

Calidad del aire en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría por partículas e inmisiones de NO₂ y SO₂

Liliette Barcelona Cazanave¹; Rosemary López Lee²; Miriam Martínez Varona³; Saturnino F. Pire Rivas⁴; Anel Hernández Garcés⁵; Luis F. Cuesta Cedeño⁶ y Grizel Pérez⁷

^{1, 4, 5} Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE); Cuba. lbc@quimica.cujae.edu.cu;

sapiri@quimica.cujae.edu.cu; anel@quimica.cujae.edu.cu

²Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba. rosemary.lopez@insmet.cu

Recibido: 7 sept. 2015

Aceptado: 19 oct. 2015

RESUMEN

El aumento de las actividades urbanas e industriales, ha provocado en la actualidad que las cantidades de contaminantes emitidas a la atmósfera se agudicen, por lo que el estudio de la contaminación atmosférica constituye un tema de especial interés. Se realizó un estudio de la calidad del aire en la Cujae, empleando técnicas de monitoreo atmosférico como son, el muestreo pasivo de NO₂ y SO₂ con captadores tipo Radiello cuyo principio de funcionamiento está basado en la primera Ley de Fick. Las concentraciones promedio obtenidas para ambos gases fueron de 7,65 µg/m³ y 1,53 µg/m³ respectivamente. El muestreo activo de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) se realizó con muestreadores de bajo volumen de aire y filtro de cuarzo (ECHO-PM), los mayores valores de concentración medidos fueron de 85 µg/m³ y 61 µg/m³ respectivamente. Utilizando factores de emisión se obtuvo el modelos de dispersión DISPER5.2 de material particulado. Se compararon los resultados de concentración obtenidos con los valores de concentraciones máximas admisibles establecidos en la norma cubana de calidad del aire NC 1020:2014, encontrándose que los gases no sobrepasaban las mismas, no siendo así para el material particulado.

PALABRAS CLAVE: Contaminación atmosférica; Inmisión; Material particulado; Muestreo pasivo; Dispersión; Calidad del aire

ABSTRACT

Título del artículo en inglés y en negrita. Increase in urban and industrial activities, has caused that the amounts of pollutants emitted into the atmosphere become more acute, so the study of atmospheric pollution is a topic of special interest. A study of air quality in the Cujae was performed using techniques such as atmospheric monitoring, passive sampling of NO₂ and SO₂ with Radiello type sensors whose operating principle is based on the first law of Fick. Average concentrations were obtained for both gases 7.65 µg/m³ and 1.53µg/m³ respectively. Active sampling of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) was done using low air volume and filter quartz (ECHO-PM), the highest concentration values measured were 85 µg/m³ and 61 µg/m³ respectively. Dispersion models DISPER5.2 of particulate material was obtained using emission factors. Results of concentration values obtained were compared with the maximum allowable concentrations established by Cuban air quality standard NC 1020:2014 finding that the gas did not exceed them, not so for particulate matter.

KEYWORDS: Atmospheric pollution; Glc; Particulate matter; Passive sampling; Dispersion; Air quality

INTRODUCCIÓN

La Revolución Científico Técnica es un fenómeno que ocurre continuamente a mayor o menor escala, pero el contexto socio-económico político es el que permite su realización verdadera y ocurre ya sea por una demanda de la ciencia, de la tecnología o de la producción. Este desarrollo tecnológico trajo como consecuencias el aumento de las actividades productivas del hombre y la generación de una mayor cantidad de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, cuyo impacto acumulativo comenzó a ser tema de preocupación de la comunidad científica internacional al darse cuenta que la naturaleza por sí sola no era capaz de revertir las afectaciones que estaba sufriendo a causa del crecimiento tecnológico humano.

La contaminación atmosférica es la presencia en la atmósfera de residuos o productos secundarios (sustancias contaminantes) que pueden ser de naturaleza física, biológica o química y pueden aparecer en todos los estados físicos (sólido, líquido o gaseoso). Puede ser provocada por actividades naturales o generadas por la acción del hombre. Constituye hoy uno de los principales problemas ambientales de las ciudades del mundo, tanto en los países desarrollados como en los de mayor atraso tecnológico; en los primeros, por un alto volumen y producción industrial y un flujo intenso de vehículos automotores, mientras que en los segundos es por causa del desarrollo no planificado de las escasas industrias, el uso de tecnologías obsoletas en la producción, los servicios y el transporte, la mala calidad del saneamiento básico y el crecimiento urbanístico no planificado (Díaz et al, 1998).

Las partículas en suspensión conocidas como material particulado (PM) o aerosol atmosférico se definen como la mezcla heterogénea de partículas sólidas y/o líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire, que se acumulan en la atmósfera generada a partir de alguna actividad antropogénica o natural. El material particulado (PM) afecta a más personas que cualquier otro contaminante y sus principales componentes son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales y el agua. Estas se clasifican en función de su diámetro aerodinámico en PM_{10} (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a $10\ \mu m$) y $PM_{2,5}$ (diámetro aerodinámico inferior a $2,5\ \mu m$). Estas últimas suponen mayor peligro ya que la capacidad de penetración de las mismas en las vías respiratorias aumenta al disminuir el tamaño (WHO, 2011).

Cada año, se generan miles de millones de toneladas de contaminantes. Los contaminantes atmosféricos más frecuentes son el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, el ozono, el dióxido de carbono y las partículas en suspensión.

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas importante, tóxico para la biota y es un indicador de la calidad de aire y de la actividad antropogénica. Forma parte de un grupo de contaminantes gaseosos que se producen como consecuencia del tráfico rodado, la producción de energía y de otros procesos de quema de combustibles fósiles. Su presencia en el aire contribuye a la formación y modificación de otros contaminantes del aire tales como el ozono y las partículas en suspensión, así como la aparición de la lluvia ácida (Díaz et al, 2007).

El dióxido de azufre (SO_2), por otro lado 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. Es un gas que puede ser emitido a la atmósfera por fuentes antrópicas y naturales. Las principales fuentes antrópicas son las asociadas a la quema de combustibles fósiles, biomasa y a la fundición de metales. Las emisiones naturales de azufre son de los océanos en la forma de dimetilsulfuro (DMS) y las emisiones volcánicas. Dichas emisiones contribuyen a la formación igualmente de las lluvias ácidas.

La medición de la composición química atmosférica constituye la base que permite abordar la evaluación de la calidad del aire. Dado el elevado costo que presupone mantener redes de estaciones de monitoreo, se efectúan mediciones de corto período para estimar los niveles de contaminación utilizando técnicas de modelación de dispersión de contaminantes (López, C. 2006). Se definen entonces tres metodologías principales para el monitoreo de la calidad del aire, los muestreadores pasivos, muestreadores activos y analizadores automáticos (López, L. 2011).

En la actualidad, la modelación de la contaminación atmosférica es imprescindible para desarrollar diferentes tareas que tienen como objetivo garantizar la buena calidad del aire, y así impedir que alguna alteración pueda dañar a las personas o al medio ambiente (Zannetti, 1990).

La modelación de la calidad del aire juega un papel importante en el establecimiento de legislaciones para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos, determinando los valores máximos permitidos para los caudales y concentraciones de emisión; así como en la evaluación de estrategias de control de emisiones; en la selección de localizaciones de futuros focos emisores, con el fin de minimizar el impacto sobre el entorno; en el establecimiento de planes de intervención inmediata en el control de episodios de elevada contaminación en determinadas regiones: sistemas de alerta y reducción de emisiones en tiempo real; la identificación de responsabilidades en los niveles de contaminación existentes en cada momento, mediante la evaluación de la interrelación directa entre el emisor y el receptor, entre otros.

Aunque, a pesar de su utilidad, los modelos de calidad de aire no son la solución final al problema de la contaminación atmosférica, sí permiten suplir las carencias que tienen las medidas de campo en cuanto a resolución espacial y temporal, puesto que una red permanente de sensores automáticos, con la resolución espacial que pueden

proporcionar algunos modelos, resultaría extremadamente costosa de instalar y mantener de forma permanente en correcto funcionamiento. Igualmente viabilizan la identificación de errores en la medición de la contaminación, ya sea por fallos en el sistema de medida o por una localización incorrecta del instrumento; esto último implica que los modelos de calidad del aire son una herramienta muy útil en la definición de redes óptimas de seguimiento de la contaminación atmosférica.

En el caso de focos de emisión industriales, los modelos de calidad de aire posibilitan la definición de la altura de emisión necesaria para garantizar que sus emisiones no afecten a la región circundante. Estos modelos también brindan capacidad de predicción del comportamiento de contaminantes atmosféricos, para la prevención de alarmas de contaminación, dado que un modelo bien calibrado y suficientemente validado puede representar adecuadamente la realidad, su dinámica y sus respuestas a diferentes perturbaciones en el futuro. En definitiva, una parte importante del estudio de la contaminación atmosférica requiere el desarrollo y aplicación de modelos capaces de describir y predecir el comportamiento de los contaminantes atmosféricos.

Existen varios modelos, dentro de estos se encuentra el DISPER 5.2, que responde a la teoría de los modelos gaussianos. El mismo establece la concentración de contaminante en cada punto afectado del terreno producido por el conjunto de las fuentes emisoras, teniendo en cuenta las propiedades del contaminante y el estado de la atmósfera. Dicho programa tiene ciertas ventajas ya que es de uso fácil, genera mapas con las concentraciones de contaminante en planos a la altura deseada y a nivel de la superficie del terreno y se pueden evaluar los efectos de la contaminación a largo plazo ya que permite realizar promedios temporales por horas, días y meses, variando las condiciones del entorno y de la fuente contaminante. El modelo puede utilizarse para simular fuentes puntuales, líneas emisoras y áreas emisoras.

El Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), situado en el municipio Marianao, ocupa un área de 398 kilómetros cuadrados y más de 40 edificios. Creado en 1964, constituye el mayor centro del país en estudios de carreras de ingeniería y arquitectura. En su campus, tiene aulas, laboratorios, bibliotecas, salas de conferencias, varios centros de investigaciones, dormitorios, servicios de comedores, estudiantes becarios, cafeterías, oficinas administrativas y de correos, un cine-teatro, servicios hoteleros, campos deportivos, servicios médicos, talleres, almacenes y parque de autobuses (CUJAE, 2015). Además, en sus alrededores existen asentamientos humanos de alta densidad de población, por lo que es muy necesaria la realización de estudios de calidad de aire en esta zona.

El presente trabajo tiene como objetivo general estudiar la calidad del aire en la Cujae por material particulado e inmisiones de NO_2 y SO_2 mediante técnicas de muestreo activo, pasivo y el empleo del modelo de dispersión DISPER5.2.

METODOLOGÍA

Identificación y clasificación de las fuentes

La clasificación de las fuentes depende del tipo de proceso o actividad industrial que realiza, de esta manera se establecen las clases I, II, III, IV y V. Las instalaciones sanitarias como los vertederos se agrupan en categoría I con un radio mínimo admisible de 1000 m. Las instalaciones que pertenecen a la industria textil, se van a agrupar en clase III, con un radio mínimo admisible de 300 m. Con respecto a las que se dedican a la elaboración de alimentos se van a agrupar en clase IV y V con radios mínimos de 100 y 50 m respectivamente. Los requisitos higiénicos sanitarios establecidos en la norma cubana NC 1020:2014, establecen que entre las fuentes emisoras y las áreas de descanso de la población tiene que existir una distancia de seguridad denominada radio de protección sanitaria, que va a delimitar la zona de asentamiento poblacional del área donde se encuentran ubicadas las industrias, de esta manera se intenta priorizar que los receptores no estén expuestos a niveles elevados de contaminación (ONN, 2014).

(González, 2010) realizó un inventario detallado de fuentes ubicadas en el entorno de la Cujae, obteniendo la información que se establece en la NC 242:2005 para este tipo de inventario, las cuales se ubicaron en los municipios de Boyeros, Playa, Marianao y La Lisa. Las tablas 1 y 2 muestran las características de los combustibles quemados en las fuentes identificadas.

Ensayo	Norma de ensayo	Resultado
Valor Calórico Superior (kcal/kg)	ASTM D 240	10343
Valor Calórico Inferior (kcal/kg)	ASTM D 240	9700,6
Gravedad API(° API)	ASTM D 287	15
Gravedad Específica a 60 °F	ASTM D 1298	0,9659
Agua %(m/m)	ASTM D 95	<0,05
Azufre %(m/m)	ASTM D 129	2,01
Hidrógeno %(m/m)	Por cálculo	11,89
Carbono %(m/m)	Por cálculo	85,05
Cenizas%(m/m)	ASTM D 482	0,028
Viscosidad 50 °C (mm ² /s)	ASTM D 445	382,7345
Relación C/H	Por cálculo	7,15

Tabla 1. Datos del Fuel oil

Ensayo	Norma de ensayo	Resultado
Valor Calórico Superior (kcal/kg)	ASTM D 240	10846
Valor Calórico Inferior (kcal/kg)	ASTM D 240	10085,1
Gravedad API(° API)	ASTM D 287	33,8
Gravedad Específica a 60 °F	ASTM D 1298	0,8473
Agua %(m/m)	ASTM D 95	0,01
Azufre %(m/m)	ASTM D 129	0,59
Hidrógeno %(m/m)	Por cálculo	14,09
Carbono %(m/m)	Por cálculo	84,31
Viscosidad 50 °C (mm ² /s)	ASTM D 445	323,99
Relación C/H	Por cálculo	5,98

Tabla 2. Datos del Gas oil

La ubicación espacial de las fuentes se realizó mediante el software Google Earth, que permite una visualización superior del área considerada, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Ubicación de las fuentes en Google Earth

Cálculo de las emisiones de los contaminantes

Un factor de emisión es un valor representativo o promedio estadístico del flujo de contaminante en estudio, que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada con la emisión de mismo. Los factores de emisión se obtienen de documentos especiales emitidos por las agencias o autoridades oficiales responsables de la protección del medio ambiente. Una de ellas es la Environmental Protection Agency (EPA), a través de sus documentos conocidos como serie AP-42. Estos factores usualmente se expresan como peso del contaminante dividido entre el peso, volumen, distancia o duración de la actividad que genera el contaminante (Ladrilleras, 2012).

Para calcular las emisiones de las calderas en las fuentes identificadas se empleó la serie de factores AP-42, publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. La tabla 3 muestra los factores de emisión extraídos de esta base de datos para PM₁₀.

	Fuel oil	Gas oil
PM _{2,5}	0,57	0,094
PM ₁₀	1,53	0,12

Tabla 3. Factores de emisión kg/m³ en reportados por la EPA. (EPA, 2010)

Para el grupo electrógeno Habana 220 se utilizó el factor de emisión que tiene un valor de 0,0887 kg/m³ para PM₁₀, no encontrándose valores para PM_{2,5}; por lo que esta fuente no se incluye en la aplicación del modelo de dispersión.

La emisión se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$E = A \cdot EF \cdot \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad \text{ec.1}$$

Donde:

E: emisiones (g/s)

A: intensidad de la actividad o intensidad del proceso productivo, en nuestro caso se corresponden con los valores del consumo de combustible.

EF: factor de emisión (kg/m³).

ER: eficiencia global de reducción de la emisión. En este caso, este término es cero, pues en las calderas incluidas en este estudio no existen dispositivos que controlen las emisiones.

Cálculo de los flujos de gases de combustión

El flujo de gases emitido se obtuvo por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo} = V \cdot C \quad \text{ec.2}$$

Donde:

Flujo: flujo de los gases de combustión (m³/s).

V: volumen de gases húmedos expresado en m³/kg de combustible

C: consumo de combustible en kg/s.

Calculando el volumen de gases a la salida de la caldera:

$$V = 22,4 \cdot \left[\left(\frac{P_C}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_S}{32} + \frac{P_{O_2}}{32} \right) \frac{n}{0,21} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_{O_2}}{32} \right] \quad \text{ec.3}$$

Donde:

P_C, P_{H₂}, P_{O₂}, P_S: composición en tanto por uno del combustible.

n: es el coeficiente de exceso de aire para combustibles líquidos n= 1,1-1,2.

Se trabajó con n=1, 2.

Luego de calcular el volumen de los gases es necesario hacer una corrección empleando la ecuación 4 para la temperatura de operación, a partir de la Ley de los gases ideales.

$$V_{\text{corregido}} = \left(\frac{T}{273} \right) \cdot V \quad \text{ec.4}$$

Para comparar con los valores establecidos en la norma cubana de emisiones (ONN, 2010), se determinó la concentración de salida de los gases mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Concentracion} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) = \left(\frac{\text{Emision} \left(\frac{\text{mg}}{\text{s}} \right)}{F \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right)} \right) \quad \text{ec.5}$$

Determinación de las emisiones del vertedero de residuos sólidos urbanos

La EPA y la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, por sus siglas en inglés) concuerdan en que el material particulado emitido en vertederos sanitarios es generado en forma de polvo fugitivo, vinculado principalmente al manejo de los residuos y producto del movimiento de fuentes móviles que viajan a lo largo de la superficie sin pavimento. Esta emisión está vinculada a varias variables específicas de cada lugar como son el contenido de limos o sedimentos en la superficie de la vía, peso medio de los vehículos, longitud de la vía y cantidad de vehículos que circulan (EMEP-EEA, 2009) (EPA, 1998).

En el capítulo 13, de la 5ta edición de la serie AP-42, se presenta una expresión empírica usada para estimar los factores de emisión del material particulado de tamaño específico para vehículos que viajan sobre superficies sin pavimentar. La ecuación 6 permite determinar las emisiones de polvo en vertederos sanitarios. Normalmente las vías están sujetas a algún tipo de mitigación natural a causa de las precipitaciones, las cuales no se tuvieron en cuenta para el cálculo de las emisiones (EPA, 2006).

$$E = EF \cdot VKT_p \quad \text{ec.6}$$

Donde:

E: emisiones de material particulado (lb/h).

EF: factor de emisión (lb/km recorrido).

VKT_p: kilómetros transitados por toda la flota vehicular en la vía (km/h)

Siendo EF la expresión representada en la ecuación 7:

$$EF = k \cdot \left(\frac{S}{12} \right)^a \cdot \left(\frac{W}{3} \right)^b \quad \text{ec.7}$$

Dónde:

k, a, b y c son constantes empíricas.

EF: factor de emisión de material particulado de tamaño específico (kg/10³L)

S: contenido de limos o sedimentos en la superficie del camino (%)

W: Peso promedio del vehículo (t)

Los valores que se usaron para la estimación fueron:

S = 6,4%

W = 12,4 t

k= 0,15 para PM_{2,5} y 1, 5 para PM₁₀

a=0,9

b=0,45

Velocidad media que recorren los vehículos = 0,0157 km/s = 56,52 km/h

Emisiones de la Avenida 114

(Fernández, 2011) realizó una estimación de la emisión de contaminantes atmosféricos en un tramo de la Avenida 114 con una longitud de 5 km, comenzando a partir de la Avenida 51. Se realizó un conteo vehicular para determinar la composición de la flota y se aplicó el modelo Internacional Vehicle Emissions (IVE) para la estimación de las emisiones de este tramo de la avenida considerada. El modelo estima la emisión de varios contaminantes para cada tipo de vehículo, entre ellos partículas suspendidas totales, denominadas PM en este estudio, cuyo resultado se muestra en el Anexo 10. En este caso, se tomaron los valores de emisión de PM y se sumaron para obtener la emisión total de este contaminante, obteniendo un valor de 0,0000817 g/ms. Este valor total fue utilizado para modelar con el DISPER 5,2 la concentración de partículas sólidas totales (PST) en el aire de la zona de estudio. La norma cubana NC 111 de 2002 plantea que a falta de datos, se puede considerar que la concentración en el aire de PM₁₀ es igual al 50% de la concentración obtenida de PST, y la misma consideración es aplicable a la concentración de PM_{2,5} con respecto a PM₁₀.

Muestreo de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5}

La campaña de muestreo se realizó durante el año 2012, mediante equipos muestreadores de bajo volumen ECHO PM de la firma italiana Tecora, ubicados en la azotea de la Facultad de Ingeniería Química del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), a 7,5 m de altura con respecto al nivel del suelo. Dicho equipo es un instrumento proyectado para el funcionamiento al aire libre en condiciones climáticas duras, proporciona una plataforma flexible de muestreo para PM₁₀ y PM_{2,5}, realiza el muestreo con un máximo de 2 muestras secuenciales, brinda visualización gráfica con amplia iluminación del fondo, una memorización de más de 60 informes de muestreo con tiempo de muestreo de 1 minuto a 168 horas y un caudal hasta 50 l/min (Envirolab, 2012).

El tiempo de muestreo fue de 24 horas, con un flujo de aire de 2,3 m³/h, el cual fue recomendado por los expertos del OIEA basándose en experiencias anteriores en el trabajo con estos equipos. Para la realización del muestreo se utilizaron los filtros de membrana de policarbonato (C₁₅H₁₄CO₃), de 47 mm de diámetro y 8 micras de tamaño de poro para PM₁₀ y 0,4 micras de tamaño de poro para PM_{2,5}, también conocidos como Nucleopore; y de teflón (CF₂), de 47 mm de diámetro y tamaño de poro 2 micras para ambos tipos de partículas (CUBAENERGIA, 2012).

Los valores de las concentraciones para ambos tamaño de partículas en µg/m³ se determinaron mediante el método gravimétrico en el laboratorio de Contaminantes Atmosféricos del INHEM. Este método consiste en el pesado de los filtros antes y después de expuestos y posteriormente se divide la diferencia de los pesos entre el volumen de aire que reportó el equipo para cada día del muestreo.

El cálculo de la concentración del contaminante presente en el filtro se realizó mediante la ecuación:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Peso Sucio Promedio} - \text{Peso Limpio Promedio} (\mu\text{g})}{\text{Volumen de aire} (m^3)} \quad \text{ec.8}$$

Composición química de las muestras

De las muestras obtenidas, se enviaron 4 al Instituto de Sanidad Carlos III de Madrid, para determinar la concentración de carbono total, orgánico y elemental, cuyos valores fueron determinados mediante análisis termo óptico, según recomiendan las normas europeas (Dos Santos-Alves, 2012).

El análisis elemental de las muestras para determinar metales se realizó utilizando la técnica PIXE (Emisión de rayos X por partículas, siglas en inglés), técnica nuclear basada en aceleradores de partículas, multielemental y muy sensible a la mayoría de los elementos de interés atmosférico. Las mediciones se realizaron mediante el acelerador Tandetron de 1 MV del laboratorio de Interacciones de Haces de Iones del Instituto Ruder Boskovic de Zagreb, Croacia. Hasta el momento de la elaboración de este documento, no se habían calculado los valores de concentraciones de los elementos identificados, por lo que en este estudio solo se presentan resultados cualitativos.

Modelo de dispersión DISPER5.2

El modelo DISPER 5.2 admite datos meteorológicos para establecer las condiciones de la forma de la nube contaminante como:

- Parámetro de estabilidad (k) de Pasquill
- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento (0° a 360°)
- Temperatura del aire (K)
- Altura de la capa límite en el mar (m)
- Altura del anemómetro (m)
- Tipo de atmósfera (rural o urbana)

Estos parámetros eran necesarios introducirlos tanto para la modelación del vertedero como para la de las fuentes fijas, diferenciándose solamente en los datos particulares de cada tipo de fuente (Canarina Software Ambiental, 2012).

Muestreo pasivo con captadores Radiello

Los muestreadores pasivos (Radiello) son un método simple y eficaz para realizar sondeos de calidad del aire. Por su bajo costo, es posible muestrear en varios puntos simultáneamente dentro del área de estudio, permitiendo mapear e identificar zonas críticas de contaminación (ver figura 2).

Pueden ser usados en estudios de línea base para la determinación de la concentración de los principales gases contaminantes del aire. Su exposición por períodos prolongados da un promedio representativo de la zona en estudio previo al inicio de las actividades evaluadas, en planes de monitoreo de calidad del aire en actividades que no generen episodios o picos de contaminación agudos (de pocas horas) y/o necesitan los resultados en tiempo real sino que sean fuente de emisión relativamente continua, como complemento a las mediciones continuas, de manera que se pueda reducir el número de estaciones automáticas y se logre evaluar una mayor área, en monitoreos para determinar la concentración a la que una población se encuentra expuesta a largo plazo, como herramienta para realizar un mapeo de la contaminación, evaluar la distribución espacial de las concentraciones y en la calibración y validación de los modelos de dispersión (Parada, 2011). La determinación de contaminantes mediante el uso de muestreadores pasivos se fundamentan en la primera Ley de Fick, por la que un contaminante gaseoso atmosférico difunde a través del muestreador y queda en él retenido por la sustancia captadora, siendo la concentración retenida dependiente del tiempo de muestreo y de la eficiencia de captación del gas en el muestreador.

El muestreador pasivo para dióxido de azufre y óxido de nitrógeno está basado en el principio de la difusión pasiva de moléculas 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. 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 NO₂ y SO₂ absorbida es proporcional a la concentración en el ambiente. Después de una exposición de 15 días, se extrajo la cantidad total y se determinaron los valores de concentración para el caso del SO₂ por cromatografía iónica y para el NO₂, por espectrofotometría (Zapata, 2008).



Figura 2. Muestreador pasivo modelo Radiello

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el muestreo de partículas se obtuvieron 83 muestras de PM₁₀ y 60 muestras de PM_{2,5}. La diferencia se debe a problemas que presentaron los filtros utilizados en el equipo muestreador de PM_{2,5}, muchos de los cuales se tupieron antes de completar el tiempo de muestreo. Las partículas PM₁₀ presentan una concentración promedio de 21,19 µg/m³, mientras que la concentración promedio para PM_{2,5} fue de 13,82 µg/m³, siendo ambos valores ligeramente superiores a la concentración máxima admisible anual establecida por la OMS.

Comportamiento temporal de las muestras.

Las figuras 4 y 5 muestran los valores de concentración obtenidos en cada muestra individual. Analizando estos gráficos, se puede observar que la mayoría de los valores son inferiores a la concentración máxima admisible de la OMS para 24 horas. Solamente 3 muestras de PM₁₀ y 6 muestras de PM_{2,5} fueron superiores a estos valores en todo el tiempo de muestreo.

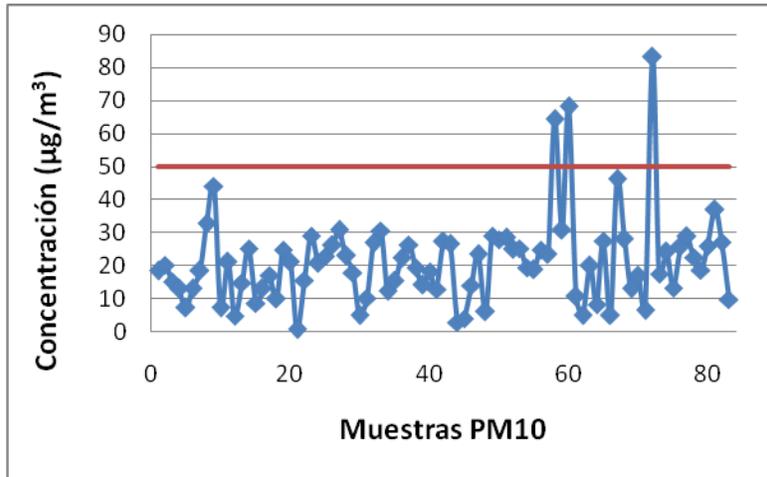


Figura 4. Valores de concentración obtenidos para las muestras de PM₁₀

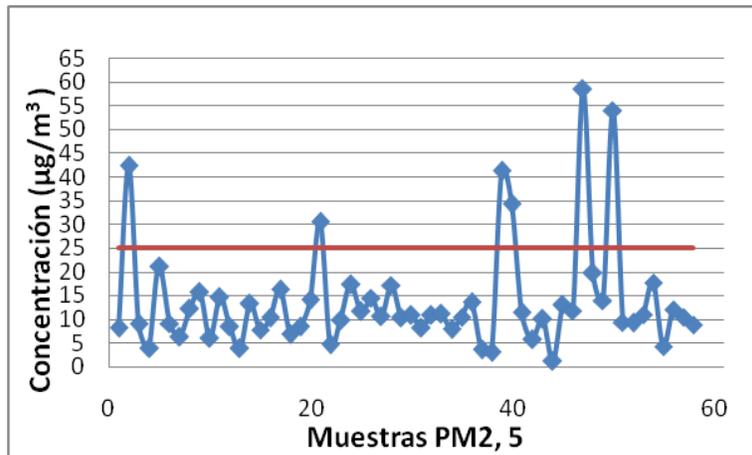


Figura 5. Valores de concentración obtenidos para las muestras de PM_{2,5}

La figura 6 muestra un análisis de los valores de concentración de ambos tamaños de partículas por mes del año. Como se observa, el mayor valor de concentración se obtuvo en el mes de mayo para ambos tamaños, mientras que el mes de menor valor de concentración fue junio. Este comportamiento está muy relacionado a los bajos valores de velocidad del viento que se reportaron en el mes de mayo, además de obras de construcción que se realizaron en este período, la cual es una fuente emisora de material particulado de importancia. No se pudo evaluar los meses de julio y agosto, así como PM_{2,5} en diciembre puesto que en el primero se presentaron muchos problemas en el muestreo, por lo que los valores obtenidos no eran confiables y no fueron usados; en el segundo no se realizó muestreo, aunque se considera que los valores no deben ser muy altos, puesto que los eventos de lluvia en estos

meses fueron abundantes, y la lluvia funciona como un mecanismo limpiador de la atmósfera, disminuyendo la concentración de los contaminantes en el aire. En el último mes del año no se pudo evaluar las partículas PM_{2,5} porque no se lograron muestras válidas para este contaminante.

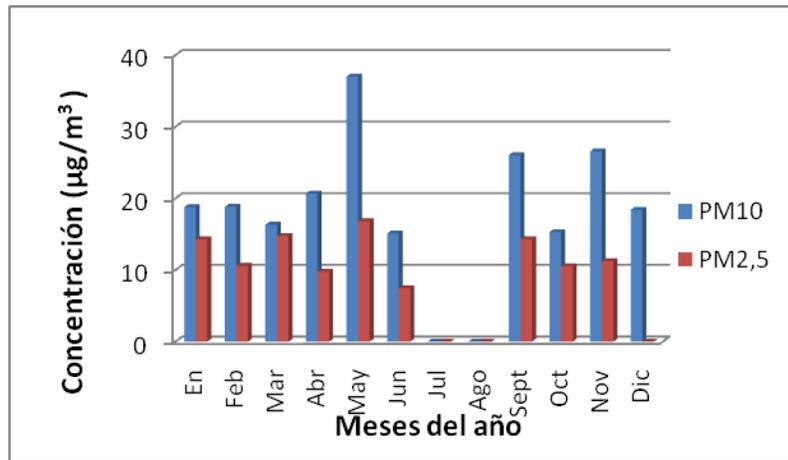


Figura 6. Concentración promedio mensual de PM₁₀ y PM_{2,5}

Se estima que para los países en desarrollo, la relación PM_{2,5}/ PM₁₀ promedio oscile entre 0,5 – 0,6 (Martínez et al, 2012). En la CUJAE se obtuvo un valor promedio de 0,5898, cumpliendo con lo observado con anterioridad. En la figura 7 se observa el comportamiento de las partículas por día de la semana. Como se esperaba, los mayores valores de concentración se obtienen de lunes a viernes, cuando la actividad industrial y el transporte automotor son mayores, mientras que los sábados y los domingos se obtienen menores valores de concentraciones debido a la disminución de la intensidad de los mismos.

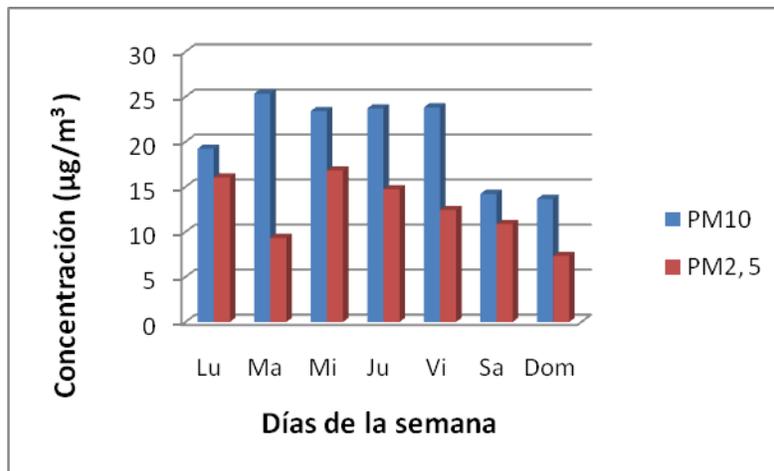


Figura 7. Comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} por días de la semana

Composición química de las muestras.

La técnica PIXE utilizada permitió detectar la presencia de 19 elementos químicos en las muestras analizadas (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br y Pb) en ambos tamaños de partículas. Las figuras 8 y 9 muestran el espectro que se obtuvo para la muestra 016 en ambos tamaños de partículas como muestra de lo que se obtuvo para todas las muestras.

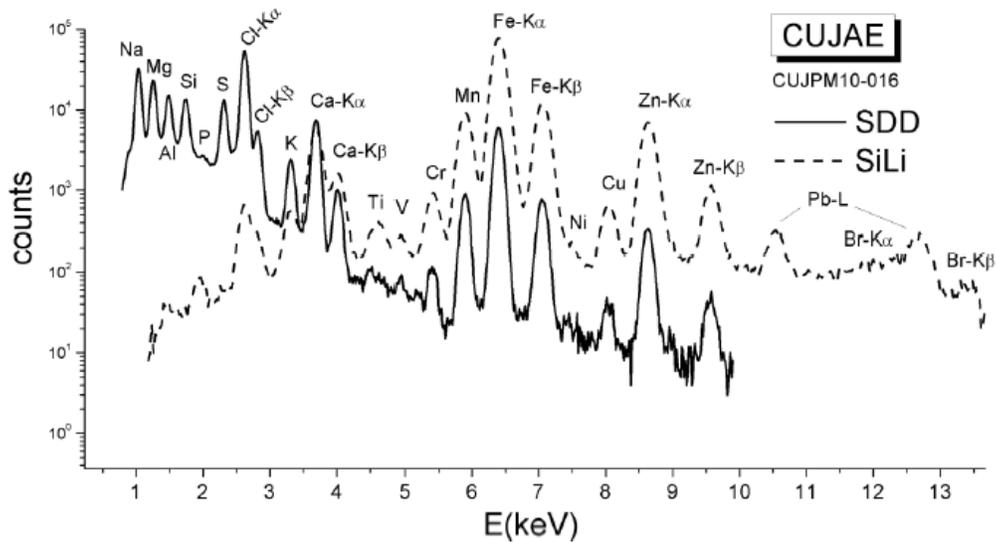


Figura 8. Espectro obtenido para la muestra CUJ016 PM₁₀

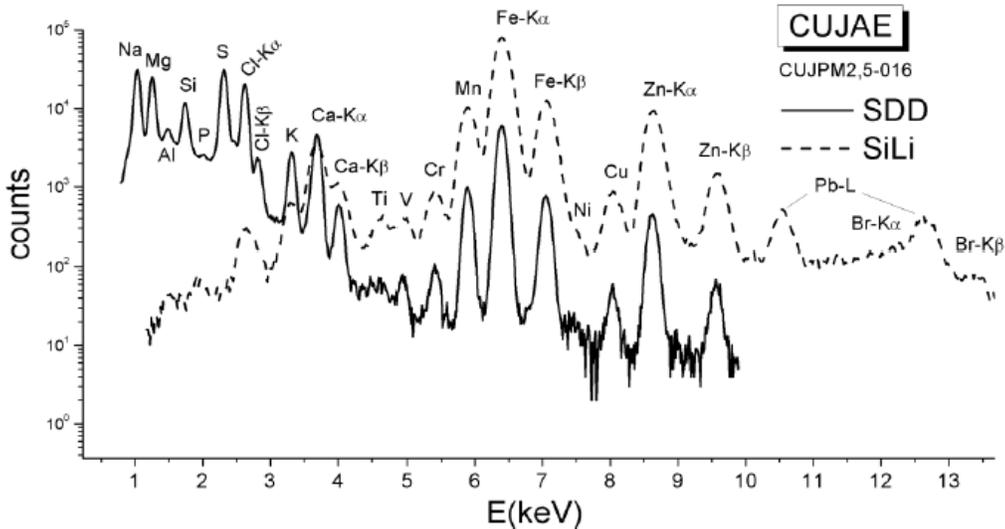


Figura 9. Espectro obtenido para la muestra CUJ016 PM_{2,5}

Como se observa en el espectro de la fracción PM_{2,5}, uno de los elementos que presenta un pico en el espectro fue el S, cuya presencia en el aire tiene origen antropogénico, principalmente por la quema de combustible fósil, lo cual era de esperarse debido a la cantidad de fuentes puntuales identificadas alrededor del instituto que generan vapor mediante quema de fuel oil o gas oil. Sin embargo, en la fracción PM₁₀, el elemento mayoritario fue el Cl, el cual se encuentra en la atmósfera debido a la presencia de aerosoles marinos, dada la cercanía del punto de muestreo al mar. A pesar de esta diferenciación en cuanto al origen de estos dos elementos, en ambas fracciones se identificaron elementos provenientes de varios tipos de fuentes como el Si, Ca, Fe, Ti y Al, provenientes del suelo; Na, proveniente de los aerosoles marinos; K, Pb, Zn, Cu emitidos en procesos de incineración de residuos; Ni, V, Mn, P, provenientes de plantas de energía que queman derivados del petróleo y de vehículos de gasolina en marcha; Pb, Ni, Mn y P también tienen origen en el polvo generado por actividades de construcción que se están realizando en las cercanías del centro en los nuevos edificios y en el polvo generado en calles asfaltadas; Cr, cuyas principales fuentes de emisión son la industria del cemento y la construcción (Tapia, 2012).

Los resultados de los valores de concentración de carbono total, elemental y orgánico obtenidos se muestran en la tabla 4 (ISCIII, 2012). Este contaminante tiene su origen principalmente en los vehículos de motor de diesel y gasolina, lo cual explica la tendencia a la disminución que presentan los valores presentados, puesto que las muestras 021 y 028 fueron tomadas un día sábado, donde el tráfico vehicular disminuye respecto a los días entre semana.

Muestra	Carbono Orgánico		Carbono Elemental		Carbono Total	
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5}
007	5,05	6,17	7,01	7,28	12,06	13,45
014	4,30	3,88	1,39	1,26	5,69	5,14
021	2,22	1,66	0,78	0,91	3,00	2,77
028	2,14	2,02	0,78	0,70	2,92	2,72

Tabla 4. Valores de concentración de carbono total, orgánico y elemental en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las muestras de PM₁₀ y PM_{2,5} analizadas

Simulación

Entre las fuentes consideradas, se identificaron dos tipos de fuentes fijas: fuentes puntuales (generadores de vapor) y una fuente área (Vertedero Sanitario de Calle 100). Además, se tuvo en cuenta una fuente lineal cercana al área de estudio. En el caso de PM₁₀, considerando las emisiones asociadas al transporte del vertedero, el modelo predijo que la concentración en el aire era de $0,025 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que por las fuentes puntuales la concentración fue de $0,1693 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para la Avenida 114 fue de $3,2491 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniéndose un valor de concentración considerando el conjunto de fuentes de $3,4434 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para PM_{2,5}, los valores obtenidos fueron de $0,015 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1,6245 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, dando una concentración en conjunto de $1,7395 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores medidos resultaron ser inferiores a los límites máximos establecidos por la NC 111: 2004 y la OMS para 24 horas, que eran de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

La fuente que mayor influencia tuvo en la calidad del aire para cuando se analizaron los dos tipos de partículas fue Calle 114, mientras que el transporte asociado al vertedero Calle 100 fue el que menor afectación produjo.

Cabe destacar que la predicción del modelo de dispersión es inferior a la medición, ya que no se tuvieron en cuenta otras fuentes emisoras de material particulado que afectan la calidad del aire de la zona como lo son:

- Obras de construcción que se están realizando en los alrededores para la ampliación de capacidades de vivienda, que emiten PM en las operaciones de transporte, carga y descarga de materiales y residuos de la obra, así como en las propias labores de construcción.
- Otras avenidas de intenso tráfico vehicular cercanas al centro como la carretera hacia Pinar del Río y la Avenida Boyeros.
- Suelo agrícola alrededor de la universidad.
- Otras fuentes que no fueron consideradas en el estudio.

Resultados del análisis de sensibilidad

La dirección del viento define el sentido en que se mueven las masas de aire y hacia donde se trasladan la mayor cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera. En la figura 10 y 11, se muestra el comportamiento de los valores de concentración de PM₁₀ y PM_{2,5} predichos por el modelo, al variar esta variable, obteniéndose una concentración para PM₁₀ de $16,3212 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para PM_{2,5} de $8,1606 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Como se observa en estas figuras, no se define el comportamiento que presentaron los valores de concentración obtenidos al analizar el transporte asociado al vertedero y las fuentes puntuales, debido a que estos fueron muy bajos respecto a los que se obtuvieron en el análisis de la Calle 114, por lo cual se presentan las figuras 12 y 13, en las que se muestra la tendencia que tuvieron estos valores. (CEPIS, 2012).

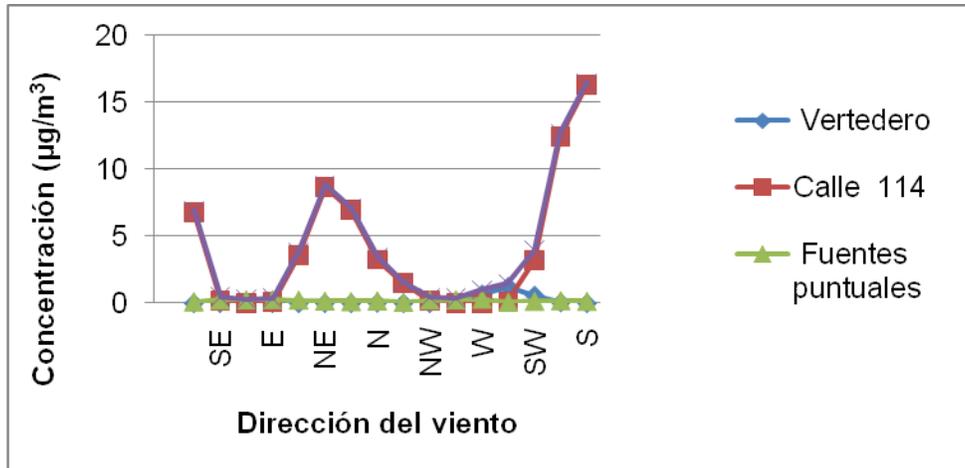


Figura 10. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM₁₀ variando Dirección del viento

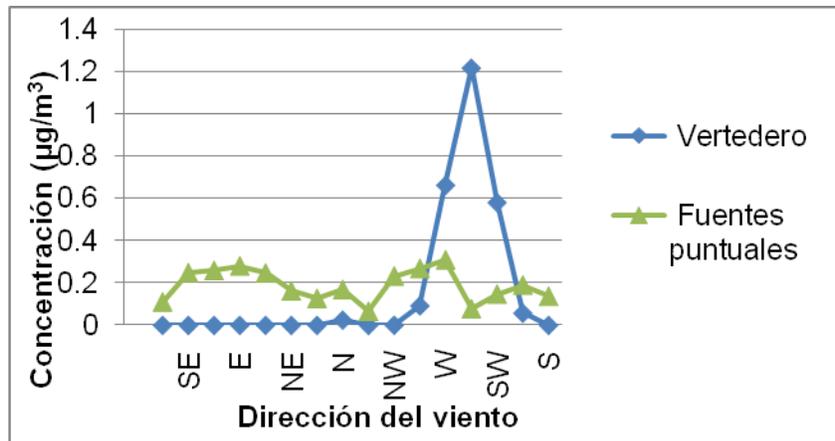


Figura 11. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte del vertedero y fuentes puntuales considerando PM₁₀ variando Dirección del viento

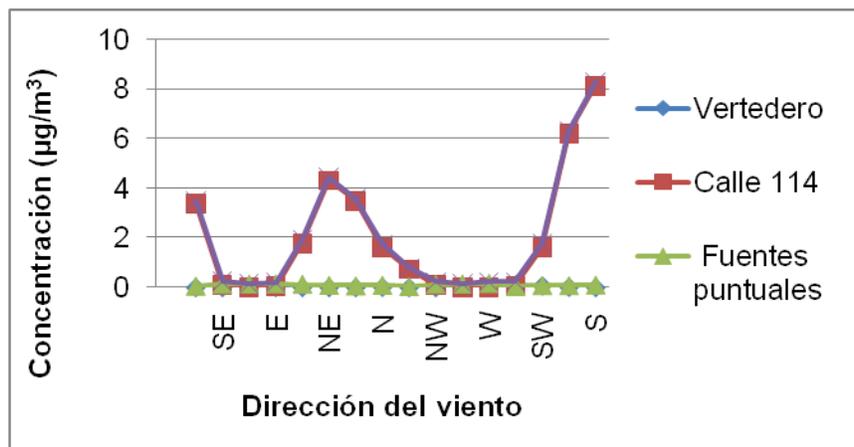


Figura 12. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM_{2.5} variando Dirección del viento

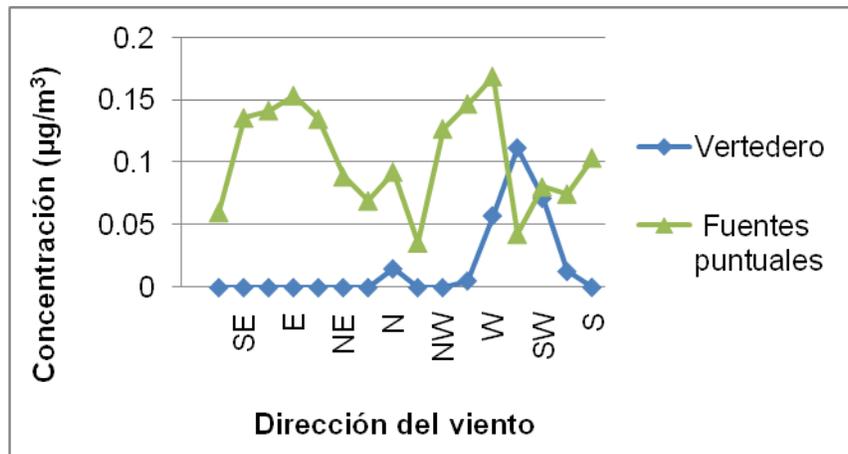


Figura 13. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte del vertedero y fuentes puntuales considerando PM_{2.5} variando Dirección del viento

En la figura 14 y 15, se muestra el comportamiento de los valores de concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} predichos por el modelo al variar la velocidad del viento. Como se explicaba anteriormente, debido a la diferencia entre los valores predichos para el transporte asociado al vertedero y las fuentes puntuales, se tuvo que presentar las Figuras 16 y 17 para mostrar la variación de estos valores. La velocidad del viento determina la cantidad de dilución inicial que experimenta una pluma (contaminantes emitidos a la atmósfera desde una fuente determinada). Por lo tanto, la concentración de contaminantes en una pluma está directamente relacionada con la velocidad del viento. Es decir, a mayor velocidad del viento, menores valores de concentración de contaminantes en la pluma y estos recorren mayores distancias, alejándose del foco emisor. Por esta razón, los valores obtenidos en el modelo, fueron disminuyendo a medida que se aumentó el valor de esta variable. (CEPIS, 2012).

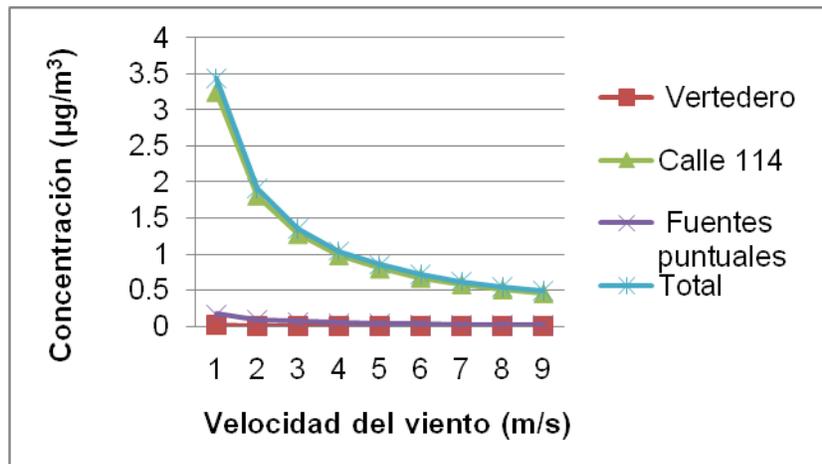


Figura 14. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM₁₀ variando la Velocidad del viento

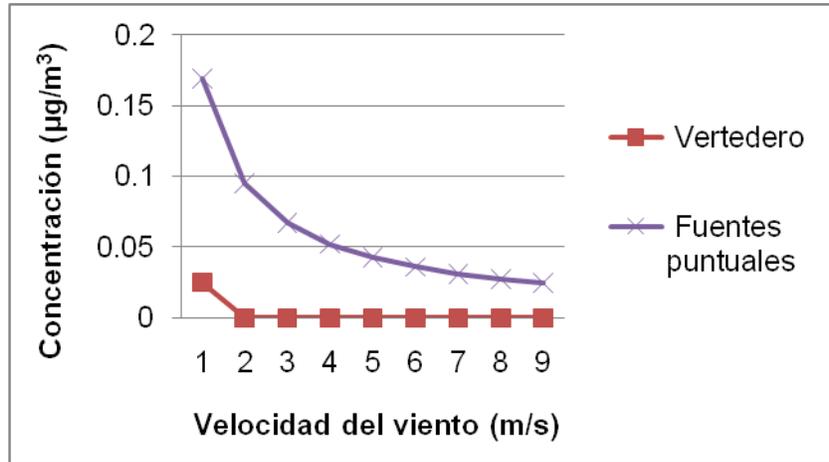


Figura 15. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte del vertedero y fuentes puntuales considerando PM₁₀ variando Velocidad del viento

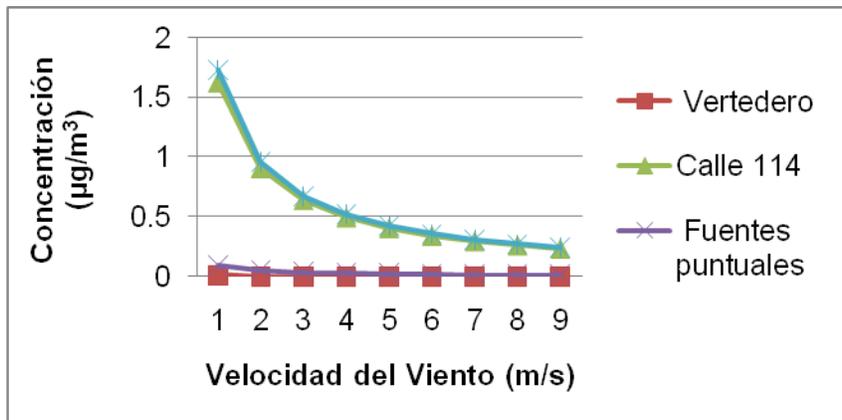


Figura 16. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM_{2,5} variando Velocidad del viento

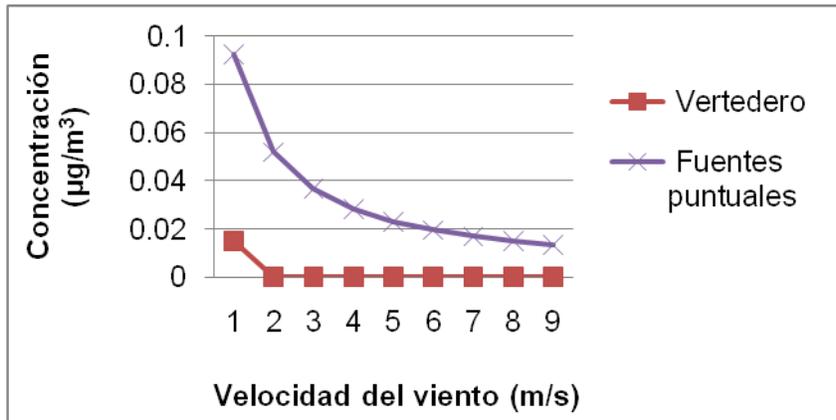


Figura 17. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte vertedero y fuentes puntuales considerando PM_{2,5} variando Velocidad del viento

En las figuras 18 y 19, se muestra la variación que experimentaron los valores de concentración de PM₁₀ y PM_{2,5} predichos por el modelo, al variar el Coeficiente de Pasquill. Una vez más, en estas figuras no se define el comportamiento de los valores de concentración obtenidos al analizar el transporte asociado al vertedero y las fuentes puntuales, por lo cual se presentan las figuras 20 y 21. Como se puede observar, en los coeficientes 1 y 2 (condiciones inestables), los valores de concentración arrojados fueron pequeños con respecto a los arrojados en los coeficientes 5 y 6 (condiciones estables). Está marcada diferencia se debe a que en condiciones inestables la pluma emitida es más caliente y menos densa que el aire que la rodea, por tanto asciende en la atmósfera. El aire circundante circula por debajo de la pluma absorbiendo parte de la temperatura que emite la superficie terrestre, con lo que aumenta su temperatura y disminuye su densidad, ascendiendo a su vez en la atmósfera. Este proceso

contribuye al movimiento vertical de los contaminantes, lo cual produce una disminución de los valores de concentración de los mismos en la superficie del suelo. En las condiciones estables, la masa de aire que se eleva verticalmente tiene menor temperatura que el aire circundante, y por tanto es más denso, impidiendo el transporte vertical de los contaminantes en la atmósfera. Un ejemplo de esta condición son las inversiones térmicas, que consiste en el aumento de la temperatura cuando aumenta la altura en la columna atmosférica. Las plumas emitidas en estas condiciones no se dispersan mucho en la atmósfera puesto que inhiben su movimiento, por lo que los valores de concentración de contaminantes en la superficie del suelo son elevados. (CEPIS, 2012).

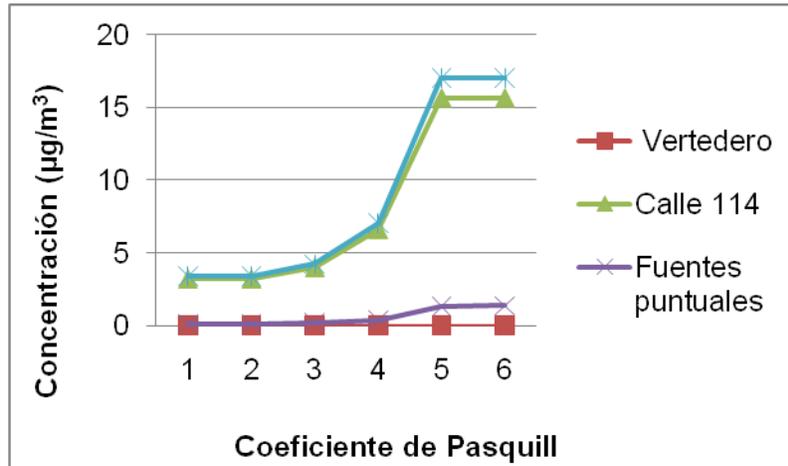


Figura 18. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM₁₀ variando Coeficiente de Pasquill

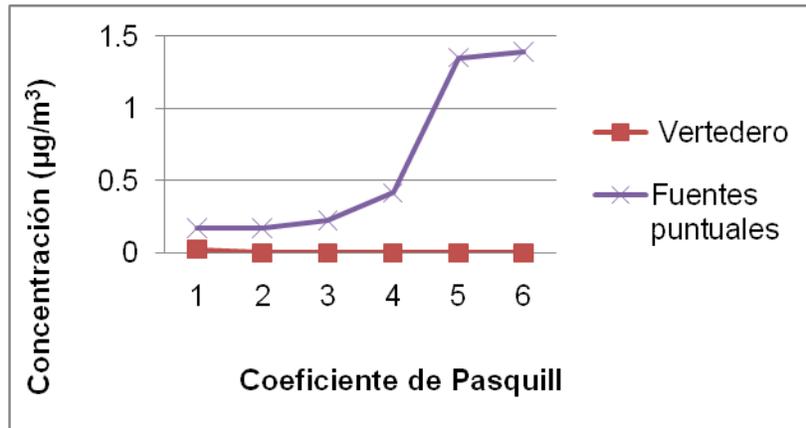


Figura 19. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte del vertedero y fuentes puntuales considerando PM₁₀ variando Coeficiente de Pasquill

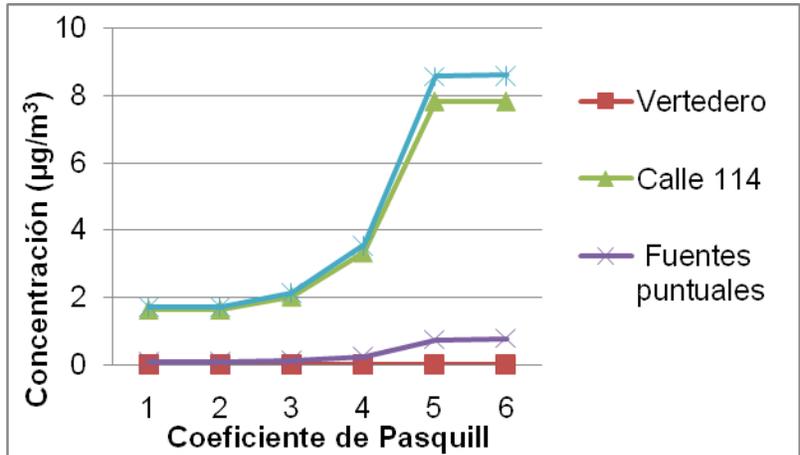


Figura 20. Comportamiento de los valores de concentración predichos por el modelo para PM_{2,5} variando Coeficiente de Pasquill

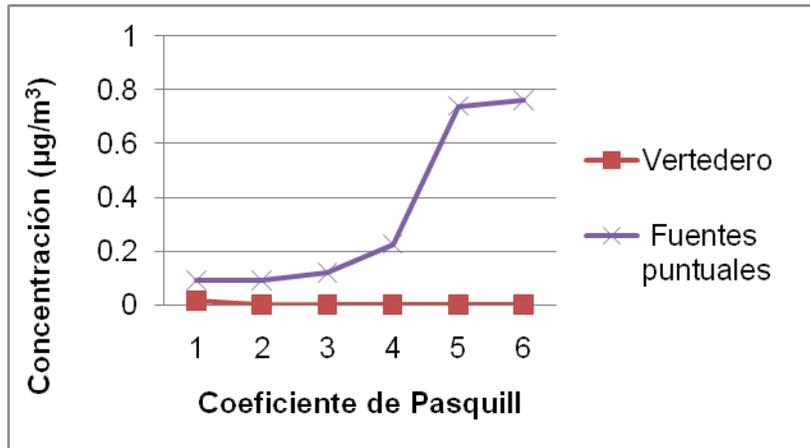


Figura 21. Variación de los valores de concentración predichos por el modelo para transporte del vertedero y fuentes puntuales considerando PM_{2,5} variando Coeficiente de Pasquill

Análisis de la variación combinada de las variables meteorológicas

Con el propósito de conocer las condiciones meteorológicas en las que se presenta el mayor valor de concentración de material particulado de 10µm y 2,5 µm, se variaron las tres variables consideradas en el estudio de manera combinada. El modelo de dispersión arrojó una concentración para PM10 de 133,288µg/m³ y para PM2,5 de 66,65905µg/m³. Estos valores se obtuvieron bajo las siguientes condiciones: Dirección de viento Sur, Velocidad del viento 1,34 m/s y Coeficiente de Pasquill 6.

Resultados del muestreo pasivo

Durante la campaña de monitoreo con pasivos Radiello los valores de concentraciones obtenidos se mantuvieron por debajo de los límites permisibles establecidos en la norma cubana de calidad del aire. Los mayores valores de concentración para ambos gases se reportan en el mes de enero, siendo de 3,79 µg/m³ para el SO₂ y 13,25 µg/m³ para el NO₂ coincidiendo con el inicio de año justificando dichos valores directamente con el desarrollo e incremento de actividades antropogénicas. Igualmente resultaría de gran interés evaluar dichas inmisiones durante el resto del año. Los resultados se muestran en la figura 22.

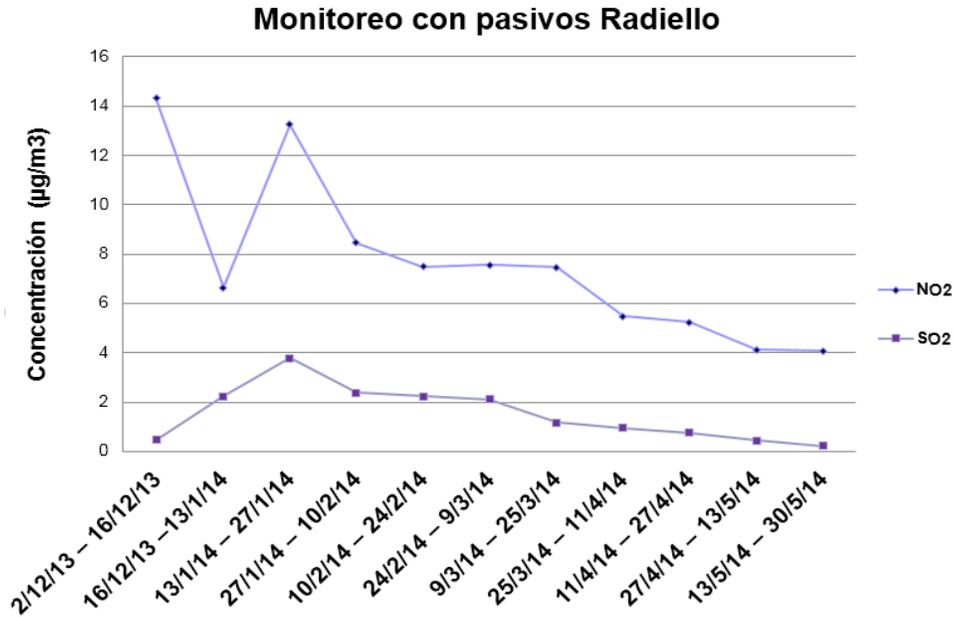


Figura 22. Comportamiento de las inmisiones de NO₂ y SO₂ durante el período de muestreo

CONCLUSIONES

1. La fuente que mayor impacto tuvo en la calidad del aire en las condiciones estudiadas fue Calle 114, mientras que la que menor afectación produjo el aporte del transporte del vertedero Calle 100.
2. El muestreo realizado arrojó un valor promedio de concentración para 24 horas de 21,19 µg/m³ para PM₁₀ y de 13,82 µg/m³ para PM_{2,5}, siendo estos valores inferiores a los valores guía reportados por la NC 1020:2014. Se identificaron 19 elementos químicos en las muestras analizadas, mostrando que las fuentes antropogénicas poseen mayor influencia en la fracción PM_{2,5}, al ser el azufre (S) el componente mayoritario, debido a la quema de combustible fósil, mientras el cloro (Cl) fue el componente mayoritario en la fracción PM₁₀, evidenciándose la influencia de los aerosoles marinos en estas partículas, como fuente natural.
3. El muestreo para los gases NO₂ y SO₂ realizado con captadores pasivos arrojó valores promedio de concentración de 7,64 µg/m³ y de 1,53 µg/m³ respectivamente, siendo estos valores inferiores a los valores guía reportados por la NC 1020:2014 en el sitio de muestreo ubicado en la azotea de la Facultad de Ingeniería Química que se encuentra a 7,5 m sobre el nivel del suelo.
4. Los valores de concentración predichos por el modelo DISPERS.2 para PM₁₀ y PM_{2,5} fueron 3,44 µg/m³ y 1,73 µg/m³ respectivamente, los cuales resultaron ser inferiores a los valores establecidos por la NC 1020:2014.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Canarina Software Ambiental [CSA] (2012) Disper 5.2: Aplicación informática para la simulación por ordenador de la contaminación ambiental. Manual del usuario. Canarina Software Ambiental. España.
2. CEPIS (2012) Monografía Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). La Habana, Cuba.
3. CUBAENERGIA (2012) Informe Técnico de salida del proyecto CUB7007 Evaluación Integral de la contaminación atmosférica de instalaciones energéticas para soportar la toma de decisiones. 2012.
4. Díaz, R, Díaz, A, Molina, E, Suárez, B. (2007). La calidad del aire en Cuba. Informe del Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y microbiología. Ministerio de Salud Pública de Cuba: 12 p.
5. Díaz, R, Díaz, A. (1998). Ministerio de Salud Pública, Área de Higiene y Epidemiología. Programa de mejoramiento de la calidad del aire en Cuba, 1998.
6. Dos Santos, S. (2012). Legislación de calidad de aire en España y Europa. Instituto de Salud Carlos III, Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Madrid, España.
7. EMEP-EEA (2009) European Environment Agency. EMEP-EEA air pollutant emission inventory guidebook-2009. Technical report No 9/2009. Recuperado de: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>
8. Envirolab, (2012) Environmental Laboratory. Air Sampling equipments. Recuperado de: <http://www.envirolab.rs/en/ambient-air-sampler>
9. EPA (1998) U.S. Environmental Protection Agency, 1998. AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal. 2.4 Municipal Solid Waste Landfills- Supplement E. Recuperado de: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>
10. EPA (2006) Environmental Protection Agency, 2006. AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous Sources. 13.2.2 Unpaved Roads. URL. (acceso 18 de abril de 2012) Recuperado de: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/bgdocs/b13s02.pdf>
11. EPA (2010) U.S. Environmental Protection Agency, 2010. AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 1: External Combustion Sources. 1.3 Fuel Oil Combustion - Supplement E. Recuperado de: www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01/final/c01s03.pdf
12. Fernández, H. (2011). Estimación del impacto sobre la calidad del aire en la CUJAE por una de las fuentes lineales que la rodean. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
13. González, M. (2010). Estudio de la calidad del aire en el entorno de la CUJAE. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en: Ingeniería en Saneamiento Ambiental.
14. ISCIII. (2012). Informe de las concentraciones máxicas y de carbono total de partículas PM10 y PM2, 5 en las estaciones CUBAERGIA, CUJAE e INHEM. Instituto de Salud Carlos III. Madrid, España.
15. Ladrilleras (2012) Estimación de emisiones mediante Factores de Emisión. (acceso 4 de abril de 2012) Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/695/metodos.pdf>
16. López, L. (2011). Relación entre componentes iónicos de la lluvia, sus fuentes de emisión y condiciones meteorológicas estacionales. Aporte a la gestión de la calidad del aire en Cuba. Tesis de maestría en gestión y planificación ambiental.
17. López, C. (2006). Introducción a la gestión de la calidad del aire. Contaminación y calidad del aire en las áreas urbanas. Instituto de Meteorología.
18. Martínez, M, Molina, E, Turtós, L, Rodríguez, D, Guzmán, M. (2012). Determinación de partículas PM10 y PM2.5 en la estación del INHEM. Taller Contaminación Atmosférica, Sociedad Meteorológica de Cuba.
19. ONN (2014). Norma cubana Calidad de Aire-Contaminantes-Concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. Oficina Nacional de Normalización.
20. ONN. (2010). Norma cubana Calidad de Aire-Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmosfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones de generación de vapor y electricidad. Oficina Nacional de Normalización.
21. Parada, I. (2011). Monitoreo de calidad del aire. Conferencia taller de contaminación de la atmósfera en Colombia.
22. Tapia, J. (2012). Fuentes de contaminación por cromo. Instituto de Química de Recursos Naturales. Universidad de Talca, Chile. Recuperado de: <http://www.icp.csic.es/cyted/Monografias/MonografiasTeneria/capituloiii.htm>
23. WHO (2011) Calidad del aire y salud. Nota descriptiva N°313. Septiembre de 2011 (acceso 2 de febrero de 2012). Recuperado de: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/es/index.html>

24. Zannetti, P. (1990). Air pollution modeling: theories, computational methods, and available software (p. 444). Southampton: Computational Mechanics.
25. Zapata, S. (2008). Fortalecimiento de la red de monitoreo de calidad del aire en el Valle de Aburrá con medidores pasivos. *Gestión y Ambiente*, vol. 11, núm. 1, pp. 67-84. Colombia.