

Determinación de los niveles de partículas PM₁₀ y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia, Costa Rica: año 2005-2006

Fecha de recepción: 03/09/2008

Fecha de aceptación: 12/04/2009

Jorge Herrera-Murillo¹
Susana Rodríguez-Román²
Ligia Dina Solís-Torres³

Palabras clave

Partículas PM₁₀, dióxido de nitrógeno, contaminación del aire, Heredia, Costa Rica.

Key words

Particulate matter PM₁₀, nitrogen dioxide, air pollution, Heredia, Costa Rica.

Resumen

Se determinó los niveles de material particulado PM₁₀ en dos sitios de la Ciudad de Heredia (Rectoría de la Universidad Nacional y Plazoleta del Fortín) de marzo a agosto del 2006, obteniendo como promedio 48 ± 8 y 31 ± 8 µg/m³, respectivamente. En forma adicional, se midió los niveles de sulfatos, nitratos y cloruros para ambos sitios y las medias anuales resultaron no ser

significativamente diferentes para ambos, con un nivel de significancia del 5%.

En uno de los diez sitios de medición de la concentración de dióxido de nitrógeno en la ciudad, se presentaron valores superiores a la recomendación de la Organización Mundial de la Salud para un mes de monitoreo. El análisis de componentes principales aplicados a los datos de este gas, muestra que las variaciones en los niveles se deben a fenómenos de larga escala (meteorológicos).

Abstract

Measurements of particulate matter PM₁₀ concentrations were made in two points of Ciudad de Heredia (Universidad Nacional y Plazoleta del Fortín) during six months, obtaining as mean 48 ± 8 and 31 ± 8 µg/m³, respectively. In the two points, the difference between the mean of

1. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jherrera@una.ac.cr
2. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. Correo electrónico: susanar@cariari.ucr.ac.cr
3. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: lsoli@una.ac.cr

sulphate, nitrate and chloride in particulate matter was not significant at a 5% of significance.

In one of the ten points set for the measurements, the nitrogen dioxide levels have been largest than the World Health Organization reference values for a monthly sampling. The variations in NO_2 levels was caused by a large scale phenomenon according to the principal component analysis.

Introducción

El Cantón Central de Heredia es la cabecera de la provincia costarricense del mismo nombre, caracterizada por ser uno de los centros urbanos más importantes del país, debido a su cercanía geográfica con la ciudad de San José, capital de Costa Rica. En dicho territorio se encuentra una importante concentración de actividades comerciales e industriales, y al igual que en las otras ciudades presentes en el Gran Área Metropolitana, por años ha dominado un patrón de crecimiento urbano radial, de modo que se está generando nuevas áreas en adición a las que ya gravitan sobre las infraestructuras urbanas existentes, cuyas características son inadecuadas para atender las nuevas necesidades y cuya readaptación resulta extremadamente costosa. Este proceso, acompañado de la gran descoordinación entre diferentes actores urbanos, hace cada día más deficiente la operación de la ciudad, provocando un incremento desmedido del tráfico vehicular, que ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira.

Dos importantes contaminantes del aire son las partículas en suspensión y el dióxido de nitrógeno. Las partículas presentes en la atmósfera pueden provenir tanto de fuentes naturales como antropogénicas (Raes *et al.*, 2000).

El diámetro es una de las características más importantes de las partículas, ya que

determina el tiempo de residencia, la velocidad de deposición y los patrones de alojamiento en el sistema respiratorio de los seres humanos (Seinfeld y Pandis, 1998).

El diámetro de una partícula se puede determinar geoméricamente, a partir de microscopía óptica o electrónica, por su movilidad eléctrica o por su comportamiento aerodinámico. El diámetro es una propiedad obvia de una partícula esférica, pero muchas veces las partículas atmosféricas pueden ser cúbicas, cilíndricas o amorfas, por lo cual sus diámetros son a menudo descritos como diámetros equivalentes. Uno de los más utilizados es el diámetro aerodinámico D_a , el cual depende de la densidad de la partícula y se define como el diámetro de una partícula esférica que posee una velocidad de sedimentación similar a la partícula en cuestión, pero con una densidad igual a 1 g/cm^3 .

Existen tres criterios principales que se utilizan para clasificar las partículas de acuerdo con su tamaño: modal, basado en la observación de las distribuciones por tamaño en el ambiente y sus mecanismos de formación; dosimétrico, fundamentado en la capacidad de las partículas de penetrar en distintos compartimentos del sistema respiratorio, y de muestreo selectivo de tamaño. El muestreo selectivo de tamaño implica la recolección de partículas por debajo de un tamaño aerodinámico especificado, usualmente definido por el diámetro que un equipo muestreador puede recolectar con un 50% de eficiencia.

Las partículas PM_{10} son todas aquellas que son recolectadas con un 50% de eficiencia mediante un muestreador de alto volumen, cuyo diámetro o punto de corte es de $10 \mu\text{m}$. La concentración de PM_{10} en el aire es un indicador de los niveles de las partículas presentes en el medio y que tienen la capacidad de ingresar a la zona torácica del sistema respiratorio.

Otra categoría empleada en este sistema de clasificación abarca las partículas

El diámetro de una partícula se puede determinar geoméricamente, a partir de microscopía óptica o electrónica, por su movilidad eléctrica o por su comportamiento aerodinámico.

Los niveles bajos de dióxido de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea.

suspendidas totales (PST) e incluye a todas aquellas partículas con diámetros menores a 100 μm . Debido a lo anterior, las partículas PM_{10} son consideradas una fracción de las PST (Jaenicke, 1982).

Las partículas en suspensión constituyen un componente imprescindible por ser considerado al describir la calidad del aire de un sitio, debido a los impactos adversos que ocasionan sobre la salud humana, la deposición ácida, la visibilidad urbana y su influencia en los cambios del clima tanto a escala regional como global. El tipo y magnitud de los impactos causados por las partículas dependerán de la distribución de su tamaño, composición química, concentración, tiempo de acumulación y exposición.

Por su parte, el dióxido de nitrógeno es considerado un marcador esencial de la contaminación del aire asociada a emisiones vehiculares, de forma tal que poder caracterizar la distribución temporal y espacial de los niveles de este contaminante en centros urbanos resulta de vital importancia, con el fin de predecir sus posibles impactos en la salud humana.

En estudios realizados con humanos, se ha demostrado que la exposición a concentraciones ambientales altas de dióxido de nitrógeno aumenta la respuesta de personas asmáticas a agentes alérgicos inhalados, medida como un descenso en la función pulmonar (Strand *et al.*, 1997, 1998). Los niveles bajos de dióxido de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones, uno o dos días después de la exposición. Respirar altos niveles de dióxido de nitrógeno puede rápidamente producir dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo y produciendo acumulación de

líquido en los pulmones, hasta llevar a la muerte.

La Universidad Nacional, en cooperación con la Municipalidad de Heredia y el Ministerio de Salud de Costa Rica, lleva a cabo el monitoreo de las concentraciones de PM_{10} y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia desde el año 2005.

Metodología

Partículas PM_{10}

Para realizar el muestreo de las partículas PM_{10} , se seleccionó dos sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de Heredia, que se caracterizan por ser categoría B de acuerdo con la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. La categoría B se asigna a aquellos sitios donde se presenta alta concentración de contaminantes con bajo potencial de acumulación, ubicados de 3 a 15 metros de una arteria de alto flujo vehicular con buena ventilación natural.

Primer sitio de muestreo

Localización: En las instalaciones del Edificio de la Rectoría de la Universidad Nacional, ubicado entre calle nueve y avenida primera de la Ciudad de Heredia, a 10 m de la calle y 8 m sobre el nivel del suelo.

Segundo Sitio de muestreo

Localización: En la Plazoleta del Fortín, ubicada al costado norte del Parque Central de Heredia, a 15 m de la avenida primera y a 5 m sobre el nivel del suelo.

La campaña de muestreo se realizó entre marzo y agosto del 2006, para lo cual se recolectó muestras tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes.

Para la toma de las muestras se utilizó dos muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen, Modelo MFC. Una vez cada seis muestreos, se realizó la calibración del flujo del muestreador de

aire, comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado VARIFLO, Modelo 454, respecto a las indicaciones del equipo. Para cada uno de los muestreos, se tomó registros de las condiciones promedio de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro marca KESTREL, Modelo 5000.

En la recolección de las partículas, se utilizó filtros de fibra de vidrio marca Whatman (CAT N.º 1829932, Grado G653).

Dichos filtros se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura de 15-30°C y una humedad menor al 40%, antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de la conclusión de los muestreos. El transporte de los filtros al campo se realizó en bolsas rotuladas con cierre hermético. A partir de los filtros recolectados y con el fin de determinar los niveles de aniones presentes en el material particulado (cloruro, sulfato y nitrato), se realizó una extracción en agua destilada de una tira de 2,5 cm de ancho de cada filtro. La disolución resultante se utiliza para el análisis de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Para el análisis se utilizó un cromatógrafo de iones marca DIONEX, Modelo DX-100,

con una columna Ion Pac AS4A-SC de 4 mm, un supresor de ionización ASRS-ULTRA 4 mm y un graficador Modelo 4400.

Se cuantificó por interpolación en una curva de calibración de 0,5 a 7 mg/l de los aniones (sulfato, nitrato, cloruro) bajo las siguientes condiciones experimentales:

Eluente: disolución 1,8 mM Na_2CO_3 / 1,7 mM NaHCO_3

Flujo del eluente: 2 ml / min

Sensibilidad: 10 μS

Los límites de detección y cuantificación para la técnica instrumental se presentan en los Cuadros 1 y 2, respectivamente.

Dióxido de nitrógeno

Para la determinación de los niveles de dióxido de nitrógeno, se utilizó el método de muestreo pasivo. El procedimiento pasivo de captación de muestras tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas hasta repartirse de manera uniforme en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación. Debido a estos fenómenos, un dispositivo situado en un ambiente contaminado durante cierto tiempo, será capaz de incorporar sobre el material captador dispuesto en su interior una determinada cantidad del contaminante, que será proporcional, entre otros factores, a su concentración ambiental (Herrera *et al.*, 2005).

Para el monitoreo de dióxido de nitrógeno en la Ciudad de Heredia, se ubicó diez puntos de medición como se observa en el mapa de la figura 1. La descripción detallada de cada uno de los sitios de muestreo se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 1. Límites de detección en aire obtenidos para el análisis de la concentración de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Sulfato	Nitrato	Cloruro
0,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 2. Límites de cuantificación en aire obtenidos para el análisis de la concentración de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Sulfato	Nitrato	Cloruro
0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

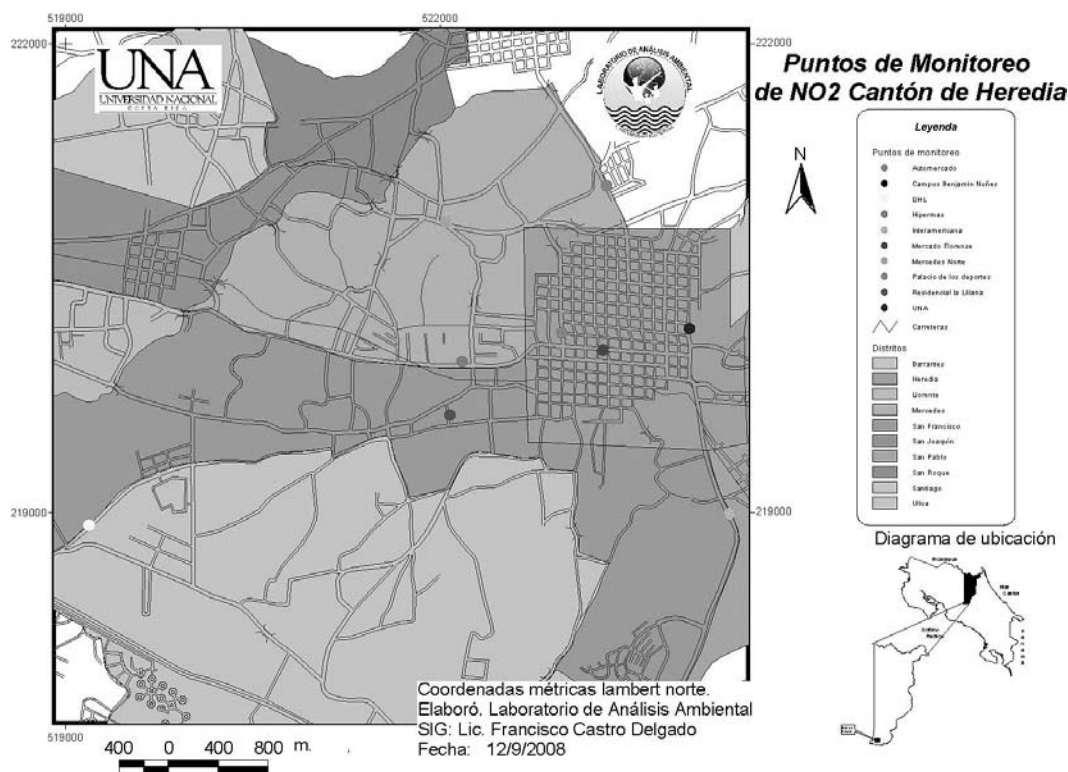


Figura 1. Ubicación de puntos de muestreo para el monitoreo de dióxido de nitrógeno en el Cantón Central de la Provincia de Heredia.

Cuadro 3. Descripción exacta de la ubicación de los sitios de muestreo de dióxido de nitrógeno en el Cantón Central de Heredia.

Punto de muestreo	Ubicación
1	Frente al Supermercado Hipermás, San Francisco de Heredia
2	Residencial La Lilliana, La Aurora de Heredia
3	Frente a las oficinas principales de DHL, La Aurora de Heredia
4	En la entrada principal del Campus Benjamín Nuñez de la Universidad Nacional, La Aurora de Heredia
5	Frente al Centro Comercial Paseo de las Flores, carretera Heredia- La Uruza
6	Frente al Edificio de la Oficina de Registro de la Universidad Nacional, calle nueve
7	Frente al Automercado, carretera Heredia-Barva
8	Costado sur de la Iglesia Católica de Mercedes Norte de Heredia
9	Costado este de las instalaciones del Palacio de los Deportes, Heredia
10	Costado norte del Mercado Central de la Ciudad de Heredia

Para cada uno de los sitios se calculó el promedio de 6 ó 4 réplicas de los tubos pasivos, expuestos durante 22 días en contenedores situados en postes del tendido eléctrico a una altura de 3 m en cada uno de los sitios de monitoreo, durante los meses de julio del 2005 a diciembre del 2006.

Para el muestreo del NO₂ se utilizó tubos pasivos marca Passam, los cuales constan de una malla impregnada de una disolución de trietanolamina y acetona, la cual, después de ser expuesta, se coloca en un vial al cual se agrega 5 ml del reactivo de Griess, para la generación de un complejo coloreado cuyo máximo de absorción se encuentra a 542 nm. La absorción de radiación a esa longitud de onda por parte del complejo, es proporcional a la concentración del dióxido de nitrógeno adsorbido en la malla.

Resultados y discusión

Partículas PM₁₀

En el Cuadro 4 se presenta la concentración media, mínima, máxima y la desviación estándar de la concentración de partículas PM₁₀ y de aniones (cloruro, sulfato y nitrato) presentes en ellas en los dos sitios de muestreo. Las concentraciones máximas para PM₁₀, así como las medias del período de muestreo, no sobrepasan los valores establecidos por el Decreto de Inmisiones de Contaminantes Atmosféricos de Costa Rica (Decreto 30221-SALUD), que establece 150 µgm⁻³ como valor de referencia para 24 horas y 50 µgm⁻³ como promedio anual.

Las medias de concentración de partículas PM₁₀ para ambos sitios resultaron ser significativamente diferentes entre sí al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis a un 5% de significancia, debido al hecho de que el punto situado en el balcón de la Rectoría de la Universidad Nacional recibe un mayor impacto de las emisiones vehiculares (tanto de vehículos particulares como de autobuses), al estar ubicado en el principal acceso a la ciudad por sus sectores sur y este. Pese a lo anterior, los niveles de aniones presentes en las partículas no son significativamente diferentes entre ambos sitios.

Si se comparan los valores de concentraciones de PM₁₀ obtenidos con los reportados por Herrera *et al.* (2006) para la Ciudad de San José, capital de Costa Rica, durante el mismo período de muestreo, se puede observar que se registra medias mayores para los sitios ubicados en la Ciudad de Heredia con respecto a San José (Catedral con 35,7 µg/m³ y Junta de Educación con 25,4 µg/m³). Lo anterior podría ser explicado debido a que el diseño vial de la Ciudad de Heredia presenta deficiencias en cuanto a la distribución del flujo vehicular, haciendo que las velocidades promedio de circulación disminuyan considerablemente. Si se realiza la misma comparación para las concentraciones de aniones en partículas PM₁₀, no se encuentra diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

Los contenidos de sulfatos en material particulado PM₁₀ encontrados en ambos sitios de muestreo resultaron ser mayores que los reportados por Mariani *et al.* (2007) para Río de Janeiro (1,12 µg/m³), pero menores a los indicados por Moya *et al.* (2003) para la Ciudad de México (3,54 µg/m³), lo anterior debido probablemente a la utilización, en Costa Rica, de combustibles fósiles con alto contenido de azufre, el cual, para el caso del diesel, oscila entre 4000 y 4500 ppm

Cuadro 4. Concentración media, máxima, mínima y desviación estándar (µg/m³) de partículas PM₁₀ y su contenido de aniones medidos en dos sitios de la Ciudad de Heredia, año 2006.

	Edificio de la Rectoría, Universidad Nacional				Plazoleta del Fortín			
	PM ₁₀	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	PM ₁₀	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
N	53	53	53	53	51	51	51	51
Máxima	93	4,42	1,64	3,50	51	4,03	2,13	3,16
Mínima	26	1,61	0,29	0,69	22	1,44	0,24	0,40
Media	47,6	2,78	0,88	1,58	30,8	2,57	0,80	1,37
Desviación Estándar	16,4	0,64	0,32	0,78	6,90	0,70	0,39	0,68

según datos de la Refinadora Costarricense de Petróleo.

En el Cuadro 5 se muestra los resultados del análisis de correlación de Spearman entre las concentraciones de PM_{10} y aniones presentes en el sitio de muestreo ubicado en la Rectoría de la Universidad Nacional y las correspondientes al Fortín de la Ciudad de Heredia. A partir de esto, se puede inferir que existe una buena correlación de las concentraciones entre sitios, lo cual permite presumir que la naturaleza de las fuentes de emisión y los procesos que afectan los niveles de inmisiones de contaminantes en ambos sitios son los mismos.

Es importante señalar que para ambos sitios se observa una correlación significativa entre los niveles de material particulado PM_{10} y las concentraciones de sulfato y nitrato a un nivel de significancia de $p < 0,02$, por lo que es probable que la presencia de los iones SO_4^{2-} y NO_3^- determinen la acidez de las partículas y que la acidez esté dada por H_2SO_4 .

Al aplicar el análisis de componentes principales mediante el software SYSTAT, versión 11 para Windows, a los datos analíticos (PM_{10} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) y a las

variables meteorológicas predominantes durante el muestreo, se obtiene que para ambos sitios de monitoreo, aproximadamente el 79% de la varianza total puede ser explicada por dos factores. En ambos casos el primer factor PC1 (ver Cuadro 6) muestra una fuerte relación entre la velocidad del viento y la concentración de cloruro, por lo que se puede concluir que el principal aporte a la concentración de este ion es de origen marino, ya que la dirección de los vientos predominantes en la ciudad es este-noreste provenientes del Mar Caribe.

El segundo factor PC2, para los dos sitios, evidencia la influencia de las actividades antropogénicas sobre la calidad del aire de la ciudad, ya que indica una relación importante entre el sulfato, el nitrato y la temperatura como variable meteorológica.

La principal influencia de la temperatura se da sobre los nitratos presentes en los aerosoles, ya que estos se distinguen de los sulfatos por la volatilidad del NO_3^- (como ácido nítrico) y del NH_4NO_3 (como $NH_3 + HNO_3$). El equilibrio



Cuadro 5. Matriz de correlaciones de Spearman entre las concentraciones de PM_{10} y aniones para cada uno de los sitios de muestreo ubicados en la Ciudad de Heredia.

		Rectoría UNA				Plazoleta del Fortín			
		PM_{10}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	PM_{10}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Rectoría UNA	PM_{10}	1,000							
	SO_4^{2-}	0,148	1,000						
	NO_3^-	0,122	0,609	1,000					
	Cl^-	-0,502	0,130	0,223	1,000				
Plazoleta del Fortín	PM_{10}	0,528	0,049	0,221	-0,381	1,000			
	SO_4^{2-}	-0,155	0,526	0,395	0,092	-0,151	1,000		
	NO_3^-	-0,182	0,384	0,695	0,175	-0,066	0,660	1,000	
	Cl^-	-0,588	0,173	0,294	0,756	-0,510	0,371	0,520	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,02$, $n = 52$.

Cuadro 6. Matriz de valores para los componentes principales obtenidos de los muestreos de material particulado PM₁₀ en la Ciudad de Heredia, 2006.

Variables	Edificio de la Rectoría, UNA		Plazoleta del Fortín	
	PC1	PC2	PC1	PC2
PM ₁₀	0,265	0,844	0,133	0,907
Lluvia	0,140	0,590	-0,863	-0,065
Temperatura	0,723	0,187	-0,626	0,657
Velocidad del Viento	0,198	0,713	0,886	-0,324
Sulfato	0,870	0,185	0,913	0,017
Nitrato	0,897	-0,080	0,910	0,109
Cloruro	0,394	0,793	0,430	0,746
Porcentaje de Varianza Explicado	44,7	34,5	46,6	34,8

Los valores de PC > 0,5 se consideran significativos.

es tal que a condiciones ambientales, las presiones parciales del amoníaco y del ácido nítrico son despreciables sobre el NH₄NO₃ cristalino lo mismo que sobre disoluciones que contengan iones amonio y nitrato. Debido a esto es necesario considerar ese equilibrio como una función

de la concentración o en forma equivalente de la actividad acuosa (Warneck, 1991).

Dióxido de nitrógeno

Al analizar los promedios anuales obtenidos para este gas (Cuadro 7), se puede observar que en al menos un sitio de la Ciudad (costado norte del Mercado Central) se supera el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud como referencia mensual de NO₂ (40 ug/m³). Es importante aclarar que dicho sitio se encuentra localizado en una avenida donde confluyen los autobuses de al menos siete rutas provinciales, ocasionando graves problemas de congestión vial. El promedio obtenido en este sitio es significativamente mayor ($p < 0,02$) que los niveles registrados para el Hospital San Juan de Dios y la Catedral Metropolitana en la Ciudad de San José (48 y 46 µg/m³ respectivamente), durante el mismo período de muestreo, de acuerdo con los datos reportados por Herrera *et al.* (2006).

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los diez sitios de muestreo

Cuadro 7. Promedios anuales de la concentración de dióxido de nitrógeno para los sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de Heredia, año 2005-2006.

Sitio de monitoreo	Valor máximo (µg/m ³)	Valor mínimo (µg/m ³)	Promedio (µg/m ³)	Mediana (µg/m ³)	Desviación Estándar (µg/m ³)	Varianza (µg/m ³) ²
1	40	21	30	28	5,0	25
2	20	8	14	14	4,0	16
3	45	19	29	30	6,8	45,5
4	32	14	24	24	5,8	33,5
5	32	11	20	21	6,6	43,8
6	37	24	32	30	3,7	13,7
7	37	16	24	24	6,4	40,7
8	29	14	20	20	4,7	22,1
9	45	24	32	30	6,8	45,7
10	78	43	62	62	9,9	99,6

ubicados en la Ciudad de Heredia. Janssen *et al.* (1989) han utilizado esta herramienta estadística con anterioridad para distinguir entre fenómenos locales y de larga escala en el análisis de contaminación del aire.

El valor y signo de cada uno de los factores que conforman los componentes principales permiten diferenciar si las características de las fuentes de emisión locales afectan las concentraciones locales de cada uno de los sitios de monitoreo. Estos resultados pueden ser utilizados para validar la clasificación de los sitios de monitoreo. El Cuadro 8 resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno en el período 2005-2006.

El porcentaje de la varianza total ($\text{Varianza} = \sum (X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 78,5%, lo que implica que las concentraciones de NO₂ en los distintos sitios de monitoreo están fuertemente correlacionadas (cambios en fase). Lo anterior indica que las variaciones en la concentración de este gas están determinadas principalmente por fenómenos de larga escala (meteorológicos). El segundo componente

muestra valores negativos para los sitios ubicados al sur de la Ciudad y positivos para aquellos ubicados en el sector norte, lo que hace presumir un gradiente sur-norte con concentraciones menores en los sitios ubicados al sur de la Ciudad de Heredia.

Conclusiones

Durante el año 2005-2006 se registró en la Ciudad de Heredia niveles de material particulado PM₁₀ con valores promedio anuales por debajo de la norma nacional, la cual establece 50 µg/m³ como referencia (Decreto MINSALUD-30221). Sin embargo, es importante señalar que la concentración de sulfato presente en dicho material alcanzó valores superiores a los registrados en ciudades como Río de Janeiro, producto probablemente de los altos contenidos de azufre presentes en los combustibles que utiliza la flotilla vehicular en Costa Rica.

El análisis de componentes principales indicó que existe una fuerte correlación entre las concentraciones de sulfato y de nitrato presentes en las partículas PM₁₀, señalando la contribución de fuentes antropogénicas. En el caso del cloruro, se destaca la fuerte relación existente con los parámetros meteorológicos registrados durante el período de muestreo.

En el caso del dióxido de nitrógeno, los promedios mensuales resultaron ser superiores para uno de los diez sitios ubicados en la Ciudad, superando la recomendación de la Organización Mundial de la Salud. Adicionalmente, se determinó que la variación en los niveles de este gas para todos los sitios se debía principalmente a fenómenos de larga escala (meteorológicos), con presencia de un gradiente sur-norte.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los funcionarios de la Municipalidad de

Cuadro 8. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales, utilizando los promedios mensuales de NO₂ registrados para los diez sitios ubicados en la Ciudad de Heredia, 2005-2006.

Sitio de muestreo	Primer Componente	Segundo Componente
1	0,904	0,265
2	0,921	-0,187
3	0,870	-0,240
4	0,951	-0,087
5	0,964	-0,028
6	0,418	-0,878
7	0,953	0,112
8	0,921	0,067
9	0,903	0,278
10	0,920	0,216
Porcentaje de la varianza total explicado	78,5	10,8

Heredia y de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud de Costa Rica, por la colaboración en la toma de muestras durante el monitoreo.

Bibliografía

1. Herrera, J.; Rodríguez, S., 2005. Segundo Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José. Informe Técnico, 35 pp.
2. Herrera, J.; Rodríguez, S., 2006. Tercer Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José. Informe Técnico, 37 pp.
3. Jaenicke, R., 1982. *Physical aspects of the atmospheric aerosol*. In: Georgii, H., Jaeschke, W. (Eds.), *Chemistry of the Unpolluted and Polluted Troposphere*. Reidel Publishing Company, 341–373 pp.
4. Janssen, L.H.J.M.; Visser, H.; Rokmer, F.G., 1989. *Analysis of large-scale sulphate, nitrate, chloride and ammonium concentrations in the Netherlands using an aerosol measuring network*. *Atmospheric Environment* N.º 23, 2783-2796 pp.
5. Mariani, R.; De Mello, W., 2007. $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ and associated water soluble inorganic species at a coastal urban site in the metropolitan region of Rio de Janeiro. *Atmospheric Environment* N.º 41, 2887–2892 pp.
6. Moya, M.; Castro, T.; Zepeda, M.; Baez, A., 2003. *Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City*. *Atmospheric Environment* N.º 37, 3581–3591 pp.
7. Raes, F.; van Dingenen, R.; Vignati, E.; Wilson, J.; Putaud, J.-P.; Seinfeld, J.H.; Adams, P., 2000. *Formation and cycling of aerosols in the global troposphere*. *Atmospheric Environment* N.º 34, 4215–4240 pp.
8. Seinfeld, S. H.; Pandis, S.N., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New York.
9. Strand, V.; Rak, S.; Svartengren, M.; Bylin, G., 1997. *Nitrogen dioxide exposure enhances asthmatic reaction to inhaled allergen in subjects with asthma*. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* N.º 155, 881–887 pp.
10. Strand, V.; Svartengren, M.; Rak, S.; Barck, C.; Bylin, G., 1998. *Repeated exposure to an ambient level of NO_2 enhances asthmatic response to a nonsymptomatic allergen dose*. *Eur. Respir. J.* N.º 12, 6–12 pp.
11. Warneck, P. (1991). *Chemical reactions in clouds*. *Fresenius J. Anal. Chem.* N.º 340, 585-590 pp.