

Rodolfo Palomo Briones, Emilia Ríos del Toro, Luis Fernando Calderón Soto,  
Ángela Patricia Bravo Vidales, Cintia Noemí Gómez Muñoz y Edén Ocegüera Contreras



# Compuestos contaminantes de la atmósfera:

¿cuáles son **sus efectos**? y,  
sobre todo, ¿**cómo eliminarlos**?

La contaminación atmosférica es un problema mundial por sus efectos sobre el ambiente y la salud humana. Las medidas para controlar la emisión de gases de efecto invernadero y compuestos orgánicos volátiles, entre otros contaminantes, resultan muy complejas; sin embargo, existen otras alternativas para el tratamiento de los contaminantes atmosféricos, que además pueden brindar beneficios adicionales.



## Introducción

La contaminación del aire es un problema ambiental que en los últimos años se ha convertido en una cuestión crítica para la salud humana. El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) reporta que alrededor de 7 600 personas fallecen anualmente en el país a causa de las partículas contaminantes presentes en ambientes exteriores (IMCO, 2014). Anteriormente, la Secretaría de Salud reportó más de 6 700 muertes atribuibles a la mala calidad del aire, tanto en exteriores (al aire libre) como en interiores (dentro de casas, edificios, centros de trabajo, etc.). Tales números posicionan a la contaminación del aire como uno de los diez principales factores de riesgo en el país, apenas por detrás de las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, el alcoholismo y el tabaquismo (Semarnat, 2006; Secretaría de Salud, 2005).

En el aspecto económico, la contaminación atmosférica es también un tema de relevancia. Las estimaciones indican que el impacto de la contaminación del aire sobre la productividad económica del país asciende a más de 5 000 millones de pesos. Adicionalmente, los gastos derivados de consultas y hospitalizaciones se estiman por encima de los 640 millones de pesos. En suma, la contaminación atmosférica tiene un costo anual de más de 5 600 millones de pesos (IMCO, 2014).





La contaminación del aire es un tema bien conocido en las principales ciudades del país, donde la población tiene una percepción generalmente mala sobre la calidad del aire y sus efectos en la salud. Por ejemplo, aproximadamente 84% de la población adolescente en la Ciudad de México considera que la contaminación del aire es alta o muy alta y, además, estima que es el segundo mayor problema que enfrenta su ciudad, tan sólo por debajo de la inseguridad, que se ubica en el primer puesto (Catalán-Vázquez *et al.*, 2009).

Sin embargo, aunque los centros urbanos son grandes puntos de emisión de contaminantes, la contaminación atmosférica no se genera exclusivamente en dichos asentamientos. Las zonas rurales también producen una gran diversidad de contaminantes atmosféricos, como el metano ( $\text{CH}_4$ ) derivado de la ganadería o el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y los compuestos aromáticos generados por el funcionamiento de tractores, camiones, cosechadoras, fertilizadoras, etcétera.

En realidad, está claro que la contaminación del aire no es un problema exclusivo de algunas regiones, países o ciudades. Por el contrario, es un problema global que puede afectar a una gran proporción de la población mundial, ya sea por el contacto directo con los contaminantes, o bien a través de alguno de los múltiples efectos en el clima que se explicarán más adelante.

En general, los contaminantes atmosféricos pueden agruparse en las siguientes categorías: aerosoles, par-

tículas suspendidas, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y gases de efecto invernadero, entre otros. Desde luego, sería muy complicado e incluso tedioso comentarlos todos aquí, así que nos enfocaremos en dos grupos que son de gran importancia desde el punto de vista ambiental y de la salud humana.

## Contaminantes y sus efectos

### a) Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son aquellos compuestos gaseosos que al acumularse en la atmósfera evitan que el calor proveniente del Sol escape del planeta y vuelva al espacio (Figura 1). Esto provoca que, con el tiempo, la temperatura media de la tierra se incremente (así como la de los océanos y la atmósfera) y con ello se acentúen ciertos fenómenos climáticos, como los huracanes y las sequías. El incremento de la temperatura, acompañado de un desequilibrio climatológico, derivaría también en cambios drásticos en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Los gases más relevantes por su efecto invernadero son el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los fluorocarbonos y el vapor de agua. Sin embargo, no todos los gases de efecto invernadero son igualmente dañinos. Para hacer una comparación entre ellos y saber cuál tiene mayores

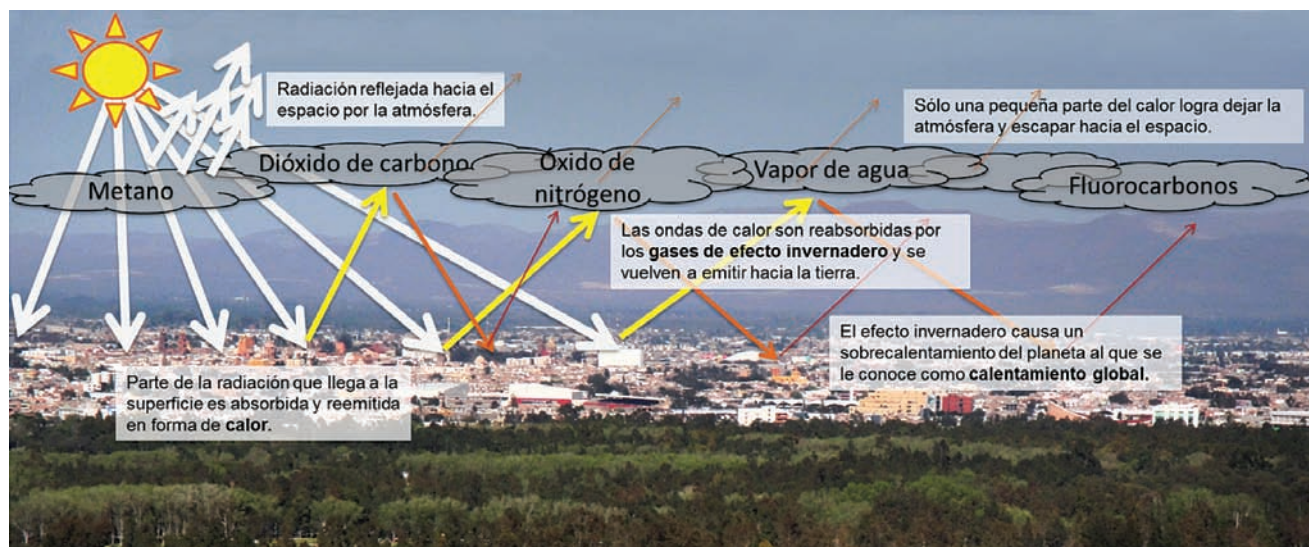


Figura 1. Efecto invernadero.

efectos en el equilibrio de la atmósfera, es necesario considerar dos características importantes: la capacidad de los gases para absorber energía y su tiempo de vida en la atmósfera antes de degradarse.

Con base en estas dos características es posible estimar que, por ejemplo, el potencial de calentamiento de un kilogramo de  $\text{CH}_4$  emitido a la atmósfera es 21 veces más dañino que un kilogramo de  $\text{CO}_2$ . El grupo más notable en este sentido es el de los fluorocarbonos (compuestos químicos orgánicos que contienen enlaces carbono-flúor). ¡Un kilogramo de estos compuestos puede causar el mismo daño que diez toneladas de  $\text{CO}_2$ ! Afortunadamente, las regulaciones en muchos países –incluido México– ya prohíben su uso. Aunque, debido a su largo tiempo de vida, estos compuestos siguen en la atmósfera, no sólo reteniendo el calor, sino también destruyendo la capa de ozono (EPA, 2014; Quéré *et al.*, 2013).

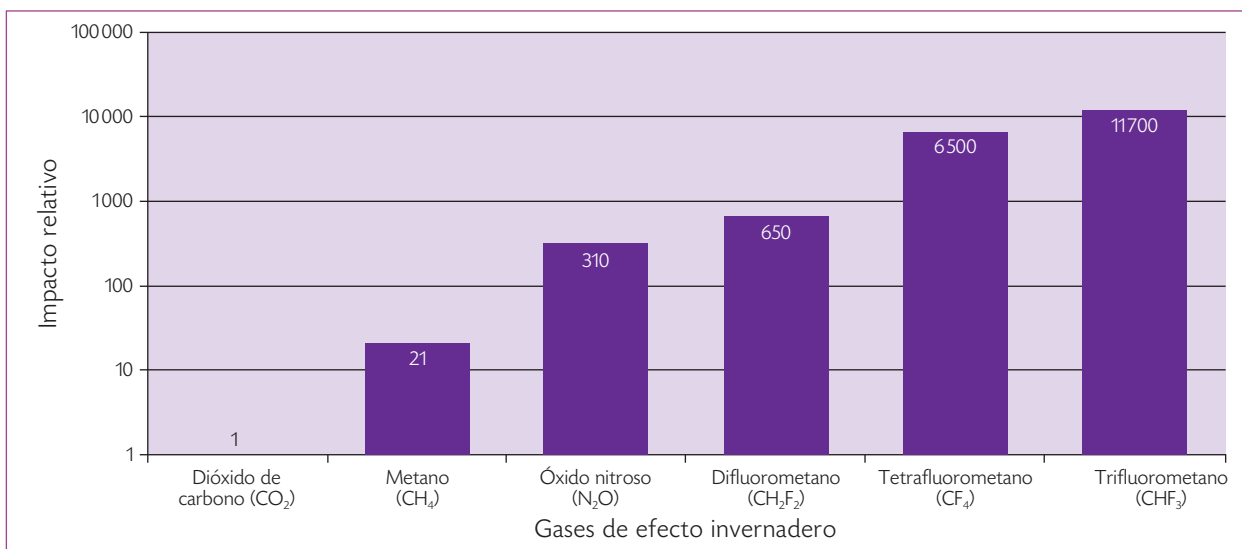
En la Figura 2 se muestra un gráfico comparativo de los diferentes gases de efecto invernadero y sus efectos en el calentamiento global. El  $\text{CO}_2$  se usa como base porque es un gas con un efecto específico (por kg) menor al resto; sin embargo, es considerado como el compuesto más importante por ser causante de más de 70% del efecto invernadero. Esto se debe a que el  $\text{CO}_2$  es emitido en cantidades sumamente grandes. En 2012 la emisión de  $\text{CO}_2$  fue de 9 700 millones de toneladas tan sólo de la quema de combustibles fósiles como la gasolina (Quéré *et al.*, 2013).

### b) Compuestos orgánicos volátiles

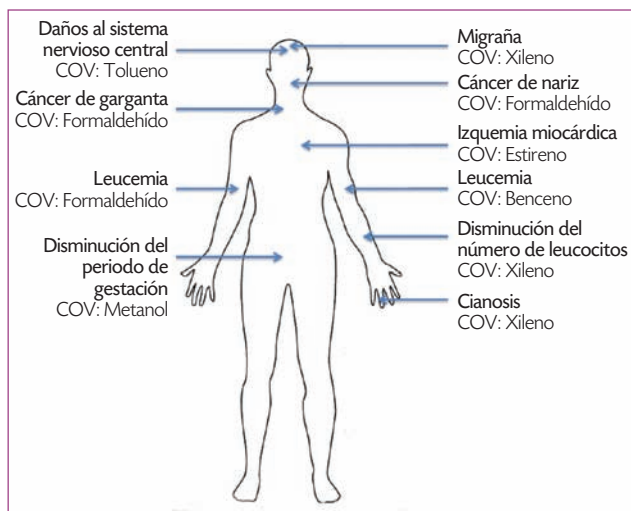
Los compuestos orgánicos volátiles son definidos como compuestos que tienen uno o más átomos de carbono en su estructura y que liberan vapores bajo condiciones normales de presión y temperatura ( $25\text{ }^\circ\text{C}$  y 1 atm). Este grupo de contaminantes es particularmente extenso, con más de 180 sustancias registradas como peligrosas, como son: el acetaldehído, utilizado en la síntesis de plásticos, pinturas y solventes; el benceno, utilizado en la fabricación de plásticos y telas sintéticas; o el metanol, que es un subproducto de la fabricación de papel.

La importancia de este tipo de contaminantes atmosféricos radica principalmente en sus posibles efectos sobre la salud humana. Estos últimos pueden ir desde simple irritación de ojos, nariz y garganta; pasando por dolor de cabeza, náuseas y mareos; hasta problemas crónicos, como daños renales, del hígado, daños neuronales y cáncer. Algunos de estos problemas de salud están ilustrados en la Figura 3.

La exposición a este tipo de contaminantes puede ser más común de lo que podríamos imaginar, debido a que muchas fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles se encuentran en los ambientes interiores de las casas habitación; por ejemplo, muebles de madera, pinturas, barniz para madera, limpiadores, desinfectantes, cosméticos, periódicos, calentadores de gas, estufas, impresoras y multifuncionales, entre muchos otros.



**Figura 2.** Comparativo del daño causado por los principales gases de efecto invernadero, si fueran emitidos en cantidades iguales.



**Figura 3.** El cuerpo humano y las enfermedades causadas por los compuestos orgánicos volátiles (cov).

Es por esta razón, y por el hecho de que nuestras actividades se desarrollan principalmente en el hogar (aproximadamente dos terceras partes del tiempo), que el estudio de la contaminación en ese tipo de ambientes interiores ha cobrado mucha relevancia. Sin embargo, además del ambiente en el hogar, también es preocupante la situación de quienes realizan trabajos de pintura o decoración de manera regular, o quienes trabajan en las propias fábricas de los productos de pintura, limpieza y cosméticos enlistados en el párrafo anterior, así como de otros sectores como los combustibles. Otro grupo de interés son los trabajadores de oficina, que suelen pasar jornadas completas a escasos metros de impresoras y copiadoras con uso intenso.

Desde luego, no se pretende dar a entender que los compuestos orgánicos volátiles son la causa más importante de las enfermedades mencionadas anteriormente. Pero, sin duda, debemos considerarlas como sustancias potencialmente peligrosas y tomar las medidas preventivas necesarias. Probablemente, esas medidas incluirán la ventilación apropiada del hogar, lugares de trabajo y demás ambientes interiores, así como la utilización de mascarillas que limiten el ingreso de los contaminantes a las vías respiratorias.

Más allá de las medidas precautorias que podamos implementar, existen dos más para lograr controlar no sólo los compuestos orgánicos volátiles y gases de efecto invernadero, sino también otro tipo de contaminan-

tes que no hemos comentado en este escrito (por ejemplo, aerosoles, metales pesados, partículas suspendidas, entre otros): 1) evitar su producción y 2) efectuar su tratamiento. Por razones de complejidad, es mucho menos probable que se realice la primera opción que la segunda, al menos en el corto plazo. Por lo tanto, en la siguiente sección hablaremos brevemente sobre las alternativas para el tratamiento de contaminantes atmosféricos.

### ■ Dos tecnologías para el tratamiento

Las tecnologías para el tratamiento de los contaminantes atmosféricos pueden dividirse en dos tipos: tecnologías fisicoquímicas y tecnologías biológicas.

Las primeras se basan principalmente en la capacidad de ciertos materiales para atrapar en su superficie diversas sustancias contaminantes. El más conocido de estos materiales es, sin duda, el carbón activado, que es un material con un área superficial en el orden de los cientos de metros cuadrados por gramo. Esta característica permite utilizar una pequeña cantidad del material para atrapar un gran volumen de contaminante. Sin embargo, las tecnologías fisicoquímicas –como la adsorción en carbón activado– en el mediano plazo representan un gasto hasta seis veces mayor que su contraparte, las tecnologías biológicas (Estrada, 2014).

Las tecnologías biológicas, o biotecnologías, sustentan su funcionamiento en la utilización de microorganismos (por ejemplo, bacterias) que son capaces de consumir contaminantes. Para esto es necesario conocer de dónde se pueden extraer tales microorganismos, lo cual no es tarea sencilla. Comúnmente se recurre a microorganismos que se encuentran en la naturaleza y que viven en contacto con sustancias similares a las que se desea degradar. Para el caso del metano, por ejemplo, se utilizan microorganismos degradadores de metano que se encuentran normalmente en el suelo.

Posteriormente, los microorganismos seleccionados para degradar el contaminante de interés son introducidos en biorreactores, en los cuales tendrán las condiciones ideales para crecer y reproducirse: disponibilidad de vitaminas y minerales, temperatura apropiada, acidez adecuada y, sobre todo, una fuente vasta de carbono y energía. Generalmente, la fuente de carbono

y energía que se agrega al biorreactor es el compuesto contaminante que se busca degradar.

No obstante, las tecnologías biológicas enfrentan diferentes retos cuando trabajan bajo condiciones reales. Por ejemplo, el metano es un compuesto que puede degradarse por microorganismos mediante una ruta que es relativamente simple, pero para que ello ocurra es necesario que el metano pase del aire al líquido en donde se encuentran los microorganismos. Y este hecho es bastante difícil de alcanzar porque el metano es muy poco soluble. Otro problema es que en algunos sistemas biológicos, como los biofiltros, los microorganismos crecen hasta un punto en el que el filtro se tapa y entonces la circulación del aire se obstruye.

Estos problemas han sido abordados por los investigadores de maneras muy creativas. Para mejorar el transporte de los contaminantes poco solubles, como el metano y el benceno, algunos investigadores han sugerido utilizar aceite de silicón, un compuesto que no es soluble en agua pero que, en cambio, puede disolver a los contaminantes antes mencionados. Una vez disueltos en el aceite, los microorganismos entran en contacto con el contaminante y lo degradan.

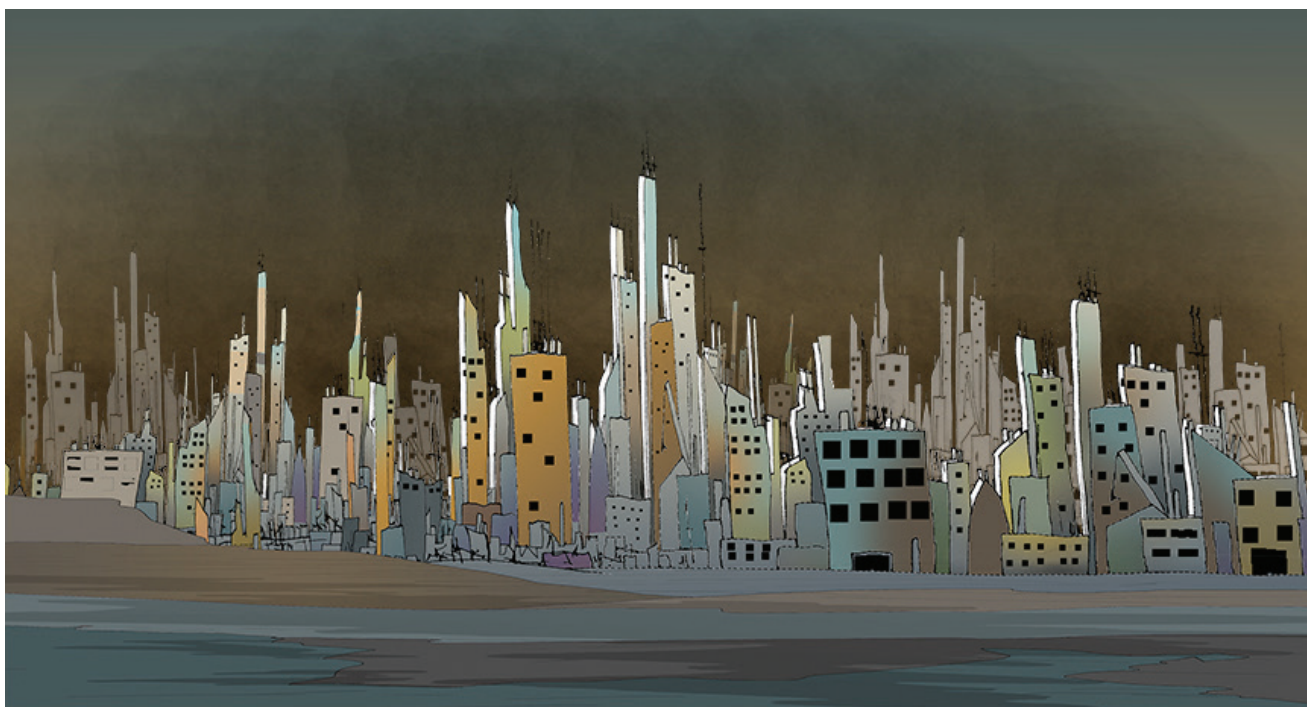
En el caso de la acumulación de biomasa existen distintas alternativas, como la adición de sustancias

químicas que eliminan parte de la biomasa o, más recientemente, la adición de ozono. Esta última alternativa ha mostrado excelentes resultados al eliminar solamente a las sustancias extracelulares que se acumulan y no a las células, por lo que la eficiencia de los sistemas se mantiene sin alteración.

En conclusión, la remoción de contaminantes, aun bajo situaciones complicadas, puede llevarse a cabo. Sin embargo, la tarea se dificulta por el gran número de contaminantes que se emiten día con día, cada uno con diferentes propiedades. Los investigadores y tecnólogos trabajan para hacer frente a estos problemas, pero también sabemos que no todos los que generan la contaminación están dispuestos a implementar dichas tecnologías, porque de una forma u otra representan un gasto más para ellos. La solución está, al menos en parte, en la creación de regulaciones más estrictas en materia ambiental y en una adecuada aplicación de las mismas, pero ése es un tema político que hoy queda lejos de los alcances de este escrito.

### Investigación en el IPICYT

En el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), ubicado en el estado de San





Luis Potosí, la doctora Sonia Arriaga investiga el uso de biofiltros para la eliminación de distintos compuestos contaminantes, como ácido sulfhídrico, metanol, formaldehído, hexano y tolueno. Además, en años recientes se ha buscado el desarrollo de tecnologías que ofrezcan no sólo el beneficio de degradar algún contaminante de la atmósfera, sino también el de generar productos derivados de la misma actividad biológica. Tal es el caso de la biofiltración acoplada a la producción de proteínas, en donde la tecnología de eliminación de un contaminante en fase gas (metanol) es acoplada a otra para la producción de una proteína de interés comercial. De este modo, el beneficio es doble: por un lado, la depuración de una corriente de gas contaminado y, por el otro, la generación de un producto con valor económico.

Prismatic es una asociación de estudiantes del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, dedicada a la elaboración de material escrito y audiovisual sobre temas de investigación científica en el mundo, con especial interés en la investigación de origen mexicano.

**Rodolfo Palomo Briones** es ingeniero bioquímico por el Instituto Tecnológico de Morelia, y maestro en Ciencias Ambientales por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Actualmente es estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales en el IPICYT.  
rodolfo.palomo@ipicyt.edu.mx

**Esther Emilia Ríos del Toro** es actualmente estudiante del doctorado en Ciencias Ambientales en el IPICYT. Su principal tema de interés es el ciclo del nitrógeno, en el que se encuentra el proceso Anammox, que es su tema de tesis.  
esther.rios@ipicyt.edu.mx

**Luis Fernando Calderón Soto** es ingeniero en mecánica y maestro en biotecnología, ambos por la Universidad Politécnica de Pachuca. Actualmente es estudiante del doctorado en Control y Sistemas Dinámicos en el IPICYT.  
luis.calderon@ipicyt.edu.mx

**Ángela Patricia Bravo Vidales** es ingeniera en mecánica por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente cursa la maestría en Control y Sistemas Dinámicos en el IPICYT.  
angela.bravo@ipicyt.edu.mx

**Cintia Noemí Gómez Muñoz** es estudiante de doctorado en Biología Molecular en el IPICYT. Sus áreas de interés son la genómica de levaduras y la divulgación de la ciencia.  
cintia.gomez@ipicyt.edu.mx

**Edén Ocegüera Contreras** es licenciado en Biomedicina por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, doctor en Ciencias en Biología Molecular en Medicina por la Universidad de Guadalajara y realizó una estancia posdoctoral en la División de Biología Molecular del IPICYT.  
eden.oceguera@ipicyt.edu.mx

### Lecturas recomendadas

- Catalán-Vázquez, M., H. Riojas-Rodríguez, E. Jarillo-Soto y H. Delgadillo-Gutiérrez (2009), "Percepción de riesgos a la salud por contaminación del aire en adolescentes de la Ciudad de México", *Salud Pública Mex.*, 51:148-156. Disponible en: <<http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo.php?id=002312>>.
- EPA (2014), *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. Disponible en: <<http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/calculator.html#results>>.
- Estrada, J. (2014), *Bioteecnologías para el tratamiento de la contaminación atmosférica: superando las limitaciones de diseño y operación*, tesis de doctorado, España, Universidad de Valladolid. Disponible en: <<http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/4977/1/TESIS544-140623.pdf>>.
- IMCO (2014), *¿Cuánto nos cuesta la contaminación del aire en México?*, Instituto Mexicano para la Competitividad. Disponible en: <<http://imco.org.mx/calculadoraaire/>>.
- Quéré, G., R. Andrés, T. Boden et al. (2013), "Global Carbon Budget 1959-2011", *Earth System Science Data*, 5:165-185. Disponible en: <<http://www.earth-syst-sci-data.net/5/165/2013/essd-5-165-2013.pdf>>.
- Secretaría de Salud (2005), Mexico Health Metrics Report. México. Disponible en: [http://sinais.salud.gob.mx/descargas/pdf/r05\\_tratoadecuado.pdf](http://sinais.salud.gob.mx/descargas/pdf/r05_tratoadecuado.pdf)
- Semarnat (2006), *La gestión ambiental en México*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <[http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06\\_otras/Gestion\\_Ambiental.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/Gestion_Ambiental.pdf)>.