



Química medioambiental. Metodología pasiva empleada para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos

David Galán Madruga

Área de Contaminación Atmosférica. Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Instituto de Salud Carlos III. Majadahonda (Madrid). España

(*) david.galan@isciii.es

Recibido: 05/04/2013

Revisado: 21/06/2013

Aceptado: 04/08/2013

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de aquellos aspectos teóricos que caracterizan la metodología pasiva enfocada a la toma de muestra de contaminantes atmosféricos dentro del marco de la química medioambiental. A tal efecto, el presente documento se centrará en aspectos relacionados con el fundamento de la toma de muestra, variables atmosféricas que afectan a dicha metodología, diferentes tipos de muestreadores pasivos y cálculo de la concentración ambiental de un determinado contaminante atmosférico cuya toma de muestra se haya llevado a cabo mediante el empleo de la metodología pasiva. Por último, se establecerá el alcance de utilización de este tipo de metodología, como, las aplicaciones que este tipo de metodología permite realizar con la finalidad de controlar y evaluar la calidad del aire ambiente, dado que la contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas a nivel mundial.

Palabras clave: Sistemas pasivos; fundamento; calidad del aire; contaminación atmosférica, técnicas de medición

Abstract

The objective of the present work is the development of those theoretical aspects that characterize the passive methodology focused on the sampling of atmospheric pollutants within the framework of environmental chemistry. To this end, this document will focus on those aspects related to the foundations of sampling, the atmospheric variables which affect that methodology, the different types of passive samplers and the calculation of environmental concentration of an atmospheric pollutant whose sampling has been carried out by using a passive methodology. Finally, it will be established the range of use of this type of methodology, it means, the applications this type of methodology can carry out with the aim of controlling and evaluating air quality, because atmospheric pollution is one of the biggest worldwide problems.

Key: Passive samplers; foundation; air quality; atmospheric pollution, measurement techniques

Introducción

A lo largo de la historia, la interacción entre el ser humano y el medioambiente ha provocado la aparición de nuevos factores de riesgo para la salud humana asociados al crecimiento industrial y tecnológico.

Numerosos estudios científicos ponen de manifiesto la relación entre calidad del aire y efectos nocivos sobre el ser humano y el medioambiente¹⁻⁸. Como consecuencia de ello, la calidad de vida del ser humano va ligada, entre otros factores, a la calidad del aire que respira.

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más graves a nivel mundial, entendiéndose como contaminación atmosférica la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza⁹.

La Organización Mundial de la Salud establece en más de 2 millones de muertes prematuras cada año, que pueden ser atribuidas a los efectos de la contaminación atmosférica en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados¹⁰.

La ejecución de numerosos proyectos de investigación muestran que actualmente la contaminación atmosférica continúa representando un riesgo para la salud de la población¹¹⁻¹⁵, por tanto, resulta fácil entender la necesidad de controles y vigilancia de ésta¹⁶⁻¹⁷, que permitan proporcionar conocimiento referente a los niveles de los contaminantes atmosféricos, tanto en ambientes exteriores como en ambientes interiores, enfocados a encontrar medidas efectivas que permitan la disminución de su presencia en el aire ambiental con el objetivo final de mejorar la calidad de vida y, por tanto, la salud del ser humano, aspectos recogidos en la disciplina de Salud Pública.

La importancia de este factor radica en que numerosos contaminantes atmosféricos, tales como ozono, hidrocarburos aromáticos policíclicos, amoniaco, compuestos orgánico volátiles, etc., presentan un nivel de fondo residual como consecuencia de procesos naturales, siendo necesario el conocimiento en las variaciones existentes en sus niveles atmosféricos.

El objetivo del presente artículo es realizar una revisión de la metodología pasiva, tratando aspectos relacionados con su fundamento, cálculo de la concentración ambiental del contaminante a evaluar, clasificación, variables que influyen en la toma de muestras y aplicaciones, así como su comparación con otras técnicas de medida de contaminantes atmosféricos.

Técnicas de muestreo y análisis de contaminantes atmosféricos

En las últimas décadas, como consecuencia de la necesidad de control y evaluación de los contaminantes atmosféricos, se han desarrollado diversas metodologías para el muestreo y análisis de éstos.

Entre las diferentes metodologías de medida de contaminantes atmosféricos se distinguen:

Muestreadores activos: son dispositivos que requieren energía eléctrica para aspirar el aire, que se pretende evaluar, a través de un medio de captación físico o químico.

Sensores remotos: a diferencia de los demás sistemas, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto en el espacio, los sensores remotos proporcionan mediciones de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera.

Normalmente, los sensores remotos se utilizan en investigaciones cerca de fuentes de emisión, en mediciones verticales de contaminantes gaseosos, como puede ser la distribución del ozono en la troposfera y en la estratosfera.

Bioindicadores: son dispositivos utilizados para evaluar la calidad del aire ambiente. Existen diversos métodos con diferentes grados de sofisticación. Estos métodos incluyen:

- Uso de la superficie de las plantas como receptoras de contaminantes. La planta actúa de muestreador, siendo recolectada y analizada en laboratorio.
- Uso de la capacidad de la planta para acumular contaminantes o sus metabolitos en el tejido de la planta. El tejido de la planta es recolectado y analizado en laboratorio.
- Estimación de los efectos de los contaminantes en el metabolismo o en la información genética de las plantas.

- Estimación de los efectos de los contaminantes en la apariencia de la planta.

Analizadores automáticos^{18,19}: son equipos basados en propiedades físicas o químicas del gas que se pretende captar, utilizando métodos opticoelectrónicos, como por ejemplo la quimio-luminiscencia, definida ésta como la emisión de radiación ultravioleta, visible o infrarroja a partir de una molécula o átomo como resultado de la transición de un estado eléctricamente excitado²⁰.

Sistemas pasivos: son dispositivos capaces de tomar muestras de gases o vapores de la atmósfera a una velocidad controlada por un proceso físico (difusión gaseosa) a través de una capa de aire estática o un material poroso y / o permeación a través de una membrana, pero que no implica movimiento activo de aire a través del dispositivo²¹.

En la tabla I se muestran las principales ventajas e inconvenientes de las diferentes técnicas mencionadas anteriormente²².

Metodología pasiva

Fundamento de la metodología pasiva

En función del proceso físico que tiene lugar durante la fase de toma de muestra del contaminante atmosférico, hay que considerar dos procesos fundamentales²³:

Absorción: la absorción es una operación de transferencia de materia que consiste en poner un gas en contacto con un líquido para que éste disuelva determinados componentes del gas.

Adsorción: la adsorción es una operación por la que un material adsorbido queda retenido en un medio sólido²⁴.

Cálculo de la concentración ambiental del contaminante atmosférico a evaluar mediante el empleo de la metodología pasiva

Las moléculas de los contaminantes atmosféricos, en fase gaseosa o vapor, son transportados mediante difusión molecular, en función de la temperatura y la presión ambiental, al interior del sistema pasivo donde queda retenido en un sorbente químico, por tanto, el mecanismo de captación responde a un gradiente de concentración de dicho contaminante atmosférico, entre la concentración ambiental y la concentración en el sorbente del dispositivo pasivo.

El proceso físico que regula este mecanismo de difusión está reglado por la primera ley de Fick de la difusión²⁵, que relaciona el flujo de un gas, que difunde desde una región de alta concentración, con el tiempo de exposición y el

Tabla I: Ventajas e inconvenientes de las técnicas de medida de contaminantes atmosféricos

Técnica	Ventajas	Inconvenientes
Muestreadores activos	Bajo coste Fácil de operar Operación segura Datos históricos	Medidas diarias Trabajo intensivo Requiere análisis en laboratorio
Sensores remotos	Proporcionan datos en un determinado espacio Útil cerca de las fuentes Medidas de multicomponentes	Muy complejos Difíciles de operar calibrar y validar No siempre comparables
Bioindicadores	Bajo coste Fácil de operar	Requiere análisis en laboratorio Problemas de normalización y comparación de las técnicas
Analizadores automáticos	Comprobados Altas características Datos horarios Información en tiempo real	Complejos Costosos Requiere gran adiestramiento Costes elevados
Muestreadores pasivos	Muy bajo coste Muy sencillos Útiles para estudios de base	No útiles para algunos contaminantes En general, proporcionan medias mensuales y semanales

área del captador, que está expuesto al contaminante²⁶⁻²⁸, según el siguiente desarrollo:

$$F = D \cdot \frac{[CG]}{L} \quad (\text{ec. 1})$$

siendo: F Flujo de gas a evaluar (moles/cm²*min),
 D Coeficiente de difusión del gas (cm²*min),
 $[CG]$ Concentración del contaminantes gaseoso a evaluar (moles/cm³) y
 L Longitud de la zona de difusión (cm)

La cantidad de gas, Q (mol), que difunde a través del sistema pasivo está directamente relacionado con el área de la capa de aire estacionario, A (m²), la longitud, L (m), y el tiempo de muestreo, t (min)²⁹⁻³¹.

$$Q = F \cdot A \cdot t \quad (\text{ec. 2})$$

Sustituyendo el valor de F en la Ec. 2, queda³²:

$$Q = D \cdot \frac{[CG]}{L} A \cdot t \quad (\text{ec- 3})$$

Teniendo en cuenta que el coeficiente de captación, CC (cm³/min), queda definido por la siguiente ecuación:

$$CC = \frac{D \cdot A}{L} \quad (\text{ec. 4})$$

Sustituyendo el coeficiente de captación en la ec. 3 queda:

$$Q = CC \cdot [CG] \cdot t \quad (\text{ec. 5})$$

Por lo tanto, conociendo la cantidad de gas que ha difundido a través del sistema o dispositivo pasivo y el coeficiente de captación puede calcularse la concentración

ambiental del contaminante objeto de estudio en aire ambiente durante el periodo de muestreo³³.

Clasificación de la metodología pasiva

Los sistemas pasivos se pueden clasificar con base en dos criterios:

- En función del medio de retención y
- En función del contaminante a evaluar

Diversos dispositivos pasivos incluyen diferentes tipos de soporte para el agente reactivo, con el cual se pretende captar el contaminante atmosférico de interés, siendo éstos: sorbentes, líquidos y filtros.

Entre ellos el más versátil para componentes reactivos es el dispositivo o sistema pasivo de filtros. Mediante esta técnica, pueden determinarse contaminantes orgánicos e inorgánicos

En función del medio de retención

Tipo sorbente: Entre ellos, el dispositivo pasivo más disponible comercialmente utiliza carbón activo como medio de captación. Se utilizan para compuestos de elevado peso molecular que son captados mediante carbón activo por procesos de descomposición, polimerización o adsorción irreversible. Para componentes con un menor peso molecular, como ciertos monómeros orgánicos, cetonas y fenoles se utilizan polímeros orgánicos porosos, tales como Tenax.

Tipo líquido: Un diseño típico de este tipo de sistemas presenta una unidad impermeable, donde queda incluido el medio líquido, y una membrana permeable para gases.

Tipo filtro: Este tipo de sistemas son utilizados para componentes altamente reactivos y de bajo peso molecular, tales como aldehídos, aminas, diisocianatos, compuestos inorgánicos (óxidos de nitrógeno, ozono, amoníaco, dióxido de azufre, etc.) y orgánicos (formaldehído, compuestos orgánicos volátiles, etc.).

El concepto de estos dispositivos pasivos tipo filtro se basa en el principio de quimiosorción, consistente en la retención del contaminante atmosférico en un reactivo que cubre conveniente un soporte sólido.

Durante el periodo de exposición a la atmósfera, se forma un derivado estable “*in situ*” sobre el adsorbente. Éste es desorbido y determinado en laboratorio mediante una técnica analítica apropiada. Para el correcto funcionamiento de esta metodología es necesario que se cumplan una serie de criterios:

- La reacción entre el agente reactivo captador y el contaminante a evaluar debe ser rápida y cuantificable,
- El agente quimiosorbente debe ser químicamente estable,
- El derivado de la reacción, debe ser químicamente estable y
- La desorción y el derivado deben ser cuantificables³⁴.

En función del contaminante a evaluar

Actualmente, existe una gran cantidad de contaminantes que pueden ser evaluados a partir de la metodología pasiva (tanto gases orgánicos como inorgánicos)³⁵.

En la tabla II se muestra una revisión de estudios científicos que emplean la metodología pasiva para la toma de muestra de los contaminantes atmosféricos más significativos, en base a sus potenciales efectos nocivos sobre la salud humana.

Variables que influyen en la captación de contaminantes atmosféricos empleando la metodología pasiva

En un principio, el coeficiente de captación de un dispositivo pasivo es constante y debería depender únicamente de la geometría del muestreador y del coeficiente de difusión del contaminante gaseoso a evaluar. Sin embargo, el coeficiente de captación puede variar ligeramente con cambios en las condiciones atmosféricas, así como por la existencia de turbulencias⁷².

Efecto de la temperatura y presión

Es importante establecer la influencia de la temperatura y presión medioambiental para verificar las condiciones de trabajo del muestreador pasivo.

La cantidad de sustancia recolectada, m , mediante el uso de un dispositivo pasivo variará acorde a la concentración, C , y al coeficiente de difusión, D , del gas a recolectar⁷³

$$m = f(C, D) \quad (\text{ec. 6})$$

- donde: m Cantidad de sustancia recolectada (μg),
 C Concentración ambiental del gas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y
 D Es el coeficiente de difusión del gas (m^2/min).

Tabla II: Revisión de estudios científicos

Contaminante atmosférico	Referencia bibliográfica
NH_3 (amoníaco) ³⁶⁻⁴⁰	Adon <i>et al.</i> , 2010 ³⁶ ; Cisneros <i>et al.</i> , 2010 ³⁷ ; Gadsdon y Power, 2009 ³⁸ ; Puchalski <i>et al.</i> , 2011 ³⁹ ; Perrino y Catrambone, 2004 ⁴⁰
NO_2 (dióxido de nitrógeno) ^{41,45}	Beckerman <i>et al.</i> 2008 ⁴¹ , Minguay <i>et al.</i> , 2006 ⁴² ; Meng <i>et al.</i> , 2008 ⁴³ ; Sekine <i>et al.</i> , 2008 ⁴⁴ ; Wheeler <i>et al.</i> , 2011 ⁴⁵
Compuestos orgánico volátiles, formaldehído y ácido acético ⁴⁶⁻⁵³	Lan <i>et al.</i> , 2012 ⁴⁶ ; Paschke y Popp, 2005 ⁴⁷ ; Pegas <i>et al.</i> , 2010 ⁴⁸ ; Scheepers <i>et al.</i> , 2010 ⁴⁹ ; Stranger <i>et al.</i> , 2009 ⁵⁰ ; Thoma <i>et al.</i> , 2013 ⁵¹ ; Tuduri <i>et al.</i> , 2012 ⁵² ; Zabiegała <i>et al.</i> , 2011 ⁵³
Compuestos orgánicos persistentes ⁵⁴⁻⁵⁹	Allan <i>et al.</i> , 2012 ⁵⁴ ; Harner <i>et al.</i> , 2006 ⁵⁵ ; Pozo <i>et al.</i> , 2011 ⁵⁶ ; Schuster <i>et al.</i> , 2012 ⁵⁷ ; Shoeib <i>et al.</i> , 2002 ⁵⁸ ; Wania <i>et al.</i> , 2003 ⁵⁹
SO_2 (dióxido de azufre) ⁶⁰⁻⁶³	Cruz <i>et al.</i> , 2004 ⁶⁰ ; Gibson <i>et al.</i> , 2013 ⁶¹ ; Meng <i>et al.</i> , 2010 ⁶² ; Zou <i>et al.</i> , 2007 ⁶³
O_3 (ozono) ⁶⁴⁻⁶⁹	Bhangar <i>et al.</i> , 2013 ⁶⁴ ; Karthikeyan <i>et al.</i> , 2007 ⁶⁵ ; Krzyzanowski, 2004 ⁶⁶ ; Plaisance <i>et al.</i> , 2007 ⁶⁷ ; Roukos, <i>et al.</i> , 2011 ⁶⁸ ; Sicard <i>et al.</i> , 2011 ⁶⁹
H_2S (sulfuro de hidrógeno) ⁷⁰	Nash and Leith, 2010 ⁷⁰
Hg_g (mercurio gaseoso) ⁷¹	Peterson <i>et al.</i> , 2012 ⁷¹

Por un lado, la concentración puede ser obtenida a partir de la ecuación general de los gases:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{ec. 7})$$

- donde: P Presión (atm),
 V Volumen (l),
 n Número de moles (mol),
 R Constante de los gases ideales ($\text{atm} \cdot \text{l} / \text{K} \cdot \text{mol}$)
 T Temperatura (K)

Despejando la presión:

$$P = \frac{n}{V} \cdot R \cdot T \quad (\text{ec. 8})$$

Sustituyendo $\frac{n}{V}$ por la concentración, y despejando ésta, queda:

$$C = \frac{P}{T} \cdot \frac{1}{R} \quad (\text{ec. 9})$$

El término $\frac{1}{R}$ es constante y por tanto no afecta a la concentración. Así, la Ec. 9 quedaría:

$$C = \frac{P}{T} \quad (\text{ec. 10})$$

Por otro lado, el coeficiente de difusión del gas viene dado por la ecuación de Maxwell⁷⁴, y se define función de temperatura y presión.

$$D = f \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P} \quad (\text{ec. 11})$$

Sustituyendo la Ec. 10 y Ec. 11 en la Ec. 6, quedaría:

$$m = f \left(\frac{P}{T}, \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P} \right) \quad (\text{ec. 12})$$

A partir de lo anteriormente mencionado, se deduce que la toma de muestra de contaminantes atmosféricos empleando la metodología pasiva, así como el cálculo de su concentración ambiental, la presión no presenta influencia alguna, siendo la temperatura la variable que afecta en este proceso.

Efecto de la humedad relativa

El efecto de la humedad relativa sobre la captación de gases atmosféricos depende del material recolector sobre el cual se pretende fijar el gas objeto de estudio, enfocándose su influencia, por tanto, sobre la capacidad captadora de dicho material, pero no afectando a la capacidad de toma de muestra.

Efecto de las turbulencias

La capacidad de toma de muestra de los dispositivos pasivos, basada en la ley de Fick, es válida en condiciones estacionarias. En condiciones no estacionarias, debidas a la aparición de turbulencias, la masa de gas recolectada puede verse alterada⁷⁵⁻⁷⁶, afectando directamente a la concentración calculada, la cual puede verse sobreestimada.

Por ello, en condiciones de aire estático, no hay un transporte significativo de material desde el exterior del muestreador al interior del mismo, existiendo un proceso

difusivo. Sin embargo, cuando estas condiciones se rompen (condiciones de turbulencias en el interior del dispositivo pasivo), el proceso difusivo se ve incrementado por un transporte turbulento en el interior del dispositivo, produciendo un aumento de la masa recolectada y una sobreestimación de la concentración.

El posible efecto, que las turbulencias, puedan producir sobre la recolección de la muestra gaseosa, se reduce mediante el uso de cubiertas protectoras.

Esquema general de un dispositivo pasivo

Las figuras I, II, III y IV muestran diferentes ejemplos de dispositivos pasivos diseñados en diferentes formas (Fuente: Wongniramaikul, 2012⁷⁷).

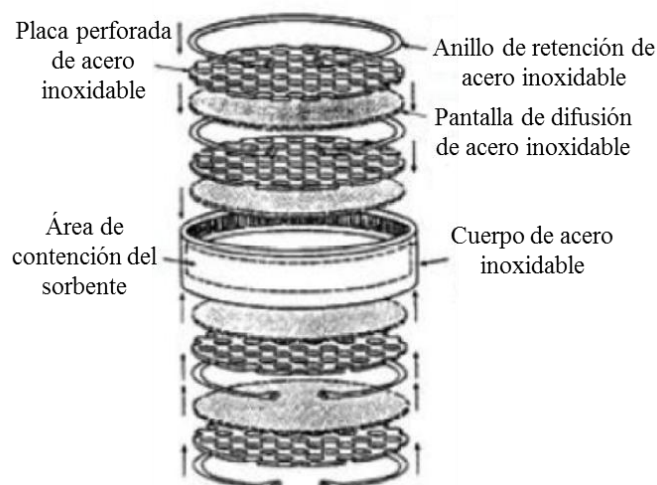


Fig. 1: Dispositivo pasivo diseñado en forma de tipo cartucho. Fuente: Krupa and Legge⁷⁸

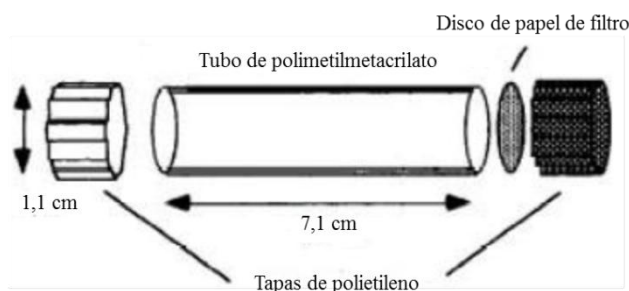


Figura II: Dispositivo pasivo diseñado en forma de tipo tubo. Fuente: Gibson *et al.*⁷⁹

Aplicaciones de la metodología pasiva

La evaluación de contaminantes atmosféricos mediante el empleo de los dispositivos pasivos abarca el siguiente abanico de aplicaciones⁸²:

- Estudios de amplia cobertura espacial,
- Estudios de fondo.

- Estudios preliminares de evaluación de la calidad del aire,
- Optimización de redes de evaluación y gestión medioambiental,
- Estudios de exposición individual: principalmente para el desarrollo de estudios epidemiológicos,
- Estudios en ambientes interiores,
- Identificación de fuentes de contaminantes atmosféricos
- Análisis de la tendencia de la calidad del aire en ambientes interiores

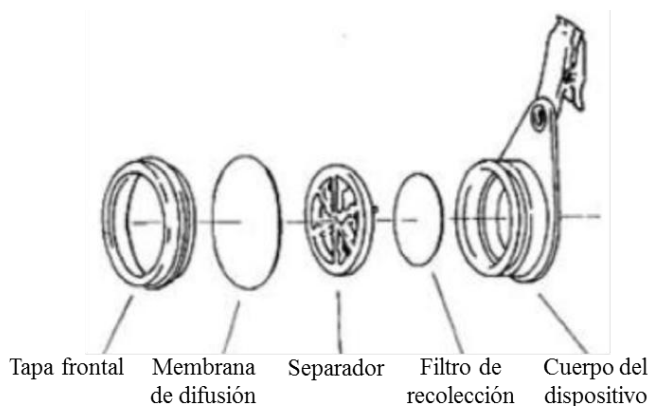


Figura III: Dispositivo pasivo diseñado en forma de tipo insignia. Fuente: Zhou and Smith⁸⁰

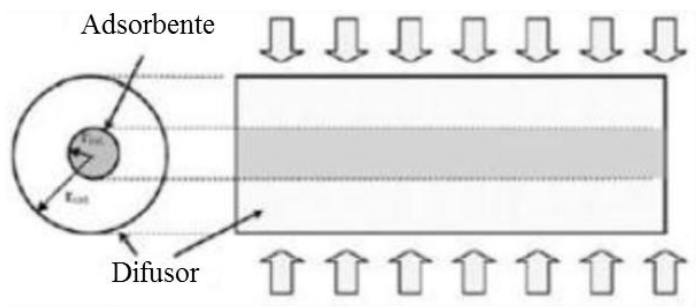


Figura IV: Dispositivo pasivo diseñado en forma de tipo radial. Fuente: Bruno *et al.*⁸¹

Conclusiones

Si se tiene en cuenta que la salud humana, y por lo tanto su calidad de vida, por un lado, están directamente relacionados con la calidad del aire que respira y, por otro lado, se engloba a la contaminación atmosférica como un grave problema de salud pública, resulta fácil entender la necesidad de control y evaluación de la calidad del aire.

Existen diferentes métodos de medición de contaminantes atmosféricos. En el presente artículo se describen, entre otros aspectos, el fundamento y clasificación de la metodología pasiva. Los dispositivos pasivos son una alternativa válida para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos, dadas las ventajas que

presentan respecto a otras metodologías, tales como el bajo coste de este tipo de dispositivos y su no dependencia del suministro eléctrico.

Por ello, la metodología pasiva es idónea para la realización de estudios de calidad del aire, abarcando un amplio abanico de aplicaciones dentro de esta materia.

Referencias

1. NM Montaña, AL Sandoval. Contaminación atmosférica y salud. **Elementos**, **65**, 29-33 (2007).
2. C Cabrera, M. Maldonado, W Arévalo, R. Pacheco, A. Giraldo, S Loayza. Relaciones entre calidad ambiental y calidad de vida en Lima Metropolitana. **Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal Cienc. Geogr**, **5**, 47-52 (2002).
3. B Brunekreef, ST Holgate. Air pollution and health. **Lancet**, **360**, 1233-1242 (2002).
4. CK Chan, X Yao. Air pollution in mega cities in China. **Atmosph. Environ.**, **42**, 1-42 (2008).
5. F Ballester. Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. **Rev Esp Salud Pública**, **79**, 159-175 (2005).
6. P Sheffield, A Roy, K Wong, L Trasande. Fine Particulate Matter Pollution Linked To Respiratory Illness In Infants And Increased Hospital Costs. **Health Affairs**, **30**, 871-878 (2011).
7. N Kumar. Uncertainty in the relationship between criteria pollutants and low birth weight in Chicago. **Atmosph. Environ.**, **49**, 171-179 (2012).
8. A Jarma, C Cardona, H Araméndiz. Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: Una revisión. **Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**, **15**, 63-76 (2012).
9. **Ley 38/1972**, de 22 de diciembre de Protección del Medio Ambiente Atmosférico. Boletín Oficial Español 26/12/72, España. Accesible a través de: http://medioambiente.ugtaragon.es/Normativa/pdf/atmosfera/atm_es_complete.pdf
10. OMS (Organización Mundial de la Salud). Resumen de evaluación de riesgos. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. **WHO/SDE/PHE/OEH/06.02** (2006).
11. E Alonso, T Martínez, K Cambra, L López, E Boldo, B Zorrilla. Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. Proyecto europeo APHEIS. **Rev Esp Salud Pública**, **79**, 297-308 (2005).
12. F Ballester. Vigilancia de los riesgos ambientales en salud pública. El caso de la contaminación atmosférica. **Gac Sanit.**, **19**, 253-257 (2005).
13. F Ballester, P Rodríguez, C Iñiguez, M Sáez, A Daponte, I Galán. Air pollution and cardiovascular admissions short-term

- relationship in Spain: results within the EMECAS project. **J Epidemiol Community Health**, **60**, 328-336 (2006).
14. E Aránguez, JM Ordoñez, J Serrano, N Aragonés, R Fernández, A Gandarillas, I Galán. Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. **Rev Esp Salud Pública**, **73**, 123-132 (1999).
 15. S Medina, A Plasencia, F Ballester, HGMücke, J Schwartz. Apehis: public health impact of PM10 in 19 European cities. **J Epidemiol Community Health**, **58**, 831-836 (2004).
 16. F Ballester. Comentario. Contaminación atmosférica y salud: Acción estratégica en salud pública. **Gac Sanit.**, **23**, 198-199 (2009).
 17. G Carmichael, M Ferm, N Thongboonchoo, JH Woo, LY Chan, K Murano, PH Viet, C Mossberg, R Bala, J Boonjawat, P Upatum, M Mohan, SP Adhikary, AB Shrestha, PP Pienaar, EB Brunke, TC Tang, D Guoan, LC Peng, S Dhiharto, H Harjanto, AM Jose, W Kimani, A Kirouane, JP Lacaux, S Richard, O Barturen, JC Cerda, A Athayde, T Tavares, JS Cotrina, E Bilici. Measurements of sulfur dioxide, ozone and ammonia concentrations in Asia, Africa, and South America using passive samplers. **Atmosph. Environ.**, **37**, 1293-1308 (2003).
 18. WA McClenny, EJ Williams, R C Cohen, J Stutz. Preparing to measure the effects of the NOx SIP Call – methods or ambient air monitoring of NO, NO₂, NO_y and individual NO_x species. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, **52**, 542-562 (2002).
 19. DD Parrish, FC Fehsenfeld. Methods for gas-phase measurements of ozone, ozone precursors and aerosol precursors. **Atmosph. Environ.**, **34**, 1921-1957 (2000).
 20. MJ Navas, AM Jiménez, G Galán. Air analysis determination of nitrogen compounds by chemiluminescence. **Atmosph. Environ.**, **31**, 3603-3608 (1997).
 21. MIH Helaleh, S Ngudiwaluyo, T Korenaga, K Tanaka. Development of passive sampler technique for ozone monitoring. Estimation of indoor and outdoor ozone concentration. **Talanta**, **58**, 649-659 (2002).
 22. DG Madruga. Tesis doctoral: Evaluación de los niveles de dióxido de nitrógeno en la atmósfera de Madrid mediante sistemas pasivos (Proyecto LIFE: RESOLUTION), **Universidad Complutense de Madrid** (2004).
 23. SV Krupa, AH Legge. Passive sampling of ambient gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. **Environ. Pollut.**, **107**, 31-45 (2000).
 24. IN Levine. **Físico-Química 3ª Ed.**, Cap. 13, 434-435 (1990).
 25. Norma **EN 13528-3**: Ambient air quality - Diffusive samplers for the determination of concentrations of gases and vapours - Requirements and test methods - Part 3: Guide to selection, use and maintenance (2003).
 26. SN Lyman, MS Gustin, EM Prestbo. A passive sampler for ambient gaseous oxidized mercury concentrations. **Atmosph. Environ.**, **44**, 246-252 (2010).
 27. C Peterson, M Alishahi, MS Gustin. Testing the use of passive sampling systems for understanding air mercury concentrations and dry deposition across Florida, USA. **Sci. of the Total Environ.**, **424**, 297-307 (2012).
 28. W Wongniramaikul. Passive sampling for air quality monitoring. **KKU Science Journal**, **40**, 444-471 (2012).
 29. RH Bronw. Monitoring the ambient environment with diffusive samplers: theory and practical considerations. **Journal of Environ Monito.**, **2**, 1-9 (2000).
 30. W Davison, H Zhang. Progress in understanding the use of diffusive gradients in thin films (DGT) – back to basic. **Environ. Chemist.**, **9**, 1-13 (2012).
 31. SV Krupa, AH Legge. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. **Environ. Pollut.**, **107**, 31-45 (2000).
 32. YS Tang, JN Cape, MA Sutton. Development and Types of Passive Samplers for Monitoring Atmospheric NO₂ and NH₃ Concentrations. **The ScienceWorld**, **1**, 513-529 (2001).
 33. DG Madruga, RF Patier, ED Ramiro, M^D Garraleta. Study of the superficial ozone concentrations in the atmosphere of Comunidad de Madrid using passive samplers. **Revista de Salud Ambiental**, **1**, 20-29 (2001).
 34. JO Levin, R Lindahl. Diffusive air sampling of reactive compounds. A review. **Analyst**, **119**, 79-83 (1994).
 35. L Cee, JC Ku. Sampling of inorganic gases and vapours. **Analyst**, **119**, 57-63 (1994).
 36. M Adon, CG Lacaux, V Yoboué, C Delon, JP Lacaux, P Castera, E Gardrat, J Pienaar, HA Ourabi, D Laouali, B Diop, LS Nkamdjou, A Akpo, JP Tathy, F Lavenu, E Mougín. Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers. **Atmos. Chem. Phys.**, **10**, 7467-7487 (2010).
 37. R Cisneros, A Bytnerowicz, D Schweizer, S Zhong, S Traina, DH Bennett. Ozone, nitric acid, and ammonia air pollution is unhealthy for people and ecosystems in southern Sierra Nevada, California. **Environ. Pollut.**, **158**, 3261-3271 (2010).
 38. SR Gadsdon, SA Power. Quantifying local traffic contributions to NO₂ and NH₃ concentrations in natural habitats. **Environ. Pollut.**, **157**, 2845-2852 (2009).
 39. MA Puchalski, ME Sather, JT Walker, CMB Lehmann, DA Gay, J Mathew, wp Robarge. Passive ammonia monitoring in the United States: Comparing three different sampling devices. **J. Environ. Monit.**, **13**, 3156-3167 (2011).
 40. C Perrino, M Catrambone. Development of a variable-path-length diffusive sampler for ammonia and evaluation of ammonia pollution in the urban area of Rome, Italy. **Atmosph. Environ.**, **38**, 6667-6672 (2004).
 41. B Beckerman, M Jerrett, JR Brook, DK Verma, MA Araine, MM Finkelstein. Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway. **Atmosph. Environ.**, **42**, 275-290 (2008).

42. AP Minguy, H Plaisance, C Schadkowski, I Sagnier, JY Saison, JC Galloo, R Guillermo. A case study of personal exposure to nitrogen dioxide using a new high sensitive diffusive sampler. **Sci. of the Total Environ.**, **366**, 55-64 (2006).
43. ZY Meng, GA Ding, XB Xu, XD Xu, HQ Yu, SF Wang. Vertical distributions of SO₂ and NO₂ in the lower atmosphere in Beijing urban areas, China. **Sci. of the Total Environ.**, **390**, 456-465 (2008).
44. Y Sekinea, SF Watts, A Rendell, M Butsugan. Development of highly sensitive passive sampler for nitrogen dioxide using porous polyethylene membrane filters as turbulence limiting diffuser. **Atmosph. Environ.**, **42**, 4079-4088 (2008).
45. AJ Wheeler, X Xu, L Wallace, G Mallach, KV Ryswyk, M MacNeill, J Kearney, PE Rasmussen, ED Zlotorzynska, D Wang, R Poon, R Williams, S Stocco, A Anastassopoulos, JD Miller, R Dales, JR Brook. Windsor, Ontario Exposure Assessment Study: Design and Methods Validation of Personal, Indoor, and Outdoor Air Pollution Monitoring. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, **61**, 142-156 (2011).
46. TTN Lan, NTT Binh. Daily roadside BTEX concentrations in East Asia measured by the Lanwatsu, Radiello and Ultra I SKS passive samplers. **Sci. of the Total Environ.**, **441**, 248-257 (2012).
47. H Paschke, P Popp. New passive samplers for chlorinated semivolatile organic pollutants in ambient air. **Chemosphere**, **58**, 855-863 (2005).
48. PN Pegas, MG Evtugina, CA Alves, T Nunes, M Cerqueira, M Franchi, C Pio, SM Almeida, MC Freitas. Outdoor/Indoor air quality in primary schools in Lisbon: A preliminary study. **Química Nova**, **33**, 1145-1149 (2010).
49. PTJ Scheepers, J Konings, G Demirel, EO Gaga, R Anzion, PGM Peer, T Dogeroglu, S Ornektekin, WV Doorn. Determination of exposure to benzene, toluene and xylenes in Turkish primary school children by analysis of breath and by environmental passive sampling. **Sci. of the Total Environ.**, **408**, 4863-4870 (2010).
50. M Stranger, SP Vermaak, P Sacco, F Quaglio, D Pagani, C Cocheo, AFL Godoi, RV Grieken. Analysis of indoor gaseous formic and acetic acid, using radial diffusive samplers. **Environ. Monit. Assess.**, **149**, 411-417 (2009).
51. ED Thoma, MC Miller, KC Chung, NL Parsons BC Shine. Facility Fence-Line Monitoring Using Passive Samplers. **J. Air & Waste Manage. Assoc.** **61**, 834-842 (2011).
52. L Tuduri, M Millet, O Briand, M Montury. Passive air sampling of semi-volatile organic compounds. **Trends in Analytical Chemistry**, **31**, 38-49 (2012).
53. B Zabiegała, C Sarbu, M Urbanowicz, J Namiesnik. A Comparative Study of the Performance of Passive Samplers. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, **61**, 260-268 (2011).
54. IJ Allan, A Ruus, MT Schaanning, KJ Macrae, K Næs. Measuring nonpolar organic contaminant partitioning in three Norwegian sediments using polyethylene passive samplers. **Sci. of the Total Environ.**, **423**, 125-131 (2012).
55. T Harner, K Pozo, T Gouin, AM Macdonald, H Hung, J Caaney, A Peters. Global pilot study for persistent organic pollutants (POPs) using PUF disk passive air samplers. **Environ. Pollut.**, **144**, 445-452 (2006).
56. K Pozo, T Harner, SC Lee, RK Sinha, B Sengupta, M Loewen, V Geethalakshmi, K Kannan, V Volpi. Assessing seasonal and spatial trends of persistent organic pollutants (POPs) in Indian agricultural regions using PUF disk passive air samplers. **Environ. Pollut.**, **159**, 646-653 (2011).
57. JK Schuster, R Gioia, T Harner, SC Lee, K Breivik, KC Jones. Assessment of sorbent impregnated PUF disks (SIPs) for long-term sampling of legacy POPs. **J. Environ. Monitoring**, **14**, 71-78 (2012).
58. M Shoeib, T Harner. Characterization and Comparison of Three Passive Air Samplers for Persistent Organic Pollutants. **Environ. Sci. Technol.**, **36**, 4142-4151 (2002).
59. F Wania, L Shen, YD Lei, C Teixeira, DCG Muir. Development and Calibration of a Resin-Based Passive Sampling System for Monitoring Persistent Organic Pollutants in the Atmosphere. **Environ. Sci. Technol.**, **37**, 1352-1359 (2003).
60. LPS Cruz, VP Campos, AMC Silva, TM Tavares. A field evaluation of a SO₂ passive sampler in tropical industrial and urban air. **Atmosph. Environ.**, **38**, 6425-6429 (2004).
61. MD Gibson, MR Heal, Z Li, J Kuchta, GH King, A Hayes, S Lambert. The spatial and seasonal variation of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in Cape Breton Highlands National Park, Canada, and the association with lichen abundance. **Atmosph. Environ.**, **64**, 303-311 (2013).
62. ZY Meng, XB Xu, T Wang, XY Zhang, XL Yu, SF Wang, WL Lin, YZ Chen, YA Jiang, XQ An. Ambient sulfur dioxide, nitrogen dioxide, and ammonia at ten background and rural sites in China during 2007-2008. **Atmosph. Environ.**, **44**, 2625-2631 (2010).
63. XZou, Z Shen, T Yuan, S Yin, X Zhang, R Yin, P Zhou, W Wang. On an empirical relationship between SO₂ concentration and distance from a highway using passive samplers: A case study in Shanghai, China. **Sci. of the Total Environ.**, **377**, 434-438 (2007).
64. S Bhangar, BC Singer, WW Nazaroff. Calibration of the Ogawa passive ozone sampler for aircraft cabins. **Atmosph. Environ.**, **65**, 21-24 (2013).
65. S Karthikeyan, SV Perumal, R Balasubramanian. Determination of Ozone in Outdoor and Indoor Environments Using Nitrite-Impregnated Passive Samplers Followed by Ion Chromatography. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, **57**, 974-980 (2007).
66. J Krzyzanowski. Ozone variation with height in a forest canopy—results from a passive sampling field campaign. **Atmosph. Environ.**, **38**, 5957-5962 (2004).

67. H Plaisance, M Gerboles, A Piechocki, F Detimmerman, ED Saeger. Radial diffusive sampler for the determination of 8-h ambient ozone concentrations. **Environ. Pollut.**, **148**, 1-9 (2007).
68. J Roukos, N Locoge, P Sacco, H Plaisance. Radial diffusive samplers for determination of 8-h concentration of BTEX, acetone, ethanol and ozone in ambient air during a sea breeze event. **Atmosph. Environ.**, **45**, 755-763 (2011).
69. P Sicard, LD Richier, N Vas. Annual and seasonal trends of ambient ozone concentration and its impact on forest vegetation in Mercantour National Park (South-eastern France) over the 2000-2008 period. **Environ. Pollut.**, **159**, 351-362 (2011).
70. DG Nash, D Leith. Use of Passive Diffusion Tubes to Monitor Air Pollutants. **J. Air & Waste Manage. Assoc.**, **60**, 204-209 (2010).
71. C Peterson, M Alishahi, MS Gustin. Testing the use of passive sampling systems for understanding air mercury concentrations and dry deposition across Florida, USA. **Sci. of the Total Environ.**, **424**, 297-307 (2012).
72. RH Brown, RP Harvey, CJ Purnell, KJ Saunders. A diffusive sampler evaluation protocol. **Am. Ind. Hyg. Assoc. J.**, **45**, (1984).
73. L Pozzoli, D Cottica. An overview of the effects of temperature, pressure, humidity, storage and face velocity. Diffusive sampling: An alternative approach to workplace air monitoring. **CEC Pub. N° 10555EN. Commission of the European Communities, Brussels-Luxembourg**, 119-130 (1978).
74. IN Levine. **Físico-Química 3ª Ed.**, Cap. 16, 568-569 (1990).
75. AA May, P Ashman, H Jiaoyan, S Dhaniyala, TM Holsen. Evaluation of the polyurethane foam (PUF) disk passive air sampler: Computational modeling and experimental measurements. **Atmosph. Environ.**, **45**, 4354-4359 (2011).
76. AJ Gair, SA Penkett. The effects of wind speed and turbulence on the performance of diffusion tube samplers. **Atmosph. Environ.**, **29**, 2529-2533 (1995).
77. W Wongniramaikul. Passive Sampling for Air Quality Monitoring. **KKU Sci. J.**, **40**, 444-471 (2012).
78. SV Krupa, AH Legge. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. **Environ. Pollut.**, **107**, 31-45 (2000).
79. LT Gibson, BG Cooksey, D Littlejohn, NH Tennent. Determination of experimental diffusion coefficients of acetic acid and formic acid vapours in air using a passive sampler. **Anal. Chim Acta**, **341**, 1-10 (1997).
80. J Zhou, S Smith. Measurement of ozone concentrations in ambient air using a badge-type passive monitor. **J. Air Waste Manage. Assoc.**, **47**, 697-703 (1997).
81. P Bruno, M Caputi, M Caselli, G Gennaro, M Rienzo. Reliability of a BTEX radial diffusive sampler for thermal desorption: field measurements. **Atmos. Environ.**, **39**, 1347-1355 (2005).
82. RH Brown. General principles of diffusive sampling. **International Conference Measuring Air Pollutants by Diffusive Sampling**, 21-30 (2001).