana durante el desarrollo del proyecto. Por esta razón, sólo se realizaron comparaciones entre los métodos pasivos y los métodos activos manuales, para dos sitios de monitoreo: Facultad de Minas y Museo de Antioquia. Los resultados obtenidos en la estación Museo de Antioquia fueron comparados con la estación Miguel de Aguinaga de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá, debido a la cercanía de estos dos sitios (71m de distancia) ubicados en la zona centro de Medellín.

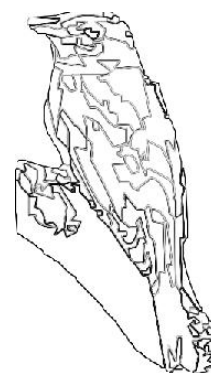
Se realizaron comparaciones para las concentraciones de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Estos contaminantes son medidos con el equipo activo manual tres gases utilizando las soluciones absorbentes Tetracloruromercurato (TCM) para el SO₂ y el Arsenito de Sodio para el NO₂, posteriormente son analizados en el laboratorio por colorimetría. Se observa que el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno no muestran una correlación para las parejas de datos analizadas, como lo indican los coeficientes de correlación R²: 0.134 y 0.03 respectivamente.

4. CONCLUSIONES

- El monitoreo pasivo de contaminantes en el área metropolitana del Valle de Aburrá identificó sectores con contaminación crítica y evaluó de manera sencilla la evolución de los

contaminantes durante el monitoreo. Estos resultados deben ser validados por los métodos activos estándar, en el caso que se tengan valores muy cercanos al límite establecido por la norma. En el centro del Área Metropolitana se identifica un sector desde la estación Autopista Norte hasta la de Navitrans (Autopista Sur), donde se debe hacer un seguimiento de los niveles de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y benceno de acuerdo a las zonas críticas de contaminación definidas por el estudio.

- Los resultados del monitoreo pasivo de contaminantes pueden ser utilizados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá para la ubicación de equipos activos manuales y automáticos en sitios estratégicos donde se identificaron valores superiores o cercanos a la norma. Por ejemplo, en la estación del SENA, se debe considerar una nueva estación de monitoreo para la Red, ya que registra las concentraciones más altas de benceno y dióxido de nitrógeno, las cuales son representativas de las emisiones de los vehículos que circulan por la Avenida Regional y la Avenida Ferrocarril. Es importante anotar que a pesar de la presencia de árboles en los alrededores del SENA, las emisiones de los vehículos que circulan por la Avenida Regional, se dispersan en el aire por acción del viento y son detectadas en el sitio de monitoreo.
- En el sector donde se ubicó la estación Autopista Norte, se debe verificar el cumplimiento de la Norma Colombiana Anual de Calidad del Aire para dióxido de azufre con equipos activos manuales ó equipos automáticos, debido a los altos niveles encontrados con los métodos pasivos. Es probable que la zona industrial esté afectando la calidad del aire de los habitantes de las zonas aledañas.
- De acuerdo con los resultados de ozono que se vienen reportando en el estudio, se debe continuar con el seguimiento en las zonas de ladera del Valle de Aburrá, ya que en la zona centro no se alcanzan a medir concentraciones importantes de este contaminante. En este sentido, la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá debe reubicar los medidores de ozono hacia las zonas de ladera en donde se observa la presencia de este contaminante.
- En el caso de los compuestos orgánicos volátiles (BTX), que aun no están siendo medidos por la Red, los resultados del presente estudio servirán como línea base para el seguimiento futuro de este contaminante. Los niveles de benceno obtenidos son preocupantes desde el punto de vista epidemiológico y de calidad de vida de los habitantes del área metropolitana. Por esta razón se debe continuar con el monitoreo en las zonas identificadas como críticas y ampliar la cobertura de medición a otras intersecciones viales con alto flujo vehicular, tales como la Calle San Juan con la Carrera 80, la Calle San Juan con la Avenida Ferrocarril, otros puntos en la Avenida Regional.
- El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en su función de autoridad ambiental, debe empezar a revisar los niveles máximos permisibles de BTX en su jurisdicción, teniendo en cuenta los resultados del presente proyecto y de estudios epidemiológicos. En este caso se propone la elaboración de una malla de puntos de muestreo más densa en la zona centro del área metropolitana del Valle de Aburrá, desde Bello hasta Caldas, en los cuales los niveles están cercanos a los valores límite ó lo superan.
- Las Autoridades Ambientales, las autoridades territoriales, la comunidad académica y la comunidad en general deben tomar acciones coercitivas para que ECOPETROL mejore la calidad de los combustibles, especialmente reduciendo el contenido de hidrocarburos aromáticos. Es importante realizar estudios epidemiológicos para verificar la afectación de la salud en la población causada por contaminantes como dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y benceno.
- ECOPETROL y el Ministerio de Minas y Energía deben incluir en sus Planes de Desarrollo la disminución de azufre e hidrocarburos aromáticos como el benceno en los combustibles en el menor tiempo posible.
- En concordancia con el estudio realizado, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo



Territorial debe evaluar como propuesta de nueva norma de calidad del aire, la Norma Europea EN 13528 de 2003 que aprueba el uso de captadores difusivos para la determinación de las concentraciones de gases y vapores en el aire ambiente. Los métodos pasivos ofrecen ventajas en comparación con los métodos activos manuales y automáticos, por su bajo costo, manejo sencillo y sus aplicaciones para la evaluación de tendencias de contaminación a largo plazo, la determinación de zonas críticas, el diseño y optimización de redes de monitoreo automáticas, entre otras. Los captadores difusivos son ampliamente utilizados en Europa. Por ejemplo, en Francia han sido validados para la determinación de la contaminación por ozono y sus efectos en la salud (Nadine et al, 1999); en Alemania se han realizado mediciones de dióxido de nitrógeno en sitios con tráfico vehicular importante (Pfeffer et al, 2006).

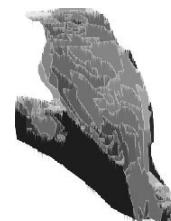
- El Área Metropolitana del Valle de Aburrá debe realizar mediciones simultáneas con los captadores difusivos y con los equipos automáticos, para establecer correlaciones entre ambas metodologías. También es importante implementar el uso de duplicados en las mediciones con captadores difusivos, para disminuir el porcentaje de incertidumbre del método y para asegurar la información en el sitio de monitoreo.
- El Ministerio de Ambiente debe establecer e incluir en la Norma de Calidad del Aire el valor máximo permisible de polvo sedimentable. La Norma ASTM D1739-98 para polvo sedimentable, establecida en el "Protocolo para la Vigilancia y Seguimiento del Módulo Aire en el Sistema de Información Ambiental", del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se debe seguir aplicando en los estudios de calidad del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, para el seguimiento del impacto generado por las vías y el rodamiento de los vehículos.
- El uso de la metodología de polvo sedimentable es un buen mecanismo para el seguimiento de las actividades de construcción y de mantenimiento de vías y permite a las Autoridades Ambientales de todo el país ejercer un control en los tiempos de ejecución de este tipo de obras.
- Las Secretarías de Tránsito y Transporte Municipales deben trabajar en una estrategia de rediseño de rutas de alto tráfico vehicular, con base en los resultados del presente estudio.
- El Sistema de Transporte Masivo Metroplús debe emplear combustibles limpios dados los resultados del presente estudio que permitió identificar zonas críticas de contaminación para los niveles de benceno superiores a la Norma Colombiana, así como niveles preocupantes de dióxidos de azufre y nitrógeno, los cuales provienen de los combustibles actuales y que permiten identificar zonas críticas de contaminación.
- El Área Metropolitana y las Secretarías de Tránsito y Transporte Municipales deberán establecer una estrategia para aumentar los factores de ocupación de los vehículos que transitan por vías de alto flujo vehicular y en el caso de los taxis, restringir su movilidad cuando se encuentran sin pasajeros. De la misma manera se sugiere que se diseñen campañas educativas que incentiven el uso de los acopios de taxis y colectivos por parte de la comunidad académica, autoridades territoriales y ambientales. Adicionalmente, se recomienda estudiar el pico y placa para las motos ya que ellas consumen gasolina y aumentan la concentración de benceno.



BIBLIOGRAFÍA

- Capó Martí, M., 2002. Principios de Ecotoxicología. Diagnóstico, Tratamiento y Gestión del Medio Ambiente. McGraw-Hill. pp. 57-76.
- Corantioquia y Universidad de Antioquia, 2004 Informe final del Contrato Inter-Administrativo No 4673 de 2003 "Construcción de la Línea Base de Calidad del Aire en 10 Municipios de la Jurisdicción de Corantioquia".

- Corantioquia, Universidad de Antioquia y Universidad Pontificia Bolivariana, 2006. Informe final: Construcción de la Línea Base de Calidad del Aire en 15 Municipios de la Jurisdicción de Corantioquia. CONTRATO No 5915 de 2004.
- Delgado, J., 2004. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. Universitat Jaume. 567 P.
- De Nevers, N., 1998. Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill. pp 188-189.
- Directiva 96/62/CE del Consejo, 1996. Sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente, 27 de septiembre. Unión Europea.
- Directiva 1999/30/CE del Consejo, 1999. Relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente, 22 de abril. Unión Europea.
- Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2000, Sobre los valores límite para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente, 16 de noviembre.
- Directiva 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2002. Relativa al ozono en el aire ambiente, 12 de febrero.
- EN 13528-3, 2004. Calidad del aire ambiente. Captadores difusivos para la determinación de las concentraciones de gases y vapores. Requisitos y métodos de ensayo. Parte 3: Guía para la selección, uso y mantenimiento. Versión en español de la Norma Europea EN 13528-3 de diciembre de 2003.
- Henao, E., 1993. Generalidades y fuentes de generación de material particulado. En: Curso Contaminación del aire por material particulado. AINSA. Medellín.
- Lemire, S. et al, 1998. Exposición ambiental a compuestos orgánicos volátiles evaluados en concentraciones sanguíneas en usuarios de transporte en la Ciudad de México.
- Nadine, B. et al., 1999. Ozone Measurement with Passive Samplers: Validation and Use for Ozone Pollution Assessment in Montpellier, France. Environmental Science & Technology. Vol 33, No 2. pp. 217 - 222.
- Nieto, O., 1993. Efectos en la salud de la contaminación por material particulado. En: Curso Contaminación del aire por material particulado. AINSA. Medellín.
- OMS, 2004. Guías para la Calidad del Aire. Traducción del Informe de la Reunión de un Grupo de Trabajo de Expertos de la OMS desarrollada en Ginebra, Suiza en diciembre de 1997. Lima.
- OMS, 2005. Guías de Calidad del Aire. Actualización Mundial. Informe de la Reunión del Grupo de Trabajo. Bonn, Alemania.
- Passam, 2003. Muestreos pasivos para benceno. Protocolo suministrado por Laboratório de análise del médio ambiente, Passam ag. Suiza. 2 P.
- Passam, 2003. Muestreos pasivos para dióxido de nitrógeno. Protocolo suministrado por el Laboratório de análise del médio ambiente, Passam ag. Suiza. 2 P.
- Passam, 2003. Muestreos pasivos para ozono. Protocolo suministrado por el Laboratório de análise del médio ambiente, Passam ag. Suiza. 2 P.
- Passam, 2003. Muestreos pasivos para el dióxido de azufre. Protocolo suministrado por el Laboratório de análise del médio ambiente, Passam ag. Suiza. 2 P.
- Pfeffer, U., Beier, R. and Zang, T., s.a. Measurements of Nitrogen Dioxide with Diffusive Samplers at Traffic-Related Sites in North Rhine-Westphalia (Germany). Performance Characteristics and Measurement Uncertainty.
- Resolución 601 del 4 de abril de 2006. Norma de Calidad del Aire. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia.



UK Department of the Environment, 1993. First Report: Urban air quality in the United Kingdom. London, England: Quality of Urban Air Review Group.

Wallace L., 1990. Major sources of exposure to benzene and other volatile organic chemicals. Risk Anal, 10: pp. 59-64.

