



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

Tropical Journal of Environmental Sciences



Uso de muestreadores pasivos para la determinación de dióxido de nitrógeno en dos municipios del área metropolitana de Costa Rica en 2004-2013

Use of pasive samplers to determine nitrogen dioxide en two municipalities in the metropolitan area of Costa Rica in 2004-2013

Jorge Herrera ^a, Susana Rodríguez ^b, Erika Herrera ^c, José Félix Rojas ^d, Víctor Hugo Beita ^e y David Solórzano ^f

^a Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr ^b Química e investigadora en la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica, susana.rodriguez@ucr.ac.cr. ^c Química, responsable del Sistema de Calidad del Laboratorio de Análisis Ambiental mencionado, Costa Rica, erika.herrera.delgado@una.cr. ^d Químico e Investigador s investigador en dicho Laboratorio, Costa Rica, jfrojas60@yahoo.com. ^e Químico industrial, es encargado de la sección de aire de dicho Laboratorio, Costa Rica, victor.beita.guerrero@gmail.com. ^f Químico industrial, es analista en esta misma Sección, david.solorzano.arias@una.cr.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza
Enrique Leff, UNAM, México
Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica
Arturo Sánchez, Universidad de Alberta, Canadá
Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica
Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica
Gerardo Budowski (†), Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Uso de muestreadores pasivos para la determinación de dióxido de nitrógeno en dos municipios del área metropolitana de Costa Rica en 2004-2013

Jorge Herrera, Susana Rodríguez, Erika Herrera, José Félix Rojas, Víctor Hugo Beita y David Solórzano

J. Herrera, químico, es coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

S. Rodríguez, química, es investigadora en la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica. E. Herrera, química, es responsable del Sistema de Calidad del Laboratorio de Análisis Ambiental mencionado.

J. F. Rojas, químico, es investigador en dicho Laboratorio.

V. H. Beita, químico industrial, es encargado de la Sección de Aire del mismo Laboratorio.

D. Solórzano, químico industrial, es analista en esta misma Sección.

Resumen

Se evaluó el desempeño de los dispositivos pasivos para la determinación de dióxido de nitrógeno en veinticinco sitios de los cantones de San José y Belén, para lo que, primeramente, se determinó los parámetros de desempeño del método: límite de detección y cuantificación, sesgo y precisión, con lo cual se obtuvo resultados satisfactorios. Al menos cinco sitios en San José y cuatro en Belén presentan valores mayores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde al criterio recomendado por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Las

Abstract

The performance of passive devices was evaluated for the determination of nitrogen dioxide in twenty five sites of San José and Belén, for which first, the method parameters such as limit of detection and quantification were determined and the bias and precision results were satisfactory. At least five sites in San José and four in Belén have values greater than $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, which corresponds to that recommended by the World Health Organization criteria for this contaminant. The highest concentrations are presented for

Introducción

La contaminación atmosférica ha sido asociada a una amplia gama de efectos sobre la salud humana, incluyendo un mayor riesgo de mortalidad, aumento de las tasas de ingresos hospitalarios y visitas a urgencias, la exacerbación de enfermedades respiratorias crónicas (por ejemplo, asma) y la disminución de la función pulmonar (Samet y Krewski, 2007).

El deterioro de la calidad del aire es producto de una compleja mezcla de contaminantes, en la cual se incluye tanto partículas sólidas o líquidas como gases. La identificación de los compuestos específicos que contribuyen en mayor medida a generar

concentraciones mayores se presentan en sitios comerciales con alto flujo vehicular, donde llegan a alcanzar excedencias de hasta un 45 %. Si se compara estos valores con los obtenidos en años anteriores, se registra una tasa de incremento de 11 % y 13 % en sitios comerciales e industriales, respectivamente.

Palabras clave: dióxido de nitrógeno, muestreo pasivo, contaminación atmosférica, contaminación urbana, área metropolitana de Costa Rica.

commercial sites with high traffic flow where exceedances can reach up to 45 %. If these values are compared with those obtained for previous years a growth rate of 11 % and 13 % for commercial and industrial sites recorded respectively.

Keywords: nitrogen dioxide, passive sampling, air pollution, urban pollution, metropolitan area of Costa Rica.

un riesgo a la salud humana, producto de la exposición a la contaminación del aire, puede tener importantes implicaciones para el desarrollo de las políticas ambientales diseñadas para proteger la salud de la población. Aunque la evidencia más fuerte de vinculación de los contaminantes del aire con efectos adversos para la salud es para partículas (Dockery, 2009), muchos investigadores han informado de efectos en la salud independientes de gases contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO_2) (Chen et al., 2008), el ozono (Bell et al., 2005) y el dióxido de azufre (SO_2) (Kan et al., 2010).

Los óxidos de nitrógeno son gases de naturaleza inorgánica que se encuentran presentes en el aire ambiente y contribuyen en forma importante a la contaminación atmosférica. En forma gaseosa, los compuestos más importantes son el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el óxido nitroso (N_2O), mientras que los nitratos constituyen la forma particulada. El NO y el NO_2 son los gases más importantes en la atmósfera de los centros urbanos, producto, principalmente, de la quema de combustibles fósiles que acompañan a diferentes actividades antropogénicas.

Los datos obtenidos de estudios en personas sobre los efectos de la exposición a NO_2 en la función pulmonar han sido poco concluyentes, como ha ocurrido en estudios tendientes a demostrar la mayor sensibilidad de la población asmática a los efectos tóxicos de este contaminante. Sin embargo, esto puede deberse a que los índices de función pulmonar utilizados miden básicamente los cambios en las vías respiratorias principales, mientras que los efectos del dióxido de nitrógeno se producen en los bronquiolos terminales y alvéolos. No se han demostrado efectos genotóxicos de

la exposición a NO₂ en animales de laboratorio (Delfino, 2002). Recientemente se ha descubierto un papel más importante del NO₂ sobre la salud humana de forma indirecta. El NO₂, junto con el ozono, es capaz de reaccionar con las proteínas presentes en el aire para alterar su estructura y conferir a estas la capacidad de provocar alergias o de potenciar el efecto alérgico de algunas proteínas ya por sí solas alergénicas. Bajo condiciones de esmog urbano se observaron nitraciones *in situ* de residuos de tirosina de varias proteínas. Como prueba de esto se encontraron proteínas nitradas en el polvo de la calle, ventanas y en material particulado en zonas urbanas. La inhalación y deposición de estas proteínas en el tracto respiratorio humano puede activar respuestas inmunes y propiciar el desarrollo de alergias (Franze et al., 2005).

La medición de los niveles de NO₂ en aire se lleva a cabo, normalmente, a través de burbujeo de aire en un medio químico o mediante el uso de analizadores en línea en tiempo real, a través de la técnica de quimioluminiscencia (Hadad et al., 2005). Sin embargo, en los últimos años se han venido utilizando los muestreadores pasivos como técnica de análisis para la determinación de este gas, ya que es un método que requiere pocos recursos financieros y humanos, así que permite una mayor área de cobertura del monitoreo de calidad del aire. En los últimos años, se han realizado varios estudios con los que se han medido los niveles de NO₂ usando tubos de difusión pasiva en diferentes entornos urbanos (por ejemplo, Salem et al., 2009 y Ahmad et al., 2011)

El procedimiento pasivo para la cuantificación de dióxido de nitrógeno tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un compuesto en estado gaseoso, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas, hasta repartirse uniformemente en su seno, así como de

atravesar una membrana sólida que les presente una determinada capacidad de permeación. Debido a estos fenómenos, un dispositivo pasivo, situado en un ambiente contaminado durante cierto tiempo, es capaz de fijar sobre el material captador dispuesto en su interior una determinada cantidad del contaminante que será proporcional, entre otros factores, a la concentración ambiental de este (Ferm, 2001).

Considerando las leyes físicas de la difusión se llega a la expresión:

$$C = \frac{M \times L}{D \times A \times t} \quad (1)$$

siendo:

C=concentración ambiental media del contaminante

M = masa de contaminante captada

t = tiempo de captación

A = sección frontal del dispositivo de captación

L = longitud del espacio interno de difusión

D = coeficiente de difusión del contaminante

Dicha ecuación relaciona la concentración ambiental del contaminante con los parámetros levantados y constituye la base teórica fundamental para la utilización analítica de los dispositivos de captación de muestras por difusión.

Los parámetros de diseño físico A y L del captador y el coeficiente de difusión D del contaminante pueden englobarse en una constante Q:

$$Q = \frac{D \times A}{L} \quad (2)$$

Esta tiene las dimensiones de un caudal (volumen/tiempo), por lo que se denomina caudal equivalente de muestreo. De este modo resulta una expresión más sencilla para la concentración ambiental del contaminante captado:

$$C = \frac{M}{Q \times t} \quad (3)$$

Los valores de Q deben ser determinados para cada analito y modelo de captador y suele facilitarlos el fabricante del dispositivo de muestreo. También es posible integrar los parámetros L y A en una constante K , tal que $K = L/A$, y que será característica de cada modelo de captador, con lo que la concentración ambiental del contaminante responderá a la expresión:

$$C = \frac{M \times K}{D \times t} \quad (4)$$

En cualquiera de las expresiones indicadas para la concentración ambiental del contaminante, el valor de M corresponde a la masa del contaminante realmente captada, por lo cual el valor analítico encontrado deberá corregirse siempre que el coeficiente de recuperación analítico sea inferior a la unidad. La determinación de estos coeficientes se puede realizar mediante procedimientos semejantes a los empleados con el mismo fin en los captadores activos y sus valores suelen facilitarlos también los fabricantes de los dispositivos pasivos (Palmer y Gunnison, 1973).

El presente artículo busca mostrar los principales resultados obtenidos por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, en la aplicación de muestreadores pasivos para la determinación de niveles de dióxido de nitrógeno en el área metropolitana de Costa Rica, en la última década.

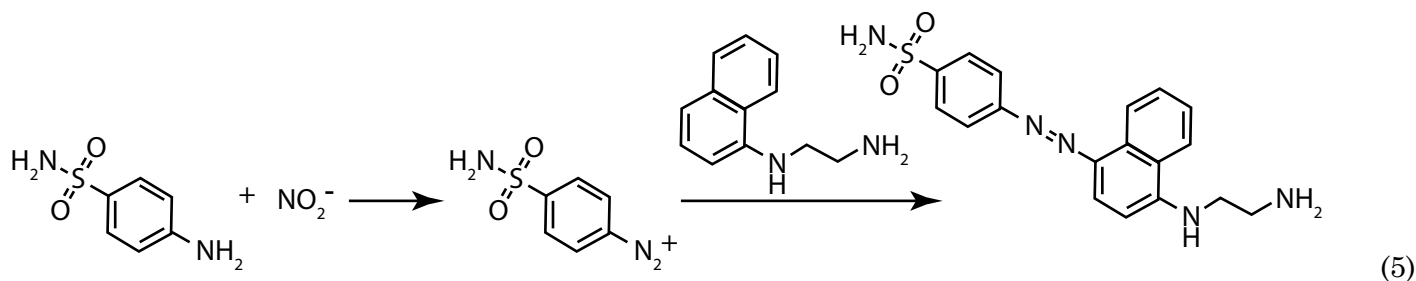
Sección experimental

Preparación de los tubos

Para la preparación de los colectores, se sumergieron mallas de acero de 11 mm de diámetro (superficie de absorción) en una disolución formada a partir de la mezcla de trietanolamina con acetona (relación 1:8), durante al menos 24 horas. Una vez impregnadas con la disolución absorbente, las mallas se colocaron en el interior de una tapa, la cual se acopla a un tubo colector de polipropileno (diámetro interno de 9,5 mm y largo de 7,4 cm). Los tubos se colocaron en contenedores de PVC en grupos de 4 o 6, con el fin de proteger los colectores. Los contenedores de PVC se ubican en postes del tendido eléctrico, a una altura no menor a los 3 m con respecto al nivel del suelo. Los tubos se expusieron en el sitio de muestreo por un plazo de 22 a 30 días, con el fin de, posteriormente, ser trasladados al laboratorio para su análisis.

Análisis químico de los tubos

Una vez expuestos los tubos, se removió la tapa y se colocaron las mallas en un vial de vidrio de 15 mL. Luego se agregaron 5 mL del reactivo de color (N-naftiletildiamina + sulfanilamida). Se tapó el frasco, se agitó y se dejó reposar un mínimo de 15 minutos. El dióxido de nitrógeno colectado en forma de NO_2^- , por medio de la reacción con la trietanolamina, reacciona con el reactivo de color, de acuerdo con la siguiente ecuación química:



El producto de esta reacción es un compuesto coloreado fucsia cuya absorbancia es proporcional a la concentración. Tanto a las muestras como a una curva de calibración compuesta por seis disoluciones patrón de NO_2^- (0 a 1 000 $\mu\text{g/l}$), preparadas a partir de la disolución madre de 1000 mg/l , se les midió la absorbancia a 542 nm. La masa de dióxido de nitrógeno colectada en cada tubo se determinó por interpolación en la curva de calibración, a partir de la cual se obtiene la concentración de NO_2 en el aire, tras utilizar la ecuación 4.

Validación del método de análisis

El método de análisis pasivo para la determinación de la concentración de dióxido de

nitrógeno se sometió a una rigurosa rutina de validación, en la cual se establecieron los siguientes parámetros: límite de detección, límite de cuantificación, sensibilidad, reproducibilidad, repetibilidad y sesgo de acuerdo con las orientaciones de la EURACHEM.

Selección de sitios de monitoreo

Para el monitoreo de los niveles de NO_2 en el área metropolitana, se seleccionaron un total de veinticinco sitios de muestreo distribuidos de acuerdo con como se indica en el cuadro 1. Las muestras se colectaron cada 22 días.

Cuadro 1. Localización de los sitios de muestreo utilizados en el monitoreo de NO_2 en el área metropolitana de Costa Rica

Sitio	Provincia	Cantón	Naturaleza del sitio	Ubicación exacta
1	San José	San José	Comercial	Hospital San Juan de Dios, Paseo Colón.
2	San José	San José	Comercial	Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana.
3	San José	San José	Comercial	150 m norte de la Antigua Estación del Ferrocarril al Pacífico.
4	San José	San José	Comercial	50 m este de la estación de servicio La Castellana, avenida 10.
5	San José	San José	Residencial	Avenida 26, calles 13 y 15, barrio La Cruz.
6	San José	San José	Residencial	200 m sur de la antigua fábrica Dos Pinos, barrio Luján.
7	San José	San José	Residencial	50 m sur y 100 este del edificio del Ministerio de Ambiente y Energía, barrio Francisco Peralta.
8	San José	San José	Comercial	Iglesia Santa Teresita, barrio Aranjuez.
9	San José	San José	Comercial	Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones de Costa Rica.
10	San José	San José	Comercial	75 m este del edificio del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
11	San José	San José	Comercial	Frente al edificio de la Junta Administradora de Puertos de la Vertiente Atlántica.
12	San José	San José	Residencial	150 m oeste de la iglesia de Barrio México.
13	San José	San José	Residencial	200 m sur del parque El Salvador, barrio Pithaya.
14	San José	San José	Industrial	Costado este de la industria Numar, barrio Cuba.
15	Heredia	Belén	Comercial	Frente al Hotel Ramada Herradura.
16	Heredia	Belén	Industrial	Frente a la plaza de La Asunción.
17	Heredia	Belén	Residencial	Residencial Cariari.
18	Heredia	Belén	Industrial	Frente a la empresa Kimberly Clark.
19	Heredia	Belén	Industrial	Costado norte de la empresa Firestone.
20	Heredia	Belén	Residencial	Frente al Hotel Marriot.

Sitio	Provincia	Cantón	Naturaleza del sitio	Ubicación exacta
21	Heredia	Belén	Residencial	Frente a la iglesia católica de La Ribera.
22	Heredia	Belén	Comercial	Frente a la entrada del Parque Ojo de Agua.
23	Heredia	Belén	Comercial	Costado norte del Palacio Municipal de Belén.
24	Heredia	Belén	Residencial	Frente al Polideportivo de Belén.
25	Heredia	Belén	Comercial	Cruce de Radial a Santa Ana.

Resultados y discusión

Validación del método

Con el propósito de realizar la validación del método, se determinó el nivel de concentración al cual la detección resulta problemática para el analito de interés, acorde con el método de análisis indicado anteriormente. Los límites de detección se calcularon según IUPAC (1995), para lo cual se analizaron diez muestras de blancos independientes medidos cada uno una vez. De acuerdo con IUPAC, los límites de detección se calculan como la concentración correspondiente a la señal promedio de los blancos más tres veces la desviación estándar (s) de dichas mediciones. Este enfoque asume que una señal más 3 s sobre el valor del blanco podría surgir del blanco menos 1 % de las veces, y por lo tanto es probable que haya surgido de algo más, como del mensurando.

Cuadro 2. Resultados de absorbancia obtenidos para los blancos evaluados en la validación del método

Número de blanco	Señal de absorbancia obtenida
1	0,0041
2	0,0048
3	0,0052
4	0,0045
5	0,0047
6	0,0050
7	0,0045
8	0,0043
9	0,0053
10	0,0047
Promedio	0,0047
Desviación estándar	0,0004

Al interpolar en la curva de calibración el valor correspondiente al promedio más tres veces la desviación estándar, se obtiene un límite de detección de 2,1 $\mu\text{g/l}$, el cual, si se considera un muestreo de 21 días consecutivos, equivale a 0,4 $\mu\text{g/m}^3$. En forma adicional, se determinó el límite de cuantificación; estrictamente, es la concentración más baja que puede ser determinada con un nivel aceptable de veracidad y está definido, por convención, como la concentración del analito correspondiente al valor del blanco más diez veces la desviación estándar de las señales obtenidas para las diez réplicas. El límite de cuantificación para el dióxido de nitrógeno corresponde a 2 $\mu\text{g/m}^3$. A partir de este dato, se determinó como intervalo de trabajo de 25 a 970 $\mu\text{g/l}$ con una sensibilidad de 0,001 UA/ $\mu\text{g/l}$.

Al utilizar una recta de regresión de “y” sobre “x” para realizar la cuantificación de un analito, es importante conocer si la desviación estándar de los valores de “y” aumenta con la concentración del analito (comportamiento heterocedástico), en vez de tener el mismo valor para todas las concentraciones (comportamiento homocedástico), con el fin de determinar el tipo de regresión que se va a utilizar, ponderada o no ponderada. Para estimar el comportamiento de las desviaciones estándar de las señales de “y”, se midieron cinco réplicas independientes de patrones a tres niveles de concentración. Al aplicarle una prueba F a las desviaciones estándar obtenidas para cada uno de los niveles de concentración, se encuentra que estas permanecen invariantes al aumentar la concentración, por lo que es necesario utilizar regresión no ponderada para cuantificar las muestras (cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados obtenidos en el estudio del comportamiento de las desviaciones estándar en las señales para tres niveles de concentración de NO₂

Intervalo	F calculado	F teórico	¿Existe diferencia significativa?
Bajo-Medio	4,650	9,123	No
Bajo-Alto	5,034	9,123	No
Medio-Alto	1,083	9,123	No

Una forma de determinar la eficacia de la extracción del método es realizar estudios de recuperación, para lo cual se analizaron blancos de matriz fortificados a tres niveles de concentración (25, 505 y 781 µg/l), en el intervalo lineal de trabajo (5 réplicas). A partir de los resultados obtenidos se graficó el valor teórico versus el experimental y se comprobó que la recta de mejor

ajuste tiene una pendiente y un intercepto, no significativamente distinto de uno y de cero, respectivamente (cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados de la prueba de exactitud del método analítico

Parámetro	Valor	Incertidumbre expandida	¿Cumple?
m	1,00	0,009	Sí
b	-3,9	4,8	Sí

Con el propósito de evaluar la precisión del método, se colocaron cuatro muestreadores pasivos, cada uno de ellos con seis tubos, en un poste de alumbrado público en el centro de la ciudad de Heredia, durante un período de 21 días. En el cuadro 5, se muestran los resultados obtenidos.

Cuadro 5. Evaluación de la precisión del método de análisis

Parámetro	Valor
Desviación típica de la repetibilidad (Sr)	1,4 µg/m ³
Desviación típica de la reproducibilidad (SR)	1,9 µg/m ³
Límite de repetibilidad (r)	3,8 µg/m ³
Límite de reproducibilidad (R)	5,5 µg/m ³
Coefficiente de variación de la repetibilidad (CVr)	4,0 %
Coefficiente de variación de la reproducibilidad (CVR)	5,7 %

Niveles de dióxido de nitrógeno

En el cuadro 6 se presenta el promedio anual de las concentraciones de NO₂ obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en los cantones de San José y Belén, durante los años 2011-2012. Tal como se puede notar, al menos cinco sitios en San José y cuatro en Belén presentan valores mayores a 40 µg/m³, que corresponde al valor anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo

vehicular, en donde se llegan a alcanzar excepciones de hasta un 45 % con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 11 % y 13 % para sitios comerciales e industriales, respectivamente. Es importante indicar que esta tasa aumentó ligeramente con respecto a la registrada en años anteriores, en la cual se registraban incrementos de hasta 10 % para zonas comerciales de alto flujo vehicular.

Cuadro 6. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en los cantones de San José y Belén, durante los años 2011-2012

Sitio de muestreo	Promedio anual 2011 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio anual 2012 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Cantón de San José		
Costado norte del Hospital San Juan Dios	55	59
Costado norte de la Catedral Metropolitana	43	46
Estación al Pacífico	29	31
Bomba La Castellana	42	44
Barrio Luján, Antigua Fábrica Dos Pinos	26	28
Barrio Francisco Peralta, cercanías del edificio MINAE	26	25
Barrio La Cruz	21	23
Avenida 10, AyA	29	31
Tribunal Supremo de Elecciones	19	17
Costado este de la iglesia Santa Teresita	23	21
JAPDEVA	40	42
Barrio México	26	28
Barrio Pithaya	29	32
Numar	41	40
Cantón de Belén		
Antiguo Hotel Herradura	42	45
Costado sur de la Plaza de Deportes La Asunción	44	46
Residencial Cariari	19	20
Costado norte de la Firestone	31	36
Frente al Hotel Marriot	25	27
Frente a la iglesia católica La Ribera	24	26
Parque recreativo Ojo de Agua	28	30
Costado norte de la municipalidad de Belén	42	44
Polideportivo Belén	20	18
Cruce Belén-Santa Ana	40	40
Antigua Kimberly Clark	19	21

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los sitios de muestreo ubicados en la ciudad de San José. 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 permite 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 7 resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno, en el período 2011-2012, para la ciudad de San José.

Cuadro 7. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales aplicados a los promedios mensuales de dióxido de nitrógeno, en la ciudad de San José, 2011-2012

	Primer componente	Segundo componente	Tercer componente
Varianza total explicada	44 %	35 %	21 %
Factores con valores < 0		Sitio 3: -0,914 Sitio 5: -0,986 Sitio 10: -0,824	Sitio 12: -0,403 Sitio 7: -0,312 Sitio 4: -0,126
Factores con valores > 0	Valores mayores: Sitio 1: 0,968 Sitio 6: 0,920 Sitio 13: 0,892 Sitio 9: 0,975 Sitio 11: 0,902 Valores menores: Sitio 3: 0,321	Sitio 12: 0,472 Sitio 11: 0,328	Sitio 8: 0,511 Sitio 1: 0,325 Sitio 3: 0,178

El porcentaje de la varianza total (Varianza = $\Sigma(X \text{ modelo} - X \text{ medida})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 44 %, 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 mesoescala (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 San José.

El tercer componente extraído muestra valores positivos para sitios de alto flujo vehicular, con importante concentración de actividades comerciales, y valores negativos para zonas residenciales. Esto evidencia la importante influencia de las emisiones de fuentes móviles en la calidad del aire de la ciudad de San José.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la validación de la metodología, los métodos de difusión pasiva presentan parámetros de desempeño adecuados para el uso previsto de ellos. Esto permite determinar, en forma económica, los niveles de dióxido de nitrógeno existentes en centros urbanos con un nivel de exactitud que, si bien es cierto no se compara a los resultados obtenidos con analizadores automáticos, en cuanto a su resolución, permite realizar diagnósticos iniciales y estudiar el comportamiento de las tendencias de los contaminantes atmosféricos.

Lastimosamente, si se compara la evolución histórica de los niveles de NO₂, se determina que al menos en cinco sitios de la ciudad de San José y en cuatro de Belén se obtienen valores que superan el criterio de la Organización Mundial de la Salud, principalmente, en zonas comerciales con alto flujo vehicular, en donde la tendencia anual, en el período 2011-2012, ha sido al alza a una tasa promedio cercana al 13 % para San José. Por lo tanto, es recomendable generar políticas públicas tendientes a mejorar la vialidad en estos puntos

y a permitir una mayor sostenibilidad del crecimiento urbano, sin causar deterioro a la salud de sus habitantes. Así, se favorece el uso de transporte público sobre los vehículos individuales.

El análisis de componentes principales, desarrollado utilizando la base de datos, muestra que la mayoría de los sitios presentan una fuerte correlación. Lo anterior podría evidenciar que hay una interconexión entre esos sitios, debido al movimiento de masas de aire y a la naturaleza misma de las fuentes que originan las emisiones de dióxido de nitrógeno, en donde tanto el transporte público como privado juegan un rol preponderante.

Referencias

- Ahmad, S. S., Biiker, P., Emberson, L. y Shabbir, R. (2011). Monitoring nitrogen dioxide levels in urban areas in Rawalpindi, Pakistan. *Water, Air and Soil Pollution* 220, 141-150.
- Bell, M. L., Dominici, F. y Samet, J. M. (2005). A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. *Epidemiology* 16, 436-445.
- Chen, G., Song, G., Jiang, L., Zhang, Y., Zhao, N. y Chen, B. (2008). Short-term effects of ambient gaseous pollutants and particulate matter on daily mortality in Shanghai, China. *Journal of Occupational Health* 50, 41-47.
- Delfino, R. J. (2002). Epidemiologic evidence for asthma and exposure to air toxics: linkages between occupational, indoor, and community air pollution research [Review]. *Environmental Health Perspectives* 110, 573-589.
- Dockery, D. W. (2009). Health effects of particulate air pollution. *Annals of Epidemiology* 19, 257-63.
- Ferm, M. (2001). The theories behind diffusive sampling. *Proceedings from the International Conference on Measuring Air Pollutants by Diffusive Sampling, Montpellier, France, 26-28 September 2001*, pp. 31-40.
- Franze, T., Niessner, R., Pöschl, U. y Weller, M. (2005). Protein nitration by Polluted Air. *Environmental Science and Technology* 39, 1673-1678.
- Hadad, K., Safavi, A. y Tahon, R. (2005). Air pollution assessment in Shiraz by passive sampling techniques, Iran. *Journal of Science and Technology* 29 (A3), 471.
- Kan, H., Wong, C. M., Vichit-Vadakan, N. y Qian, Z. (2010). Short-term association between sulfur dioxide and daily mortality: the Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA) study. *Environmental Research* 110, 258-264.
- Palmes, E. D. y Gunnison, A. F. (1973). Personal monitoring device for gaseous contaminants. *American Industrial Hygiene Association Journal* 34, 78-81.
- Salem, A. A. Soliman, A. I. y Haty, E. (2009). Determination of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone and ammonia in ambient air using the passive sampling method associated with ion chromatographic and potentiometric analyses. *Air Quality and Atmosphere Health* 2, 133-145.
- Samet, J. y Krewski, D. (2007). Health effects associated with exposure to ambient air pollution. *Journal of Toxicological Environment Health A* 70, 227-242.