

Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia)

Evaluation of the air quality by using a mobile laboratory: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia)

Daniel Fabián Palacio Soto¹, Carlos Alfonso Zafra Mejía^{1}, Juan Pablo Rodríguez Miranda³*

¹Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental-GIIAUD, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Avda. Circunvalar Venado de Oro. Bogotá DC., Colombia.

²Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Avda. Circunvalar Venado de Oro. Bogotá DC., Colombia.

(Recibido el 08 de abril de 2013. Aceptado el 03 de febrero de 2014)

Resumen

La localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá ha sido reportada como una zona de alta contaminación atmosférica, principalmente debido a que las concentraciones de PM_{10} exceden los límites legislativos. Este artículo presenta una evaluación temporal y espacial de la calidad del aire en la zona industrial de la localidad de Puente Aranda mediante un laboratorio móvil de monitoreo. Los contaminantes atmosféricos medidos por el laboratorio durante el periodo de muestreo (2009/04/13-2009/12/21) fueron los siguientes: PM_{10} , NO_x , NO_2 , NO , SO_2 , CO y O_3 . Con respecto a la legislación colombiana, los resultados muestran que PM_{10} (24 horas) es el contaminante atmosférico que presenta el mayor número de excedencias durante el período de investigación (47,3%), no obstante, la evaluación de los estados excepcionales por contaminación del aire muestra que las máximas concentraciones registradas no generan un nivel de prevención; lo anterior, en contraposición con los resultados obtenidos mediante la utilización del índice de calidad del aire propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. Por otro lado, los resultados sugieren una tendencia similar en el comportamiento temporal de PM_{10} , O_3 y NO_x sobre la totalidad del área de investigación; es decir, probablemente por la existencia de fuentes dominantes en la zona industrial de la localidad. Finalmente, las concentraciones registradas (PM_{10} , NO_2 ,

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 3239300 ext. 4040, correo electrónico: czafra@udistrital.edu.co (C. Zafra)

NOx, NO y CO) por el laboratorio móvil (zona central) son en promedio 2,30 y 2,01 veces superiores a las registradas por las estaciones móvil SDA (zona oriental) y fija SDA (zona occidental), respectivamente.

-----*Palabras clave:* Contaminación atmosférica, laboratorio móvil, material particulado, PM₁₀, Puente Aranda

Abstract

The locality of Puente Aranda in Bogotá has been reported as a zone of high air pollution, mainly because the PM₁₀ concentrations exceed the legal limits. This paper presents a temporal and spatial assessment of air quality in the industrial zone of Puente Aranda locality by using a mobile laboratory of monitoring. Air pollutants measured by the laboratory during the sampling period (2009/04/13-2009/12/21) were the following: PM₁₀, NOx, NO₂, NO, SO₂, CO and O₃. With regard to the Colombian law, the results show that PM₁₀ (24 hours) is the air pollutant with the highest number of exceedances during the investigation period (47.3%), however, the evaluation of the exceptional state by air pollution shows that the highest concentrations reported not generate a level of prevention; above, in contrast with the results obtained by use of the air quality index proposed by the U.S. Environmental Protection Agency. On the other hand, the findings suggest a similar trend in the temporal behavior of PM₁₀, O₃ and NOx over the whole of the research area; that is, probably by the existence of dominant sources in the industrial area of the locality. Finally, the concentrations recorded (PM₁₀, NO₂, NOx, NO and CO) by the mobile laboratory (central area) are on average 2.30 and 2.01 times higher than those recorded by stations mobile SDA (eastern area) and fixed SDA (western area), respectively.

-----*Keywords:* Air pollution, mobile laboratory, particulate matter, PM₁₀, Puente Aranda

Introducción

La contaminación del aire urbano es el resultado de una agregación de fuentes de emisión que van desde las industrias y los automóviles hasta el uso de productos domésticos, incluida la vida animal y vegetal; que alteran la composición normal de la atmósfera generando problemas de salud pública y daños al mobiliario urbano existente.

La localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá se clasificó como un área de alta contaminación en el año 2006 (i.e., Clase I), debido a que las concentraciones promedio diarias de material atmosférico en suspensión de tamaño menor o igual a 10 µm (PM₁₀) excedieron el 75%

de los casos, con respecto de la norma anual de 70 µg/m³ expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT): Resolución 601 de 2006 [1, 2]; este límite anual fue ajustado a 50 µg/m³ mediante la Resolución 610 de 2010 [3]. Adicionalmente, Gaitán et al. [4] estudiaron la variación temporal de las concentraciones de PM₁₀ entre los años 2000 y 2005; los investigadores reportaron en promedio, que en el 80% de los días del año se presentaban valores superiores al equivalente de la norma anual (i.e., 70 µg/m³).

A nivel mundial las investigaciones han reportado que las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos son susceptibles de causar efectos

adversos sobre la salud (p.ej. [5-7]); este deterioro de la calidad del aire puede tener consecuencias graves que van desde la exacerbación de las enfermedades respiratorias [8] hasta la muerte prematura [9]. En este sentido, Arciniegas et al. [10] reportaron para la localidad de Puente Aranda una asociación positiva entre las concentraciones de PM_{10} y el número de consultas por enfermedad respiratoria para un periodo de latencia de seis días, aun cuando los niveles alcanzados no excedieron las normas ambientales locales.

A partir del anterior escenario, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) decidió instalar un laboratorio móvil de monitoreo en la localidad de Puente Aranda para efectuar una evaluación adicional de la calidad del aire durante el año 2009; es decir, para complementar la valoración realizada con las estaciones de monitoreo fija y móvil de la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá (SDA). En esta evaluación adicional se contó con el apoyo técnico del Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (GIIAUD).

Una manera adecuada de evaluar la distribución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos sin la necesidad de una red densa de monitoreo estacionaria es el uso de un laboratorio móvil [11]. La justificación para la vigilancia móvil radica en su flexibilidad para medir y evaluar la calidad del aire en toda la localidad, mientras que las estaciones fijas son útiles para realizar registros continuos a largo plazo; no obstante, estas últimas no permiten evaluar la variabilidad espacial de los contaminantes a través de la localidad ya que se instalan de manera permanente en un sólo lugar [12].

Los laboratorios móviles complementados con las estaciones fijas de monitoreo permiten evaluar la variación espacial y temporal de los contaminantes en toda la localidad o en lugares de especial interés [13]. Los valores registrados por los laboratorios móviles representan concentraciones instantáneas frecuentemente medidas cerca de las fuentes de

contaminación; de esta manera, tienden a presentar una mayor variabilidad horaria o diaria con respecto de las concentraciones medias reportadas por las estaciones fijas de monitoreo [14]. Adicionalmente, la versatilidad de la vigilancia móvil ha sido reportada por investigaciones realizadas en Suiza [11], China [14], Finlandia [15], Canadá [12, 16] y EE.UU. [17-20].

El objetivo principal de la investigación es evaluar la calidad del aire en la zona industrial de la localidad de Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia) mediante un laboratorio móvil de monitoreo. Los contaminantes atmosféricos a evaluar son los siguientes: PM_{10} , NO_x , SO_2 , CO y O_3 . Adicionalmente, se pretende validar la información obtenida por el laboratorio móvil a partir de los registros de las estaciones fija SDA y móvil SDA localizadas en el área de investigación. Finalmente, se proyecta evaluar la variación espacial de los contaminantes atmosféricos en el área de estudio.

Materiales y métodos

Descripción del lugar de investigación

El lugar de investigación se ubicó en la localidad de Puente Aranda, en el centro-occidente de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia). Su clima tropical de montaña (i.e., clima frío) se caracterizó por presentar durante el período de muestreo (2009/04/13-2009/12/21) una amplia variación en la temperatura (promedio de 14 °C, con variación horaria entre 7 y 22 °C). El área de estudio posee una elevación media de 2558 m.s.n.m., una precipitación media anual de 860 mm y una dirección predominante del viento de suroccidente. Los anteriores datos climatológicos fueron obtenidos de una estación fija operada por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. (SDA) (ver figura 1). El laboratorio móvil del IDEAM se localizó a una distancia de 1905 y 1255 metros con respecto de la estación fija SDA y la estación móvil SDA, respectivamente (ver figura 1). La tabla 1 presenta las principales características del área de investigación.



Figura 1 Esquema del área de investigación

Tabla 1 Principales características del área de investigación

<i>Característica</i>	<i>Magnitud</i>
Área (km ²) - urbana (%) - protección (%)	17,3 - 97,1 - 2,9
Uso del suelo (predominante)	Industrial
Industrias (unidades)	752 ^a
Chimeneas/industriales (unidades)	470±70 ^b
Calderas (unidades)	210 ^b
Hornos (unidades)	172 ^b
Densidad media de tráfico. Calle 13 (vehículos/día)	118421
Densidad máxima de tráfico. Calle 13 (vehículos/h)	9804
Densidad media de tráfico. Las Américas (vehículos/día)	59535
Densidad máxima de tráfico. Las Américas (vehículos/h)	5955
Composición del tráfico. Calle 13 (%)	Automóviles: 69; buses: 10; camiones con y sin remolque: 8; motos: 13
Composición del tráfico. Las Américas (%)	Automóviles: 69; buses: 11; camiones con y sin remolque: 5; motos: 15

^a: [21]; ^b: [22]

Características del laboratorio móvil

El laboratorio móvil estuvo equipado con los siguientes instrumentos para la medición de parámetros meteorológicos: pluviómetro, veleta, anemómetro, pirheliómetro, barómetro y termo-hidrómetro (ver figura 2). Por otro lado, estuvo equipado con analizadores para

la medición de los siguientes parámetros atmosféricos: PM_{10} (atenuación de rayos beta), NO_x (quimioluminiscencia), SO_2 (Floreescencia), CO (fotometría por infrarrojo no disperso) y O_3 (absorción de rayos ultravioleta) (ver figura 2). Por último, no se realizó la medición de hidrocarburos totales puesto que el analizador se encontraba en mantenimiento.

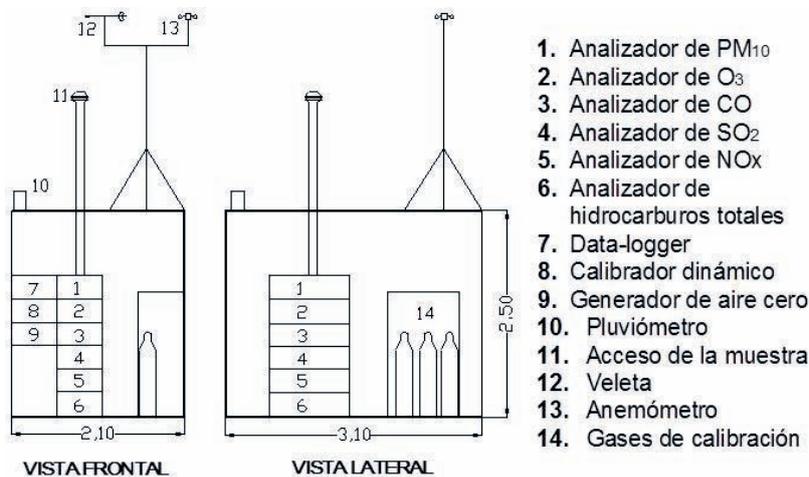


Figura 2 Esquema y fotografía del laboratorio móvil

Registro, validación y evaluación de los datos del laboratorio móvil

Los registros de parámetros meteorológicos y contaminantes atmosféricos fueron tomados durante un período de 253 días (2009/04/13-2009/12/21). En este sentido, los registros correspondieron a reportes horarios, obteniéndose un total de 6072 datos por cada variable en estudio durante el período de muestreo. La información fue tomada, validada y analizada a partir de una adaptación de los criterios establecidos por los siguientes organismos: (i) Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT) [23], (ii) Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental de México (DGCENICA) [24], e (iii) Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) [25].

En este sentido, la aplicación de los criterios de validación permitió evaluar el funcionamiento de los analizadores e instrumentos del laboratorio móvil. La validación se realizó utilizando parámetros enfocados en los siguientes principios: (i) funcionamiento técnico, (ii) límites de detección, y (iii) registro de datos; adicionalmente se consideró el factor externo “fallo eléctrico”. En la evaluación de la validez de los datos se utilizaron banderas de identificación (i.e., colores): (i) fallo eléctrico, violeta; (ii) inferior al límite de detección, amarillo; (iii) superior al límite de detección, verde; (iv) fallo técnico, rosado; y (v) razón desconocida, azul. La tabla 2 presenta los criterios utilizados para la invalidación de datos del laboratorio móvil.

Tabla 2 Principales criterios para la invalidación de datos del laboratorio móvil [23-25]

Criterio	Descripción	Dato erróneo o invalidado	
Fallo eléctrico	Caídas, cortes y variaciones en el fluido de analizadores e instrumentos de medición	PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x , CO y O ₃ Barómetro, anemómetro, pirheliómetro, veleta, termo-higrómetro y pluviómetro	(i) Durante el fallo: invalidación de todos los datos. (ii) Inferior a 1 h: invalidación de los siguientes 30 min. (iii) Superior a 1 h: invalidación de los siguientes 60 min. (iv) Invalidación donde se observen cambios significativos ^a
	Estabilización del fluido y el voltaje	Aplicable a todos los analizadores e instrumentos de medición. Reporte del valor de invalidación: -999,0	
I.L.D. ^b	Límite del analizador	PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x , CO y O ₃	1,0 µg/m ³ , 0,4 ppb, 0,4 ppb, 0,05 ppm y 0,6 ppb
S.L.D. ^c	Límite del analizador	PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x , CO y O ₃	10 mg/m ³ , 500 ppb, 500 ppb, 50 ppm y 500 ppb
Fallo técnico	Averías, terminación de los gases de calibración e insumos, y cambios en las condiciones de operación	Aplicable a todos los analizadores e instrumentos de medición	
Razón desconocida	Variaciones abruptas en las tendencias, valores anómalos, y valores constantes por períodos de tiempo en los analizadores e instrumentos de medición	Barómetro	Presión negativa y variación superior a 0,75 mmHg durante 3 h
		Anemómetro	Variación inferior a 0,1 m/s en 3 h ó superior a 0,5 m/s en 12 h
		Pirheliómetro	Radiación nocturna
		Veleta	Variación inferior a 1° en 3 h ó 10° en 18 h
		Termo-higrómetro	Variación superior a 5 °C en 1 h ó inferior a 0,5 °C en 12 h
		Pluviómetro	Variación superior a 25 mm en 1 h, superior a 100 mm en 24 h ó inferior a 50 mm en 3 meses
		NO _x , NO y NO ₂	(i) Incumplimiento del intervalo: $0,85 < [(NO+NO_2)/NO_x] < 1,15$. (ii) Si NO, NO ₂ ó NO _x invalidado, entonces todos invalidados
		PM ₁₀ , SO ₂ , CO y O ₃	Datos constantes durante 3 h

Nota. ^a: en continuidad y tendencia. ^b: inferior al límite de detección. ^c: superior al límite de detección

Adicionalmente, en la validación de los datos registrados por el laboratorio móvil se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para evaluar su relación temporal con los datos registrados por dos unidades de calidad del aire cercanas: (i) la estación móvil SDA y (ii) la estación fija SDA (ver figura 1). En el cálculo de los coeficientes se utilizó la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [25].

Por otro lado, se realizó una comparación normativa con respecto de los niveles de inmisión de referencia y de alarma (i.e., prevención, alerta o emergencia) establecidos por la Resolución 610 de 2010 [3]. Adicionalmente, se calculó el índice de calidad del aire (ICA) para el período de muestreo a partir de lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. [26]. Igualmente, se evaluó la relación temporal entre los parámetros climatológicos y la concentración de los contaminantes atmosféricos del área de

investigación. Finalmente, se estudio la variación espacial de los contaminantes atmosféricos en el área de investigación a partir de los datos registrados por el laboratorio móvil y las dos estaciones utilizadas como de referencia: (i) estación móvil SDA, y (ii) estación fija SDA (ver figura 1).

Resultados y discusión

Validación de datos del laboratorio móvil

Los resultados de la etapa de validación de datos para todos los analizadores de contaminantes atmosféricos mostraron, que durante el período de investigación los datos válidos representaron en promedio un 81,5% (i.e., durante 253 días). En este sentido, y partir de los criterios establecidos para datos erróneos o inválidos, los criterios de razón desconocida, lectura inferior al límite de detección y fallo eléctrico fueron los que asociaron en promedio el mayor porcentaje de datos erróneos: 8,3, 5,8 y 4,4%, respectivamente (ver tabla 2). Como se pudo observar, los criterios de lectura superior al límite de detección y fallo técnico no asociaron datos erróneos. Por otro lado, los analizadores de contaminantes atmosféricos que asociaron un mayor número de datos válidos fueron en orden de magnitud: NO_x (89,0%), SO₂ (84,3%), O₃ (82,5%), PM₁₀ (76,6%) y CO (75,2%). En este sentido, los registros horarios obtenidos por todos los analizadores de contaminantes atmosféricos superaron el 75% de datos válidos; límite exigido por el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia [23].

Por otro lado, los resultados mostraron para todos los instrumentos de medición de parámetros climatológicos del laboratorio móvil, que durante el período de investigación los datos válidos representaron en promedio un 99,1%. Los criterios de fallo eléctrico y razón desconocida fueron los que asociaron en promedio el mayor porcentaje de datos erróneos: 0,77 y 0,07%, respectivamente (ver tabla 2). Como se pudo observar, los criterios de lectura superior e

inferior al límite de detección, y fallo técnico no asociaron datos erróneos. En este sentido, los parámetros de los instrumentos que asociaron un mayor número de datos válidos fueron en orden de magnitud: precipitación (99,1%), humedad relativa (99,1), presión barométrica (98,7%), radiación solar (98,0%), temperatura (97,4%), y dirección y velocidad del viento (80,9%). Nuevamente, los registros horarios obtenidos por todos los instrumentos de medición superaron el 75% de datos válidos, sugiriendo la validez de los registros obtenidos por el laboratorio móvil en el presente estudio.

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos al evaluar la relación temporal (horaria) de los parámetros de calidad del aire entre el laboratorio móvil, y las estaciones móvil SDA y fija SDA (ver figura 1). Como se pudo observar, las correlaciones siempre fueron positivas. Al estudiar las correlaciones entre el laboratorio móvil y la estación móvil SDA, se evidenció que el 64,3% de los coeficientes sugirieron una correlación considerable (i.e. un coeficiente mayor a 0,75); en este sentido, los siguientes parámetros fueron los que presentaron los mejores coeficientes de correlación de Pearson: O₃, NO, PM₁₀ y NO_x. Por otro lado, al evaluar las correlaciones entre el laboratorio móvil y la estación fija SDA, se observó que el 66,7% de los coeficientes sugirieron una correlación media (i.e. un coeficiente mayor a 0,50); en este sentido, los siguientes parámetros fueron los que presentaron los mejores coeficientes de correlación de Pearson: O₃, NO, NO_x y SO₂ (ver tabla 3).

A partir de lo anterior, se evidenció que los datos registrados por el laboratorio móvil presentaron una correlación positiva entre media y considerable con respecto de las dos estaciones de apoyo avaladas por la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá (SDA); sugiriendo, en el presente estudio, la validez de los registros obtenidos por el laboratorio móvil. Es importante mencionar, que el laboratorio móvil se localizó a una distancia de 1905 y 1255 metros con respecto de las estaciones fija SDA y móvil SDA, respectivamente (ver figura 1).

Tabla 3 Coeficientes de correlación entre el laboratorio móvil y las estaciones de calidad del aire de referencia

Parámetro	Móvil – Móvil SDA		Móvil – Fija SDA	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
PM ₁₀	0,87	0,85	-	-
NO ₂	0,66	0,69	0,40	0,47
NOx	0,86	0,79	0,77	0,52
NO	0,89	0,76	0,83	0,47
SO ₂	0,65	0,34	0,70	0,53
CO	0,51	0,80	0,43	0,56
O ₃	0,97	0,84	0,97	0,88

Comparación con la normatividad colombiana

La comparación legislativa se realizó a partir de la determinación de la media móvil para el conjunto de datos que conformaron el período de investigación del laboratorio móvil (i.e., 253 días), y según el período de tiempo sobre el cual cada contaminante debió ser comparado con la norma de referencia (i.e., Resolución 610 de 2010) [3]. Los resultados mostraron para la zona de localización del laboratorio móvil que PM₁₀ (24

horas), NO₂ (1 hora) y O₃ (8 horas) presentaron excedencias durante el 47,3, 0,3 y 0,1% de las veces, respectivamente; los límites legislativos a condiciones de referencia para PM₁₀, NO₂ y O₃ fueron 100, 200 y 80 µg/m³, respectivamente. La figura 3 presenta la variación diaria de la concentración de PM₁₀ a condiciones de referencia para el área de localización del laboratorio móvil. La figura se obtuvo al promediar los registros horarios de PM₁₀ para cada día de monitoreo; es decir, en esta ocasión no se utilizó la media móvil.

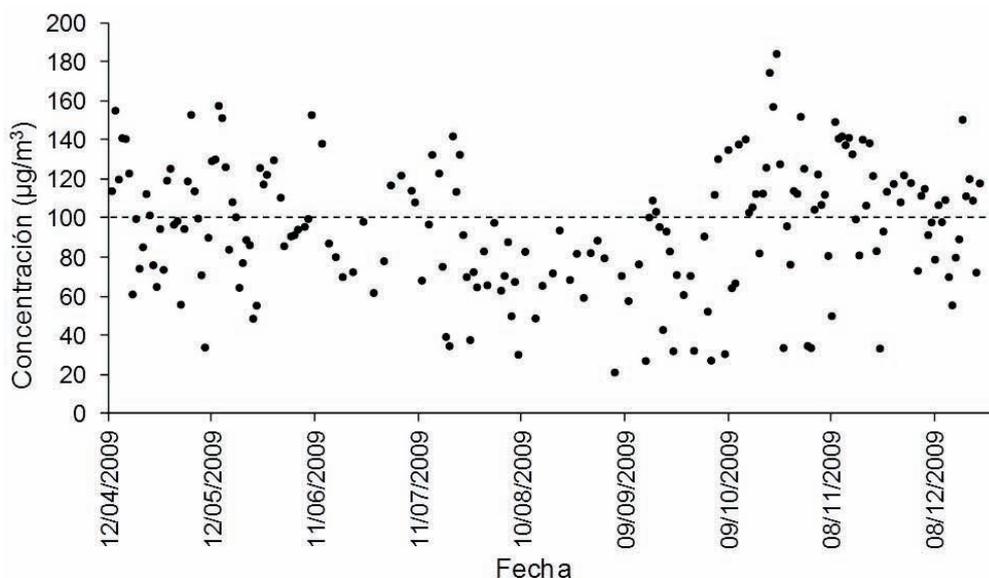


Figura 3 Variación diaria de la concentración de referencia de PM₁₀ durante el período de investigación

Debido a que PM_{10} fue el contaminante que presentó el mayor número de excedencias, se procedió a estudiar la variación diaria de su concentración y la relación con los parámetros meteorológicos medidos. Los resultados mostraron que existió una correlación positiva media de PM_{10} con la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar; los coeficientes de correlación lineal fueron 0,58, 0,52 y 0,53, respectivamente. A partir de lo anterior, los resultados sugirieron para el área de investigación que durante los períodos de tiempo seco la concentración de PM_{10} tendió a aumentar. Las máximas concentraciones diarias de PM_{10} se registraron en los meses de octubre (2009/10/23: $184,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y 2009/10/21: $174,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y mayo (2009/05/14: $158,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En este sentido, Pateraki et al. [27] y Sfetsos y Vlachogiannis [28] encontraron resultados similares al evaluar la relación entre las excedencias diarias de PM_{10} ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y los patrones meteorológicos de la ciudad de Atenas (Grecia).

Adicionalmente, se procedió a evaluar la variación media horaria de la concentración de PM_{10} en la zona de investigación del laboratorio móvil. Los resultados mostraron con respecto al límite diario establecido por la legislación colombiana para PM_{10} (24 h), que éste fue superado el 58,3% de las veces durante el día (ver figura 4). Adicionalmente, se evidenció que en la franja horaria entre las 6 y 19 horas se registraron las mayores concentraciones. En este sentido, se identificaron dos picos con respecto a la variación media horaria de la concentración de PM_{10} : (i) entre las 6 y 9 horas, y (ii) entre las 17 y 20 horas; presentándose valores máximos promedio de $159,4$ y $125,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 7 y 19 horas, respectivamente (ver figura 4). Como se pudo observar, la concentración máxima promedio registrada durante el primer pico diario fue 1,27 veces mayor con respecto de la concentración máxima del segundo pico diario.

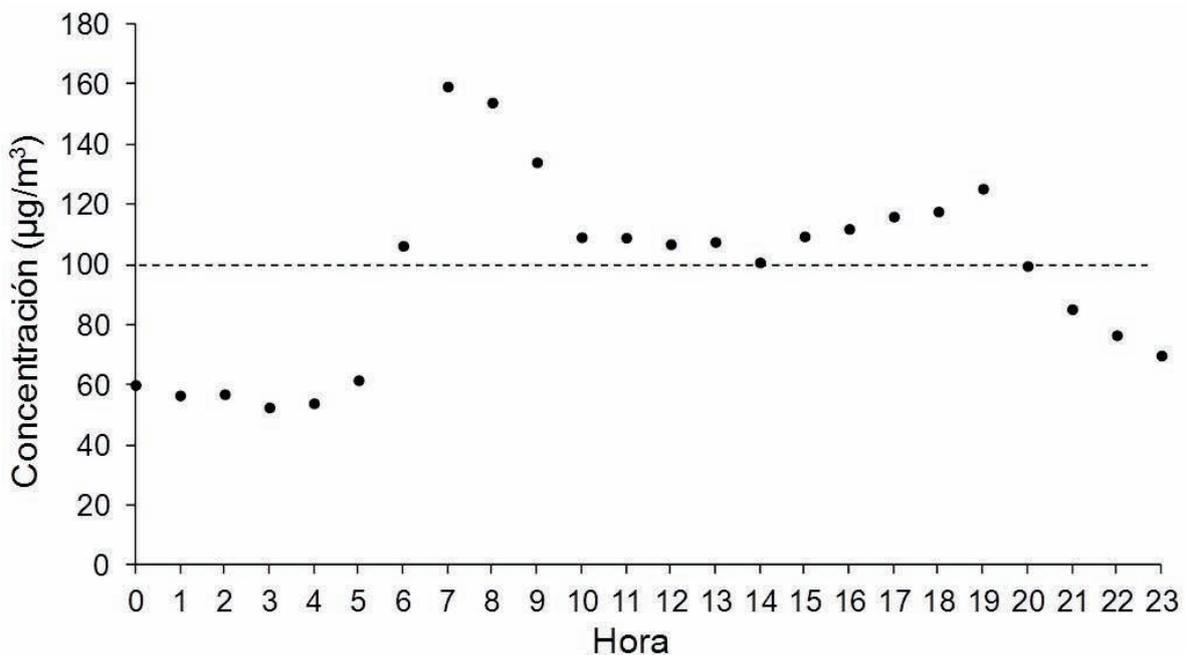


Figura 4 Variación media horaria de la concentración de referencia de PM_{10} durante el período de investigación

A partir de lo anterior, los resultados sugirieron que el primer pico registrado en la concentración de PM_{10} (i.e., entre las 6 y 9 horas) probablemente se debió a una interacción entre las fuentes móviles y fijas; es decir, posiblemente estuvo asociado con el inicio de las actividades en las empresas, implicando un aumento en el transporte público y privado de pasajeros y de carga, y una puesta en marcha de las fuentes fijas (p.ej., calderas y hornos) del área de investigación (ver tabla 1). En este sentido, Pachón y Sarmiento (2008) [29] reportaron que durante los días de suspensión del transporte público en la ciudad de Bogotá D.C. 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 este sector de la ciudad (ver tabla 1).

Adicionalmente, los resultados sugirieron que el segundo pico registrado en la concentración de PM_{10} (i.e., entre las 17 y 20 horas) estuvo principalmente asociado con un aumento del transporte público y privado de pasajeros, demandado por la terminación de la jornada laboral de las empresas del área de investigación. Es importante mencionar, que el laboratorio móvil se localizó a una distancia de 230 m con respecto de la Calle 13; la cual registró para el período de

investigación una densidad media de tráfico de 118421 vehículos por día (ver figura 1 y tabla 1). Desde el punto de vista de la salud pública, Keuken et al. [30] reportaron que la población urbana que vive o labora cerca de vías con una alta densidad de tráfico se encuentra en riesgo.

Se evaluaron los estados excepcionales por contaminación del aire (i.e., de prevención, alerta y emergencia) establecidos por la legislación colombiana (Resolución 610 de 2010) [3]. La anterior evaluación se realizó utilizando las concentraciones máximas registradas por el laboratorio móvil durante el período de investigación, a condiciones de referencia y empleando la media móvil según el tiempo de exposición establecido por la legislación colombiana para cada contaminante (ver tabla 4). Como se pudo observar, las máximas concentraciones registradas durante el período de muestreo no generaron un nivel de prevención, alerta o emergencia en el área de investigación del laboratorio móvil. En este sentido, las concentraciones máximas de PM_{10} (24 h), SO_2 (24 h), NO_2 (1 h), O_3 (1 h) y CO (8 h) fueron 1,27, 7,94, 1,30, 3,21 y 845,8 veces inferiores al límite establecido por la legislación colombiana para el nivel de prevención.

Tabla 4 Evaluación de los estados excepcionales de contaminación del aire para la zona de investigación

Contaminante	Prevención^a $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Alerta^a $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Emergencia^a $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máxima^b $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM_{10} (24 h)	300	400	500	235,4
SO_2 (24 h)	500	1000	1600	62,9
NO_2 (1 h)	400	800	2000	307,9
O_3 (1 h)	350	700	1000	108,9
CO (8 h)	17000	34000	46000	20,1

Nota. ^a: Resolución 610 de 2010 [3]. ^b: Concentración máxima a condiciones de referencia (laboratorio móvil)

Por otro lado, se realizó una evaluación del índice de calidad del aire (ICA) para la zona de investigación del laboratorio móvil utilizando la metodología propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU.

[26]; la evaluación se realizó a partir de las concentraciones medias y máximas registradas por el laboratorio móvil con el objeto de establecer un rango de valoración. Los resultados sugirieron que PM_{10} (24 h) fue el único contaminante que

generó efectos sobre la salud y sobre el cual se debieron implementar acciones preventivas.

El ICA bajo condiciones medias de concentración de PM_{10} (i.e., de 71,1) mostró que la calidad del aire en la zona de investigación del laboratorio móvil era moderada, sugiriendo probables síntomas respiratorios en individuos no sensibles y agravamiento de personas con enfermedades cardiopulmonares y de adultos mayores; como acción preventiva se recomienda la reducción de la actividad física fuerte o prolongada [26]. En este sentido, Arciniegas et al. [10] reportaron una relación positiva entre las concentraciones de PM_{10} y el número de consultas por enfermedad respiratoria para un período de latencia de seis días, aun cuando los niveles alcanzados en la localidad de Puente Aranda no excedieron las normas ambientales colombianas.

Por otro lado, el ICA bajo condiciones máximas de concentración de PM_{10} (i.e., de 140,8) evidenció que la calidad del aire en la zona de investigación probablemente era dañina para la salud de grupos sensibles. Lo anterior, sugirió un factible aumento del riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles (i.e., niños y los mayores de 60 años), y agravamiento y mortalidad prematura de personas con enfermedades cardiopulmonares y de adultos mayores; como acción preventiva se recomienda evitar la actividad física fuerte o

prolongada [26]. En este sentido, Blanco [31] reportó la existencia de una asociación entre el PM_{10} y los microorganismos considerados como patógenos oportunistas. El investigador sugirió unas condiciones óptimas para la ocurrencia de infección respiratoria aguda (IRA) en los residentes de la localidad de Puente Aranda; principalmente, en los niños menores de 14 años.

Se realizó una evaluación espacial de la variación diaria de los contaminantes atmosféricos a partir de los datos registrados por el laboratorio móvil y las dos estaciones de referencia: (i) la estación fija SDA y (ii) la estación móvil SDA (ver figura 1 y tabla 5). Como se pudo observar, las mayores concentraciones de contaminantes atmosféricos se registraron en el lugar de localización del laboratorio móvil; excepto para SO_2 y O_3 , donde las máximas concentraciones se registraron en los lugares de localización de las estaciones móvil SDA y fija SDA, respectivamente. Las concentraciones promedio diarias de PM_{10} , NO_2 , NO_x , NO y CO registradas por el laboratorio móvil fueron 1,30, 2,36, 2,44, 2,42 y 3,0 veces superiores (promedio: 2,30) con respecto de las registradas por la estación móvil SDA. Con respecto a la estación fija SDA, las concentraciones registradas por el laboratorio móvil de NO_2 , NO_x , NO , SO_2 y CO fueron 1,29, 1,81, 2,14, 1,81 y 3,0 veces superiores (promedio: 2,01), respectivamente.

Tabla 5 Concentraciones promedio diarias de referencia para los contaminantes del aire en las áreas de investigación

Zona	Contaminante						
	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	NO_2 (ppb)	NO_x (ppb)	NO (ppb)	SO_2 (ppb)	CO (ppm)	O_3 (ppb)
Laboratorio móvil	95,6	32,5	112,6	79,0	10,7	3,0	12,3
Móvil SDA ^a	73,8	13,8	46,1	32,6	11,3	1,0	14,1
Fija SDA ^a	-	25,2	62,2	36,9	5,9	1,0	16,6

Nota. ^a: Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá D.C.

Finalmente, se realizó un análisis de correlación entre el laboratorio móvil y las dos estaciones utilizadas como de referencia (i.e., móvil SDA y fija SDA) con el objeto de profundizar en la afinidad del origen de los contaminantes atmosféricos. En este análisis se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson y los datos horarios de concentración (ver tabla 3). Los resultados mostraron que existió una correlación positiva muy fuerte entre las concentraciones de O_3 registradas por el laboratorio móvil, y las registradas por las estaciones móvil SDA ($r = 0,97$) y fija SDA ($r = 0,97$); sugiriendo para la totalidad de la zona de investigación una tendencia similar en el comportamiento temporal de este contaminante (i.e., por fuentes dominantes). Consecuentemente, se observó la existencia de una correlación positiva considerable entre las concentraciones de NO_x registradas por el laboratorio móvil, y las registradas por las estaciones móvil SDA ($r = 0,86$) y fija SDA ($r = 0,77$). En este sentido, Tong et al. [32] estudiaron la relación existente entre NO_x y O_3 en 48 estados de EE.UU.; como era de esperar, los investigadores reportaron que los principales precursores de O_3 estaban asociados con emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles (i.e., por combustión) y, que además, en su cuantificación se debían tener en cuenta las concentraciones de fondo del área en evaluación.

Con respecto a PM_{10} , los resultados mostraron la existencia de una relación positiva considerable entre el laboratorio móvil y la estación móvil SDA ($r = 0,87$). Por lo tanto, se sugirió una tendencia similar en la variación temporal de este contaminante atmosférico dentro de la zona industrial de la localidad de Puente Aranda (i.e., por fuentes dominantes). Por último, las concentraciones de SO_2 y CO registradas por el laboratorio móvil y las estaciones de referencia presentaron una correlación positiva entre débil y media; sugiriendo para estos contaminantes atmosféricos una reducción de las fuentes dominantes en el área de investigación.

Conclusiones

Con respecto a la legislación colombiana (Resolución 610 de 2010), los resultados muestran para la localidad de Puente Aranda que PM_{10} (24 horas) es el contaminante atmosférico que presenta el mayor número de excedencias durante el período de investigación (47,3%); seguido de NO_2 (1 hora) y O_3 (8 horas) con un 0,3 y 0,1% de excedencias, respectivamente. No obstante, la evaluación de los estados excepcionales por contaminación del aire muestra que las máximas concentraciones registradas no generan un nivel de prevención en el área de investigación del laboratorio móvil (i.e., en la zona industrial de Puente Aranda).

Por otro lado, la evaluación del índice de calidad del aire mediante la metodología propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., muestra bajo condiciones medias, que PM_{10} (24 h) es un contaminante que genera efectos sobre la salud y sobre el cual se deben implementar acciones preventivas en la localidad de Puente Aranda (ICA = 71,1). Por lo tanto, los resultados sugieren que los estados excepcionales por contaminación del aire (i.e., de prevención, alerta y emergencia) establecidos por la legislación colombiana para PM_{10} (Resolución 610 de 2010), probablemente requieren de una re-evaluación por parte de las instituciones encargadas del control de la contaminación del aire. Lo anterior, con el objeto de tener coherencia entre la concentración máxima permisible (i.e., asociada con el número de excedencias) y el estado excepcional por contaminación de PM_{10} establecidos por la legislación colombiana; los cuales carecen de una relación lógica en el presente estudio.

Adicionalmente, los resultados muestran con respecto al límite diario establecido por la legislación colombiana para PM_{10} ($100 \mu g/m^3$), que éste es superado el 58,3% de las veces durante el día. Se identificaron dos picos con respecto a la variación media horaria de la concentración de PM_{10} : (i) entre las 6 y 9 horas, y (ii) entre las 17 y 20 horas. En este sentido, la concentración

del primer pico diario es 1,27 veces mayor con respecto de la concentración del segundo pico.

La evaluación de la distribución espacial de todos los contaminantes atmosféricos (PM_{10} , NO_2 , NO_x , NO y CO) en la zona industrial de la localidad de Puente Aranda muestra, que las concentraciones registradas por el laboratorio móvil (zona central) son en promedio 2,30 y 2,01 veces superiores a las registradas por las estaciones móvil SDA (zona oriental) y fija SDA (zona occidental), respectivamente. Excepto para SO_2 y O_3 , donde las máximas concentraciones se registran en los lugares de localización de las estaciones móvil SDA y fija SDA, respectivamente.

Con respecto a la variación temporal de los contaminantes atmosféricos, los resultados sugieren una tendencia similar en el comportamiento de PM_{10} , O_3 y NO_x sobre la totalidad de la zona industrial de la localidad Puente Aranda; es decir, probablemente por la existencia de fuentes dominantes. Adicionalmente, los resultados muestran que existe una correlación positiva media de PM_{10} con la temperatura ($r = 0,58$), la velocidad del viento ($r = 0,52$) y la radiación solar ($r = 0,53$), sugiriendo que durante los períodos de tiempo seco la concentración de PM_{10} tiende a aumentar en el área de investigación. En este sentido, las máximas concentraciones diarias de PM_{10} se registran en la segunda mitad del mes de octubre.

Finalmente, los resultados obtenidos son útiles para las instituciones públicas encargadas de la gestión de la calidad del aire, para el diseño, implementación y mejoramiento de los sistemas de control de la contaminación atmosférica en la localidad de Puente Aranda o en localidades similares con un uso predominantemente industrial. Adicionalmente, la presente investigación se constituye en un punto de partida para re-evaluar los límites establecidos por la legislación colombiana para PM_{10} (24 horas); es decir, en lo relacionado con el nivel máximo permisible y los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá D.C.-Colombia (SDA), y el Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital F.J.C. (Colombia).

Referencias

1. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución número 601 de 2006: por la cual se Establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión para todo el Territorio Nacional en condiciones de referencia”. Ed. MAVDT. Bogotá DC., Colombia. 2006. pp. 1-13.
2. Secretaría Distrital de Ambiente. “Informe Anual de la Red de Calidad de Aire de Bogotá D.C. Año 2006”. Ed. SDA. Bogotá DC., Colombia. 2007. pp. 1-105.
3. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “Resolución Número 610 de 2010: por la cual se Modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006. Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión”. Ed. MAVDT. Bogotá DC., Colombia. 2010. pp. 1-8.
4. M. Gaitán, J. Cancino, E. Behrentz. “Análisis de la Calidad del Aire en Bogotá”. *Rev. Ing.* Vol. 26. 2007. pp. 81-92.
5. M. Pascal, M. Corso, O. Chanel, C. Declercq, C. Badaloni, G. Cesaroni, S. Henschel, K. Meister, D. Haluza, P. Martin, S. Medina. “Assessing the Public Health Impacts of Urban Air Pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom Project”. *Sci. Total Environ.* Vol. 449. 2013. pp. 390-400.
6. A. Karanasiou, N. Moreno, T. Moreno, M. Viana, F. de Leeuw, X. Querol. “Health Effects from Sahara Dust Episodes in Europe: Literature Review and Research Gaps”. *Environ. Int.* Vol. 47. 2012. pp. 107-114.
7. M. Baccini, A. Biggeri, C. Lagazio, A. Lertxundi, M. Saez. “Parametric and Semi-parametric Approaches in the Analysis of Short-term Effects of air Pollution on Health”. *Comput. Stat. Data An.* Vol. 51. 2007. pp. 4324-4336.
8. J. Wallace, P. Nair, P. Kanaroglou. “Atmospheric Remote Sensing to Detect Effects of Temperature Inversions on Sputum Cell Counts in Airway Diseases”. *Environ. Res.* Vol. 110. 2010. pp. 624-632.
9. A. Whittaker, K. Bérubé, T. Jones, R. Maynard, R. Richards. “Killer smog of London, 50 Years on: Particle Properties and Oxidative Capacity”. *Sci. Total Environ.* Vol. 334-335. 2004. pp. 435-445.

10. A. Arciniegas, C. Rodríguez, J. Pachón, H. Sarmiento, L. Hernández. "Estudio de la Morbilidad en Niños Menores a Cinco Años por Enfermedad Respiratoria Aguda y su relación con la Concentración de Partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá". *Acta Nova*. Vol. 3. 2006. pp. 145-154.
11. N. Bukowiecki, J. Dommen, A. Prévôt, R. Richter, E. Weingartner, U. Baltensperger. "A Mobile Pollutant Measurement Laboratory-measuring Gas Phase and Aerosol Ambient Concentrations with High Spatial and Temporal Resolution". *Atmos. Environ.* Vol. 36. 2002. pp. 5569-5579.
12. J. Wallace, D. Corr, P. Kanaroglou. "Topographic and Spatial Impacts of Temperature Inversions on Air Quality Using Mobile Air Pollution Surveys". *Sci. Total Environ.* Vol. 408. 2010. pp. 5086-5096.
13. L. Pirjola, H. Parviainen, T. Hussein, A. Valli, K. Hämeri, P. Aalto, A. Virtanen, J. Keskinen, T. A. Pakkanen, T. Mäkelä, R. Hillamo. "Sniffer-a Novel Tool for Chasing Vehicles and Measuring Traffic Pollutants". *Atmos. Environ.* Vol. 38. 2004. pp. 3625-3635.
14. M. Wang, T. Zhu, J. Zheng, R. Zhang, S. Zhang, X. Xie, Y. Han, Y. Li. "Use of a Mobile Laboratory to Evaluate Changes in on-road Air Pollutants During the Beijing 2008 Summer Olympics". *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 9. 2009. pp. 8247-8263.
15. L. Pirjola, T. Lähde, J. Niemi, A. Kousa, T. Rönkkö, P. Karjalainen, J. Keskinen, A. Frey, R. Hillamo. "Spatial and Temporal Characterization of Traffic Emissions in Urban Microenvironments with a Mobile Laboratory". *Atmos. Environ.* Vol. 63. 2012. pp. 156-167.
16. P. DeLuca, D. Corr, J. Wallace, P. Kanaroglou. "Effective Mitigation Efforts to Reduce Road Dust Near Industrial sites: Assessment by Mobile Pollution Surveys". *J. Environ. Manage.* Vol. 98. 2012. pp. 112-118.
17. L. Padró, A. Patton, J. Trull, W. Zamore, D. Brugge, J. Durant. "Mobile Monitoring of Particle Number Concentration and Other Traffic-related air Pollutants in a Near-highway Neighborhood Over the Course of a Year". *Atmos. Environ.* Vol. 61. 2012. pp. 253-264.
18. D. Westerdahl, S. Fruin, T. Sax, P. Fine, C. Sioutas. "Mobile Platform Measurements of Ultrafine Particles and Associated Pollutant Concentrations on Freeways and Residential Streets in Los Angeles". *Atmos. Environ.* Vol. 39. 2005. pp. 3597-3610.
19. L. Zwack, C. Paciorek, J. Spengler, J. Levy. "Characterizing Local Traffic Contributions to Particulate air Pollution in Street Canyons Using Mobile Monitoring Techniques". *Atmos. Environ.* Vol. 45. 2011. pp. 2507-2514.
20. P. Maciejczyk, J. Offenberg, J. Clemente, M. Blaustein, G. Thurston, L. Chi. "Ambient Pollutant Concentrations Measured by a Mobile Laboratory in South Bronx, NY". *Atmos. Environ.* Vol. 38. 2004. pp. 5283-5294.
21. M. Giraldo, M. Solano, C. Uribe. "La Importancia de la Responsabilidad Ambiental Empresarial en la Localidad de Puente Aranda en Bogotá D.C.". *Rev. Academia Virtualidad*. Vol. 2. 2009. pp. 81-108.
22. M. Fandiño, E. Behrentz. "Actualización del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas para la Ciudad de Bogotá a través de Mediciones Directas". Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes. Bogotá DC., Colombia. 2009. pp. 1-13.
23. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. "Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire". Ed. MAVDT. Bogotá DC., Colombia. 2010. pp. 1-141.
24. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. "Validación de Datos Generados en la Estación Automática de Monitoreo Atmosférico de la DGCENICA (CE1), ubicada en la UAM Iztapalapa". Ed. DGCENICA. México DF., México. 2006. pp. 1-23.
25. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. "Protocolo para la Vigilancia y Seguimiento del Módulo Aire del Sistema de Información Ambiental". Ed. IDEAM. Bogotá DC., Colombia. 2005. pp. 1-116.
26. U.S. Environmental Protection Agency. "Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality-the Air Quality Index (AQI)". 1st ed. Ed. U.S.EPA. Durham, USA. 2012. pp. 1-29.
27. S. Pateraki, D. Asimakopoulos, H. Flocas, T. Maggos, Ch. Vasilakos. "The Role of Meteorology on Different Sized Aerosol Fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10})". *Sci. Total Environ.* Vol. 419. 2012. pp. 124-135.
28. A. Sfetsos, D. Vlachogiannis. "A New Approach to Discovering the Causal Relationship Between Meteorological Patterns and PM₁₀ Exceedances". *Atmos. Res.* Vol. 98. 2010. pp. 500-511.
29. J. Pachón, H. Sarmiento. "Análisis Espacio-temporal de la Concentración de Metales Pesados en la Localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Vol. 43. 2008. pp. 120-133.
30. M. Keuken, M. Moerman, M. Voogt, M. Blom, E. Weijers, T. Röckmann, U. Dusek. "Source Contributions to PM_{2.5} and PM₁₀ at an Urban Background and a Street Location". *Atmos. Environ.* Vol. 71. 2013. pp. 26-35.
31. L. Blanco. "Caracterización Microbiológica del Material Particulado como Factor de Riesgo sobre la Salud en la Localidad de Puente Aranda". *Acta Nova*. Vol. 3. 2006. pp. 257-285.
32. D. Tong, N. Muller, H. Kan, R. Mendelsohn. "Using Air Quality Modeling to Study Source-receptor Relationships Between Nitrogen Oxides Emissions and Ozone Exposures Over the United States". *Environ. Int.* Vol. 35. 2009. pp. 1109-1117.