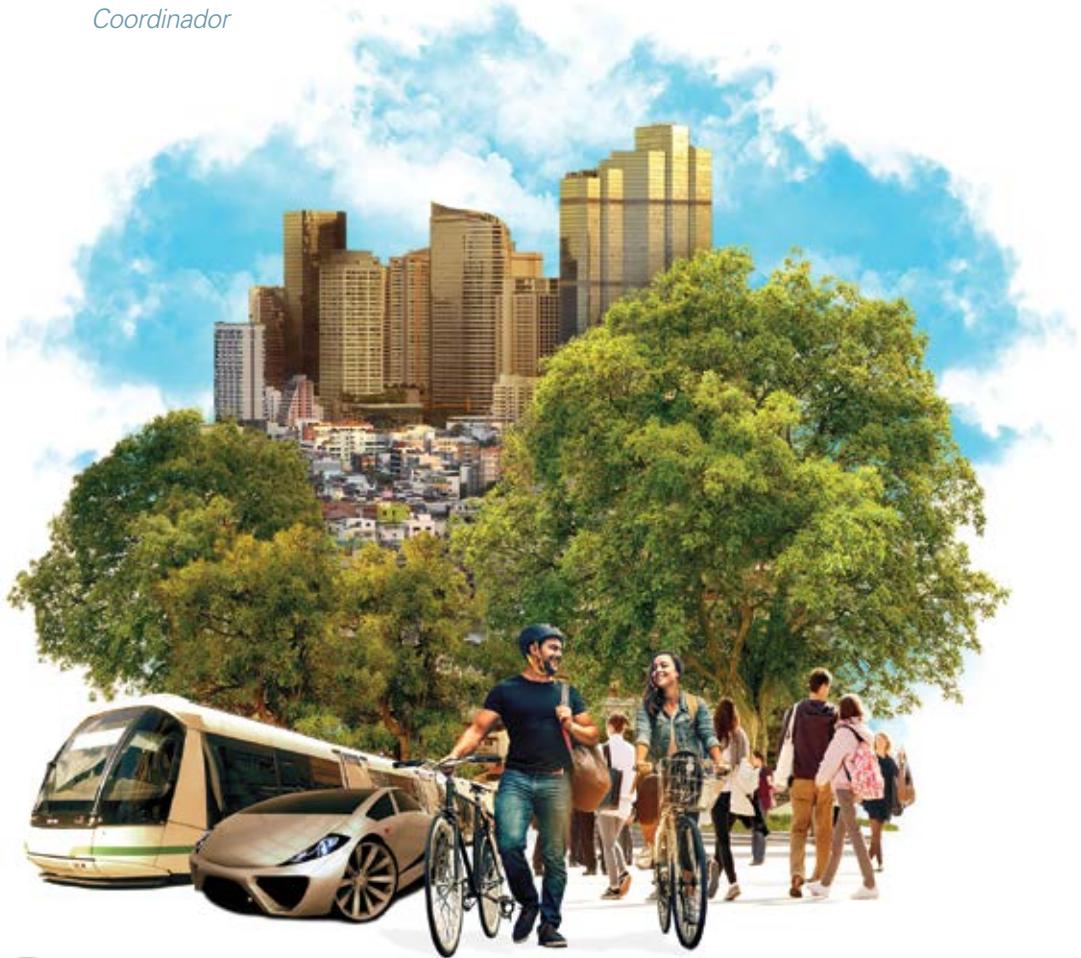


La calidad del aire en las ciudades

Un reto mundial

Xavier Querol

Coordinador



Edita
Fundación Gas Natural Fenosa
Avda. San Luís, 77
28033 Madrid

www.fundaciongasnaturalfenosa.org

1ª edición
© 2018 Fundación Gas Natural Fenosa

ISBN: 978-84-09-01905-2
Depósito legal: M-14874-2018

Impreso en España

Adaptación comunicativa: Antoni París
Diseño y maquetación: Ramon Sánchez Parent y Jordi Sunyer

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización por escrito de la Fundación Gas Natural Fenosa.



Este libro se ha impreso utilizando papel estucado de 125 gramos con certificación forestal PEFC de la Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal.

La calidad del aire en las ciudades

Un reto mundial

Xavier Querol

Coordinador



Prólogo

Martí Solà

Director general

Fundación Gas Natural Fenosa

www.fundaciongasnaturalfenosa.org

Según la Organización Mundial de la Salud OMS, la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Son constantes sus mensajes e informes alertando del incumplimiento de los valores límite de protección a la salud de contaminantes atmosféricos en el aire que respiramos. Dos informes de la OMS de 2014, ratificados en 2016, exponían que el 92% de la población mundial vive en lugares donde no se respetan los valores guía de calidad del aire y estimaban que la contaminación atmosférica local a nivel troposférico, tanto en las ciudades como en las zonas rurales de todo el mundo, provoca cada año tres millones de defunciones prematuras. Viendo la magnitud del problema, lo importante es analizar cuáles son las causas y diseñar políticas y concienciar a los ciudadanos para ayudar a mitigar la emisión de contaminantes y, en consecuencia, mejorar la calidad del aire que respiramos. En este sentido, las principales causas o fuentes de emisión de los contaminantes atmosféricos son el transporte, con el foco principal en las ciudades, el consumo energético poco eficiente en las viviendas, la generación de electricidad con combustibles contaminantes y la falta de gestión de los residuos industriales, municipales y agrícolas. La Fundación Gas Natural Fenosa, en su objetivo de difusión y sensibilización sobre temas relacionados con la energía, el medio ambiente y la sostenibilidad, lleva más de 15 años tratando esta cuestión en sus seminarios y publicaciones en toda España y en América Latina. Pueden descargarse de nuestra web la guía: “Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado” (2006) y un estudio aplicado “Mejora de la calidad del aire por cambio de combustible a

gas natural en automoción. Aplicación a Madrid y Barcelona” (2007).

Hoy presentamos, como libro número 30 de nuestra colección, “La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial”, con la intención de subrayar que se trata de un problema tan importante como el cambio climático y con efectos adversos más inmediatos, cuya solución requiere de la colaboración de todos para ser mitigado. La elaboración de este libro cuenta con la participación de 18 destacados profesionales a nivel mundial, aportando cada uno su experiencia, y ha sido diseñado en dos partes. La primera parte es más teórica con la descripción del problema y de las principales fuentes y causas que deben ser tratadas. La segunda parte del mismo tiene un carácter práctico, donde podemos encontrar las experiencias acumuladas en diferentes ciudades del mundo como Madrid, Barcelona, Berlín, México, Santiago de Chile, Bogotá y la región de Lombardía en Italia. Quisiera aprovechar la ocasión para agradecer desde la Fundación todo el esfuerzo de diseño, elaboración y coordinación del libro por parte del profesor de investigación del CSIC Xavier Querol, con quien llevamos muchos años compartiendo la divulgación y sensibilización sobre estos asuntos. También mi agradecimiento más sincero a todos los profesionales que han dedicado una parte de su tiempo para aportar su valiosa experiencia: José M^a Baldasano, Elena Boldo, Rafael Borge, Jesús Casanova Kindelán, Telma Castro, Ángeles Cristóbal, Guido Lanzani, Julio Lumbreras, Martin Lutz, María de la Luz Espinosa, Mariano Marzo, Irene Olivares, Mauricio Osses, Jorge E. Pachón, Oscar Peralta, María Isabel Saavedra y Juan Ángel Terrón. A todos muchas gracias.

Contenidos

Presentación y preguntas clave del documento	8
Introducción	13
Contaminación y calidad del aire urbano. Unas primeras cuestiones de partida <i>Xavier Querol (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)</i>	15
I. El fenómeno, causas y efectos	29
La calidad del aire en España. Diagnóstico y comparación con otros países <i>Irene Olivares (Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente)</i>	31
Las causas y el origen de la contaminación del aire en España <i>Julio Lumbreras, Rafael Borge (Universidad Politécnica de Madrid)</i>	49
Las emisiones contaminantes de los vehículos <i>Jesús Casanova Kindelán (Universidad Politécnica de Madrid)</i>	71
Los efectos de la contaminación del aire en la salud humana <i>Elena Boldo (Instituto de Salud Carlos III)</i>	91
La normativa de calidad del aire en España y la Unión Europea <i>Ángeles Cristóbal (Ayuntamiento de Madrid)</i>	111
Energía y contaminación del aire en el mundo. El papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire <i>Mariano Marzo (Universidad de Barcelona)</i>	125
II. Medidas y planes de mejora de la calidad del aire urbano	145
Alcance y propuestas de actuación de los planes de mejora de la calidad del aire <i>Xavier Querol (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)</i>	147
Caso 1. La experiencia de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid <i>Juan Ángel Terrón (Empresa Municipal de Transportes de Madrid S.A.)</i>	167

Caso 2. Los efectos del uso de vehículos a gas natural en la calidad del aire urbano. Experiencias en Barcelona y Madrid <i>Jose Maria Baldasano (Universidad Politécnica de Cataluña)</i>	187
Caso 3. La experiencia de Berlín. Éxitos y oportunidades de veinte años de gestión de la calidad del aire <i>Martin Lutz (Ayuntamiento de Berlín)</i>	201
Caso 4. La experiencia de Lombardía <i>Guido Lanzani (Departamento de Medio Ambiente de la Región de Lombardía)</i>	227
Caso 5. La experiencia de México <i>Oscar Peralta, María De La Luz Espinosa, Telma Castro (Universidad Nacional Autónoma de México)</i>	243
Caso 6. La experiencia de Santiago de Chile <i>Mauricio Osses (Universidad Técnica Federico Santa María)</i>	257
Caso 7. La experiencia de Bogotá <i>Jorge E. Pachón (Universidad de La Salle)</i>	267
Conclusiones <i>Xavier Querol (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)</i>	289

Presentación y preguntas clave del documento

Xavier Querol

Coordinador de la publicación

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC

Contrariamente a lo que podamos pensar, los problemas de calidad del aire no son una novedad. Plinio el Viejo, en el siglo I d. C., escribió a su sobrino Plinio el Joven para contarle que desde que había visitado un volcán y se había acercado a sus emisiones, ya no había vuelto a respirar bien. En tiempos de los romanos se expulsaron del casco urbano algunas actividades artesanas de ciudades inglesas, ya que las emisiones que producían afectaban a la salud de los vecinos. Sobre el año 1180, Maimónides (Rabi Mose Ben Maimón, médico y filósofo sefardí cordobés) escribía ‘Comparar el aire de las ciudades con el aire de los desiertos y las tierras áridas es como comparar las aguas que pútridas y turbias con las limpias y puras. En la ciudad, debido a la altura de sus edificios, de sus calles estrechas y de todo lo que se vierte desde sus habitantes, ... el aire se estanca y se vuelve espeso y brumoso... Si el aire se altera alguna vez ligeramente, el estado del espíritu psíquico será alterado perceptiblemente.’ Unos cuantos siglos más tarde, sin embargo, la calidad del aire en las ciudades continúa siendo un problema de primer orden, agravado por los niveles que ha alcanzado la contaminación atmosférica y por el tipo de contaminantes que se emiten. A ello se le suman las evidencias científicas sobre los efectos de dichos contaminantes en la salud humana. Con el objetivo de ofrecer una visión lo más actual posible, el presente volumen monográfico de la Fundación Gas Natural Fenosa se centra

en esta apasionante y multidisciplinar cuestión de la calidad del aire urbano. Apasionante por la envergadura del problema a nivel global y local, en lo que se refiere a su impacto sobre la salud y el medio ambiente; por su complejidad, ya que se ha de resolver sin limitar la expansión económica, o incluso favoreciéndola; y por las diferencias entre las distintas estrategias a aplicar para resolverlo en entornos con causas también distintas. Y multidisciplinar porque pocos problemas ambientales requieren de ella tanto como la calidad del aire; son necesarios expertos en diagnóstico del problema, en epidemiología y toxicología, en tecnología de emisiones industriales, domésticas, agrícolas y del transporte, en movilidad, en legislación, en economía, en comunicación, y como no, en política ambiental.

En todo caso, nos vamos a centrar en revisar la situación actual y reciente en diferentes escenarios del mundo, en ver las causas y en identificar los contaminantes clave, en describir y comparar las legislaciones a nivel mundial, en describir el conocimiento actual de sus efectos en la salud y en definir cómo deben ser los planes de mejora de calidad del aire. Seguidamente, revisaremos estrategias y medidas de mejora de calidad del aire, entrando a fondo en las emisiones de los vehículos, así como la posible contribución del gas natural a esta mejora, para, finalmente, mostrar ejemplos de problemas y soluciones posibles en escenarios urbanos europeos y americanos.

Introducción

Contaminación y calidad del aire urbano.

Unas primeras cuestiones de partida

- ¿A qué escalas distintas afecta la contaminación atmosférica?
- ¿Qué contaminantes son los más críticos para la salud humana?
- ¿Qué diferencias hay entre grandes zonas urbanas del mundo?
- ¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire urbano en Europa?

El fenómeno, causas y efectos

La calidad del aire en España.

Diagnóstico y comparación con otros países

- ¿Cómo se realiza la evaluación de la calidad del aire en España?
- ¿Qué indican las tendencias de calidad del aire de los últimos años?
- ¿Cómo alcanzar los objetivos de los planes de calidad del aire a nivel nacional?
- ¿Cuáles son las medidas y retos futuros que se plantean?
- ¿Cuál es la situación en otros estados miembros de la Unión Europea?
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer de este diagnóstico?

Las causas y el origen

de la contaminación del aire en España

- ¿Cómo ha evolucionado la calidad del aire en Europa y España en los últimos años?
- ¿Qué funciones cumplen los inventarios de emisiones para los contaminantes urbanos?
- ¿Cómo contribuye cada fuente de emisiones a los niveles de contaminación?
- ¿Qué factores condicionan la calidad del aire urbano?
- ¿Cuáles son los criterios de priorización a considerar para evaluar estrategias de actuación?
- ¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire?
- ¿Cuáles son los principales retos futuros?
- ¿Hacia dónde se debe avanzar para mejorar la calidad del aire en España?

Las emisiones contaminantes de los vehículos

- ¿Qué tipo de vehículos están incluidos en las regulaciones de emisiones y qué contaminantes se consideran?
- ¿Cómo se regulan las emisiones de los vehículos a motor en Europa?
- ¿Cómo han evolucionado los valores límite de las emisiones?
- ¿Qué tecnologías de reducción de emisiones y tratamiento de los gases de escape se han introducido en los últimos años?
- ¿Cuáles son las posibles soluciones tecnológicas para reducir emisiones a corto y medio plazo?

Los efectos de la contaminación del aire en la salud humana

- ¿Cómo afectan a la salud los compuestos químicos del aire contaminado?
- ¿Afecta la exposición a los contaminantes a todos por igual?
- ¿Qué efectos adversos produce la contaminación en el cuerpo humano?
- ¿Qué beneficios para la salud supone el cumplimiento de las recomendaciones oficiales?
- ¿Cuáles son los principales retos para lograr un aire de calidad?

La normativa de calidad del aire en España y la Unión Europea

- ¿Cómo era la legislación de calidad del aire en España antes de las normas de la Unión Europea?
- ¿Cómo ha evolucionado la legislación europea en materia de contaminación del aire?
- ¿Qué nuevos parámetros y objetivos de calidad ha ido incorporando la legislación europea?
- ¿Qué cambios se han introducido en la legislación española en los últimos años?
- ¿Qué dificultades existen para implementar la legislación sobre calidad del aire en Europa?
- ¿Cómo funcionan las redes de vigilancia de la calidad del aire en España?
- ¿Con qué retos futuros se enfrenta la legislación?

Energía y contaminación del aire en el mundo. El papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire

- ¿Cuál es la situación actual en el mundo en lo referente a la relación entre energía y contaminación del aire?
- ¿Qué factores determinan la contaminación del aire en áreas urbanas?
- ¿Cómo se puede hacer frente a la contaminación del aire relacionada con la energía?
- ¿Qué escenarios de futuro globales se contemplan sobre la contaminación del aire relacionada con la energía?
- ¿Cuál ha de ser el papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire?

Medidas y planes de mejora de la calidad del aire urbano

Alcance y propuestas de actuación de los planes de mejora de la calidad del aire

- ¿Qué señala la legislación europea con relación a los planes de mejora de la calidad del aire?
- ¿Cuál es el contenido de los planes estructurales de calidad del aire?
- ¿Cómo obtener un buen diagnóstico de las zonas afectadas y las fuentes responsables?
- ¿Cómo se puede evaluar la reducción de contaminantes asociada a la aplicación de un plan de calidad del aire?
- ¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire en los distintos sectores?

Caso 1. La experiencia de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid

- ¿Qué responsabilidad tiene el transporte público colectivo en la generación de emisiones contaminantes?
- ¿En qué ámbitos se puede actuar para mejorar la calidad del aire urbana?
- ¿Qué medidas aplica la EMT de Madrid para reducir las emisiones de su flota?
- ¿Cuáles son los retos de futuro que se plantea la EMT de Madrid?

Caso 2. Los efectos del uso de vehículos a gas natural en la calidad del aire urbano. Experiencias en Barcelona y Madrid

- ¿En qué consiste el estudio y qué metodología se ha aplicado?
- ¿Qué escenarios se han planteado para analizar la variación de las emisiones?
- ¿Cuáles son los resultados de la simulación para el escenario base?
- ¿Qué efectos tienen los distintos escenarios sobre la calidad del aire?
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer del estudio?

Caso 3. La experiencia de Berlín. Éxitos y oportunidades de veinte años de gestión de la calidad del aire

- ¿Cuál era la situación en Berlín en los años ochenta? Una ciudad dividida con problemas de calidad del aire comunes.
- ¿Y en los años noventa? Una ciudad unida, también para la calidad del aire.
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer de esta evolución histórica?
- ¿Qué está causando actualmente los problemas de calidad del aire en Berlín?

- ¿Qué medidas han tenido éxito y cuáles han fracasado?
- ¿Qué es necesario hacer en el futuro?

Caso 4. La experiencia de Lombardía

- ¿Cuáles eran hace años los principales agentes contaminantes del aire en Lombardía?
- ¿Qué problemas de calidad del aire permanecen abiertos?
- ¿Cuál es la contribución de cada fuente emisora?
- ¿Cuáles son las medidas aplicadas y cuál su efectividad?
- ¿Son suficientes las medidas que ya se están aplicando y las que se implementarán a corto plazo?
- ¿Qué barreras deben superarse para implementar las medidas a medio y largo plazo?

Caso 5. La experiencia de México

- ¿Cómo se comporta la contaminación del aire en Ciudad de México?
- ¿Cuáles son las tendencias históricas de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?
- ¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?
- ¿Qué acciones se impulsan para mejorar la calidad del aire?

Caso 6. La experiencia de Santiago de Chile

- ¿Cómo ha evolucionado la calidad del aire en Santiago de Chile?
- ¿Ha influido el uso de gas natural en la mejora de la calidad del aire?
- ¿Cuál es el origen de las emisiones contaminantes?
- ¿Qué impacto tendría la introducción a gran escala del gas natural?

Caso 7. La experiencia de Bogotá

- ¿Cuáles son las condiciones ambientales y socioeconómicas de la ciudad de Bogotá?
- ¿Cómo es la calidad del aire en Bogotá?
- ¿Qué fuentes de emisión afectan la calidad del aire?
- ¿Cuáles son los efectos de la contaminación y qué costes supone?
- ¿Qué eficacia tienen las medidas aplicadas para mejorar la calidad del aire?
- ¿Cómo contribuye el gas natural a la mejora de la calidad del aire?
- ¿Qué medidas se pueden tomar a corto, medio y largo plazo?

Conclusiones

Introducción



Profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, experto en geoquímica ambiental, especialmente de contaminación atmosférica. Doctor en Ciencias Geológicas por la Universidad de Barcelona i postdoc en BGS-NEC, Reino Unido. Premio Medio Ambiente de la Generalidad de Cataluña 2009 y Premio Rey Jaume I 2013 en protección del Medio Ambiente.

Xavier Querol

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC

Contaminación y calidad del aire urbano. Unas primeras cuestiones de partida

Preguntas clave del artículo

- ¿A qué escalas distintas afecta la contaminación atmosférica?
- ¿Qué contaminantes son los más críticos para la salud humana?
- ¿Qué diferencias hay entre grandes zonas urbanas del mundo?
- ¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire urbano en Europa?

Apunte inicial

Según el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, en 1950 un 6% de la población mundial vivía en grandes ciudades, en 2016 este porcentaje ya superaba el 54%, y la previsión es que en 2050 alcance el 66%.

Este incremento de la población urbana ha ido acompañado además de un aumento del consumo energético per cápita a escala global (un 60% entre 1965 y 2010), causando a su vez el de las emisiones de CO₂ per cápita¹ (un 65% en entre 1960 y 2014); este consumo energético es debido, en gran parte, al incremento del número de vehículos a motor. Todo ello, ha dado lugar a la concentración espacial de emisiones atmosféricas en las grandes ciudades de Europa y de todo el mundo, lo que ha provocado problemas importantes de contaminación y deterioro de la calidad del aire.

¿A qué escalas distintas afecta la contaminación atmosférica?

Una definición general de contaminación atmosférica es la presencia en la atmósfera de materia, sustancias o energía que puedan implicar riesgos o daños para la seguridad o la salud de los seres humanos, el medio ambiente y los bienes de cualquier naturaleza². Estos riesgos o daños se dan en las siguientes escalas:

- **La escala global.** Los contaminantes son siempre emitidos por fuentes puntuales y bien localizadas, ya sean de origen natural, antrópico o natural activado por efectos antrópicos indirectos, si bien en este último caso los efectos tienen una repercusión a escala global. Son ejemplos el efecto del calentamiento climático producido por los gases y partículas de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) o las partículas de carbono negro (BC); o la destrucción de la capa de ozono (O₃) estratosférico por las emisiones de compuestos halogenados. El efecto de estos contaminantes es global y no afecta directamente a la salud humana ni a los ecosistemas, aunque sí lo hace indirectamente debido a los problemas derivados del cambio climático.

1 Tverberg G., 2017. Our finite world. World Energy Consumption Since 1820 in Charts. <https://ourfinitemworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/> (acceso 01/10/2017).

2 La Directiva europea de calidad del aire (2008/50/CE) y el Real Decreto 102/2011 (BOE 2011) definen como contaminante atmosférico a 'toda sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto'. Las mismas normas definen aire ambiente como 'el aire exterior de la baja troposfera, excluidos los lugares de trabajo'

- **La mesoescala o escala media.** En este caso, los contaminantes viajan distancias considerables para causar el problema; de unas pocas decenas a cientos e incluso miles de kilómetros. Son ejemplos la lluvia ácida, la eutrofización por depósito atmosférico de contaminantes, el transporte y depósito de contaminantes orgánicos persistentes y de mercurio (Hg), el transporte y formación de O_3 troposférico, y el transporte del polvo africano hacia Europa o el Atlántico. En estos procesos, los contaminantes o sus precursores son emitidos en región y transportados, y en algunos casos depositados, lejos de ésta. Como ejemplo, el O_3 troposférico no es emitido por ninguna fuente de contaminación concreta, sino que se forma en la atmósfera a partir de precursores (óxidos de nitrógeno, NO_x y compuestos orgánicos volátiles, COVs), a sotavento de los penachos de contaminación urbana e industrial, y con gran influencia de la radiación solar (reacciones fotoquímicas). Así pues, las zonas que reciben el impacto se encuentran generalmente a decenas o cientos de kilómetros de los focos emisores. En el caso de la lluvia ácida, las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y de NO_x de focos concretos son transportadas, oxidándose y transformándose en ácidos sulfúrico y nítrico (H_2SO_4 y HNO_3), cuyo depósito ambiental a distancia del foco emisor puede acidificar los suelos y los recursos hídricos, causando graves problemas ecológicos. Es decir, estos contaminantes o sus derivados tienen un impacto claro y directo sobre la salud humana, los ecosistemas e incluso los materiales de

construcción, aunque el foco emisor se encuentre lejos. En este caso podemos hablar claramente de deterioro de la calidad del aire ambiente.

- **La microescala.** En esta escala se dan los efectos más importantes en cuanto al deterioro de la calidad del aire. Se trata de zonas urbanas, industriales o rurales que reciben el impacto directo de las emisiones que ellas mismas producen. Los focos más importantes son el tráfico rodado, algunas fuentes de emisión domésticas e institucionales, las centrales térmicas, la industria, la agricultura, los trabajos de construcción y demolición y los puertos y aeropuertos. Éstos emiten partículas inferiores a 10 y 2,5 micras (PM_{10} y $PM_{2,5}$), partículas ultrafinas (inferiores a 0,1 micras, UFP), NO_x , SO_2 , amoníaco (NH_3), metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que pueden deteriorar, tanto local como regionalmente, la calidad del aire.

Cabe resaltar, pues, que el concepto de contaminación atmosférica incluye las tres escalas y los contaminantes definidos, así como que en calidad del aire excluimos el efecto climático de los gases (CO_2 , CH_4 , entre otros) y partículas con efecto invernadero, y nos centramos en los problemas causados por los contaminantes regionales y urbanos / industriales / agrícolas (NO_x , SO_2 , NH_3 , monóxido de carbono (CO), O_3 , COVs no metánicos, PM_{10} , $PM_{2,5}$, metales, HAP, BC, UFP, entre otros) los cuales afectan directamente a la salud humana y los ecosistemas.

¿Qué contaminantes son los más críticos para la salud humana?

Son contaminantes críticos aquellos que se encuentran en concentraciones atmosféricas que superan los umbrales legales o los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para protección a la salud humana³.

A nivel global varían muy ampliamente, tanto las concentraciones de contaminantes que llegan a alcanzarse, como las exigencias de los marcos legales nacionales que limitan las concentraciones de los contaminantes urbanos. No obstante, la OMS, en sus informes más recientes sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud (proyectos REVIHAAP y HRAPIE⁴), indica claramente que el contaminante con mayor impacto es el material particulado en suspensión (PM₁₀ y PM_{2,5}), por lo que es el más analizado en todo el mundo. En las regiones en vías de desarrollo, los metales, los contaminantes orgánicos persistentes (POPs), el SO₂ y otros contaminantes como

el benceno (C₆H₆), el NO₂ o el CO, pueden presentar superaciones de los umbrales de protección, pero no suele suceder lo mismo en las regiones desarrolladas, donde el NO₂, el PM₁₀, el PM_{2,5} y el O₃ suelen ser los contaminantes principales. Últimamente, la combustión de biomasa y de carbón en calefacciones domésticas y residenciales de ciudades desarrolladas se ha identificado como la principal causa del incremento de concentraciones ambientales⁵ de PM y benzo-a-pireno (B(a)P, un hidrocarburo aromático policíclico).

Es por ello que es difícil comparar calidades del aire de diferentes ciudades del mundo, así como el impacto de las mismas en el deterioro de la salud, ya que todas no tienen los mismos contaminantes críticos. Por ejemplo, la calidad del aire en zonas de Beijing está claramente deteriorada por los altos niveles de PM₁₀, PM_{2,5} y SO₂ –próximos a 80 y 100 µg/m³, como medias anuales de PM_{2,5} y PM₁₀⁶–, procedentes sobre todo de la industria, las calefacciones domésticas de carbón y la generación eléctrica, y el tráfico rodado; el PM_{2,5} está constituido por concentraciones muy elevadas de sulfato y nitrato amónico y

3 OMS, 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005. Summary of risk assessment. WHO Geneva, 22p. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

4 OMS, 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report. Organizació Mundial de la Salut, Copenhague, 309 pp. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1
OMS, 2014. Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. New emerging risks to health from air pollution – results from the survey of experts. Organizació Mundial de la Salut, Copenhague, 65 pp. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0017/234026/e96933.pdf?ua=1

5 EEA, 2016. Air quality in Europe-2016 report. EEA Report, No 28/2016. ISBN 978-92-9213-824-0, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 88 pp.

6 Song C., Wu L., Xie Y., He J., Chen X., Wang T., Lin Y., Jin T., Wang A., Liu Y., Dai Q., Liu B., Wang Y.N., Mao H., 2017. Air pollution in China: Status and spatiotemporal variations. Environ. Pollut. 227, 334-347.

carbón orgánico. En el caso de Madrid⁷, en cambio, el contaminante crítico es sobre todo el NO₂, con medias anuales superiores a 55 µg/m³, y sobre 35 superaciones anuales del valor horario de 200 µg/m³ (concentraciones sólo ligeramente inferiores a las de Beijing, que presenta medias anuales máximas de 60-70 µg/m³), seguido por el O₃, y con niveles de PM_{2,5} medios anuales que sobrepasan ligeramente los 10 µg/m³ (un orden de magnitud inferior al de Beijing y con bajo sulfato amónico). En el caso concreto del NO₂ en Madrid, el tráfico rodado contribuye con aproximadamente el 70% del NO₂ que respira un ciudadano. Por tanto, ambas ciudades difieren no sólo en cuanto a niveles de contaminación, sino también en cuanto a contaminantes críticos y fuentes que los emiten.

Según datos oficiales de emisiones europeas⁸, el transporte rodado es la fuente principal de emisión de NO_x y la segunda en BC, PM_{2,5} y PM₁₀ primario; las calefacciones de carbón y biomasa dominan las emisiones de PM_{2,5} y PM₁₀ primario, B(a)P y BC; la agricultura las de amoníaco, con un 93%; y la generación eléctrica las de SO₂. Debemos puntualizar que estas contribuciones no son extrapolables a todas las ciudades europeas. Así, las

calefacciones de carbón y biomasa no tienen distribución homogénea en las capitales (ver figura 1).

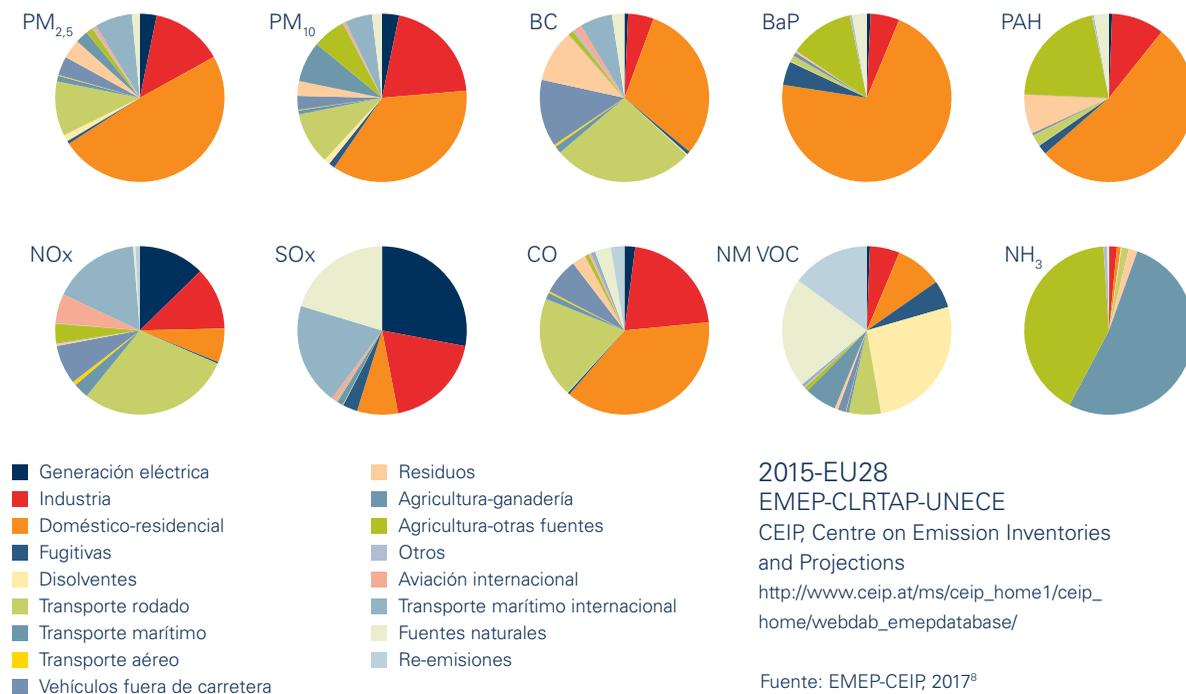
Asimismo, las contribuciones de cada una de las fuentes al inventario de emisiones no son equivalentes a las que éstas aportan a los niveles de exposición de los ciudadanos europeos. La proximidad de la fuente de emisión es un factor clave, ya que mientras el tráfico rodado emite contaminantes de manera muy cercana a los ciudadanos, una central térmica está más alejada de la población y emite en altura. Por tanto, la misma carga de emisión en los dos casos tendrá un impacto muy diferente en los niveles de exposición. Es por ello que, en el caso de Barcelona, la contribución del tráfico rodado a los niveles en aire ambiente de NO₂ de la ciudad es de un 60%, pero la contribución al inventario municipal de emisiones de NO_x se reduce al 40%.

En el caso del PM_{2,5} y PM₁₀, el reciente proyecto AIRUSE-LIFE+⁹ ha permitido concluir que en 5 ciudades mediterráneas el tráfico rodado contribuye con un 25-35% de la media anual, teniendo en cuenta tanto las emisiones del tubo de escape como las de la abrasión de frenos, ruedas y firme de rodadura¹⁰. También es importante resaltar que en referencia al

-
- 7 Ayuntamiento de Madrid, 2017. Memoria Anual Calidad del Aire 2016. 91 pp. <http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/export/sites/default/calair/Anexos/Memoria2016.pdf>
- 8 EMEP-CEIP, 2017. Air pollutant emissions data viewer (CLRTAP convention). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap>
- 9 http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/2016_AIRUSE-A17-Summary-report.pdf
- 10 Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V.L., Colombi C., Alves C., Custódio D., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M.C., Manousakas M.I., Maggos T., Vratolis S., Harrison R.M., Querol X., 2016a. AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3289-3309, doi 10.5194/acp-16-3289-2016.

Figura 1

Contribución de los diferentes sectores del inventario de emisiones 2015 del UE-28.



PM_{2,5} y PM₁₀ el inventario de emisiones se refiere solamente al material primario –es decir, las partículas sólidas y líquidas emitidas como tal–, mientras que alrededor del 70% del PM_{2,5} y del 60% del PM₁₀ está constituido por material secundario –es decir, aquel que se produce en la atmósfera a partir de gases reactivos, como SO₂, NO_x, COV_s y NH₃, y que dan lugar a la formación de partículas secundarias–.

¿Qué diferencias hay entre grandes zonas urbanas del mundo?

Como ya se ha apuntado, la situación de las diferentes ciudades del mundo en cuanto a calidad del aire urbano puede variar mucho en función del contaminante considerado.

Podemos encontrar ciudades en desarrollo con niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ extremadamente elevados pero con concentraciones de NO_2 más bajas que en ciudades desarrolladas con mayor proporción de vehículos diésel.

Comparar los niveles de contaminación de las ciudades es, de todos modos, muy complejo y casi siempre se hace de manera inadecuada. Así, por ejemplo, cuando se evalúan datos de Europa suele aparecer Londres en los rankings más elevados de NO_2 , ya que éste y otros contaminantes se miden en Marylebone Road, una estación situada a 1 m de la acera de la A501, una vía con 6 carriles y 90.000 vehículos de intensidad media diaria, en un lugar altamente congestionado y con geometría de "canyon street" que dificulta la ventilación. Barcelona, Madrid o Valencia, en cambio, no tienen estaciones equivalentes situadas tan cerca del tráfico rodado, ni en puntos tan congestionados y poco ventilados. La estación de Marylebone correspondería a un punto de la acera de los transectos más congestionados y encajonados de la Gran Vía de las tres ciudades citadas, donde no se mide la calidad del aire de manera permanente. Por tanto, la comparación de dichas ciudades probablemente no reflejará la realidad de las diferencias de exposición de los habitantes de cada una.

Teniendo en cuenta estas limitaciones importantes hemos calculado los niveles medios 2008-2014 de $PM_{2,5}$ y PM_{10} ¹¹ por diferentes regiones del mundo (ver figura 2). Se observa que la región más desarrollada del Medio Oriente –Arabia Saudí y Kuwait, debido

en gran parte a las emisiones de polvo de los desiertos– presenta los niveles más elevados de PM_{10} , seguida de la región Circumediterránea Oriental, con rentas medias y bajas –Líbano, Afganistán, Túnez...–, del África Subsahariana, del sur y el este de Asia –India, Bangladesh, Tailandia, Indonesia...–, y de la región del Pacífico Occidental –China, Malasia y Filipinas–. En el otro extremo, con los niveles más bajos, se encuentran las regiones americanas más desarrolladas (EEUU, Argentina, Chile–, el Pacífico Occidental también más desarrollado –Corea del Sur, Australia, Japón, entre otros– y Europa Occidental. Finalmente, en una situación intermedia, se sitúan las regiones menos desarrolladas de América y Europa. En el caso del $PM_{2,5}$, la situación varía, ya que, si bien se repiten los extremos más bajos y altos de las PM_{10} , se incrementan relativamente los niveles en el Pacífico Occidental y el sur y este de Asia. Tanto para los niveles de PM_{10} como para los de $PM_{2,5}$, la diferencia entre las regiones más y menos contaminadas alcanza un orden de magnitud –por ejemplo, de los casi $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en Tehran o Beijing a o los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Camberra o $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Helisinki–. Esta comparación se ha hecho con datos medios de estaciones urbanas, industriales y de fondo regional. Los niveles son muy superiores cuando nos centramos en las ciudades (ver figura 3): Aba-Nigeria y Ryad-Arabia Saudí exceden los $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual para el PM_{10} ; las ciudades asiáticas registran niveles entre 100 y $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$; las mega-ciudades del sur y centro de América, alrededor de $40-80 \mu\text{g}/\text{m}^3$; las de

11 OMS, 2016. WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database (update 2016). http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

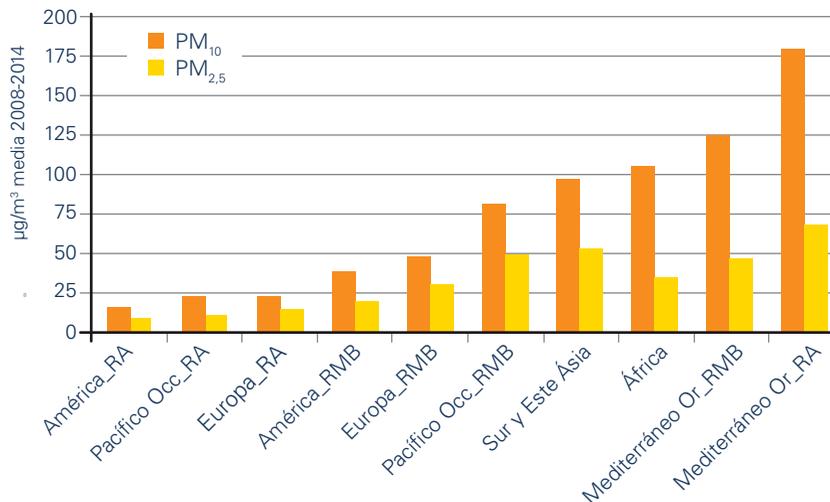


Figura 2

Niveles medios de PM_{2.5} y PM₁₀ por diferentes regiones del mundo (2008-2014).

RA, países de renta alta;
RMB, países de renta media y baja.

Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2016

Europa Oriental, alrededor de $\mu\text{g}/\text{m}^3$; la mayoría de las Europeas, entre 15-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; y la mayoría de las de Estados Unidos y Australia, por debajo de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta gradación se repite para el PM_{2.5}, si bien las ciudades asiáticas se desplazan hacia niveles relativamente más elevados, y las ciudades escandinavas hacia niveles más bajos, con respecto al PM₁₀.

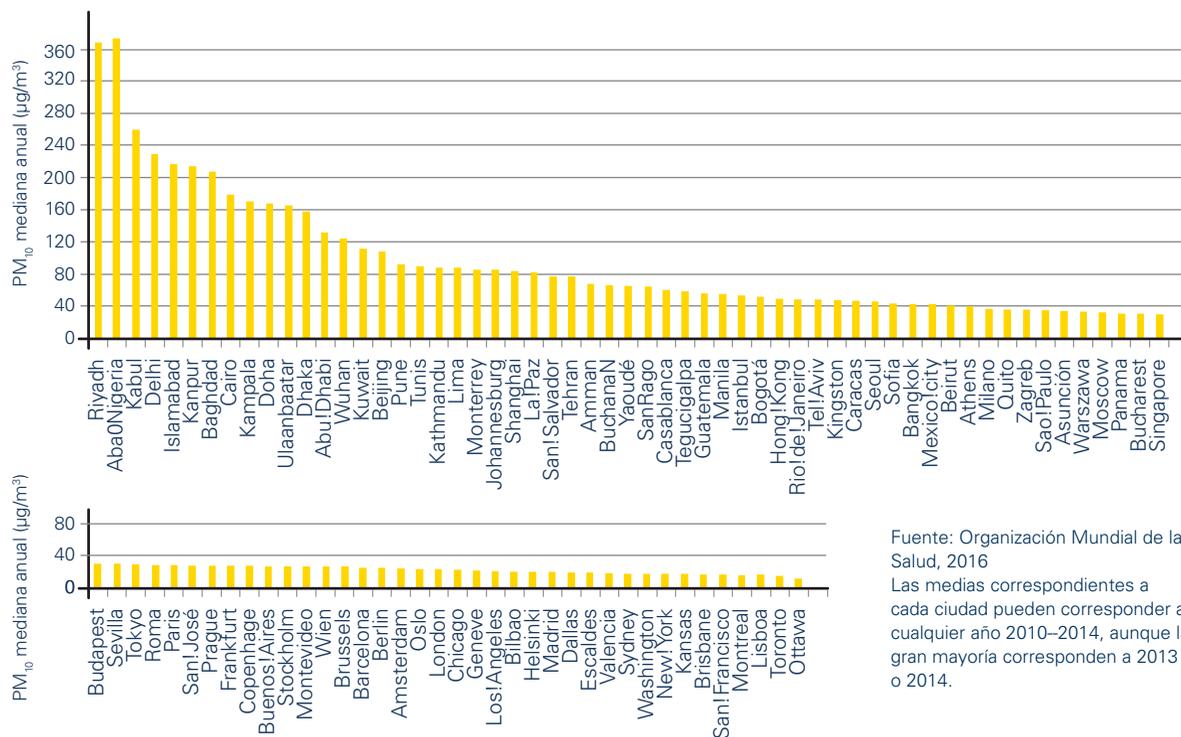
En cuanto al NO₂, la situación es muy distinta. La diferencia entre las ciudades europeas y las asiáticas en desarrollo no alcanza el orden de magnitud como ocurría en el caso del PM, sino que los niveles son similares o incluso inferiores en las asiáticas. Así, en Beijing el rango de concentración de NO₂ alcanza 35-75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media anual, en Marylebone Road-Londres se llega a los 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y en

las estaciones de tráfico rodado de Barcelona y Madrid los 45-58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ –en calles mucho menos transitadas que Maylebone Road–. En las ciudades de los Estados Unidos, en cambio, las concentraciones son mucho más bajas, generalmente entre 12-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, diferencias atribuibles a la alta densidad de vehículos y a la menor proporción de vehículos diésel. En muchas regiones de Europa la proporción de los diésel circulantes alcanza el 50-60%, mientras que en Estados Unidos es inferior al 5%; en Beijing no se permiten los turismos diésel. La mortalidad prematura anual mundial atribuible a la exposición al PM_{2.5} en ambientes exteriores alcanzó en 2013 2,9 millones (ver figura 4), y alcanzó unos costes asociados a este contaminante de 3,6 trillones de dólares¹².

¹² Banco Mundial, 2016. The Cost of Air Pollution. Strengthening the Economic Case for Action. The World Bank and the Institute of Health Metrics and Evaluation, University of Washington, Seattle. Published by The World Bank Group, Washington, USA. 102 pp. <http://documents.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/pdf/108141-REVISED-Cost-of-PollutionWebCORRECTEDfile.pdf>

Figura 3A

Niveles medios de PM₁₀ para diferentes ciudades del mundo (el orden de las ciudades se basa en los niveles de PM₁₀).



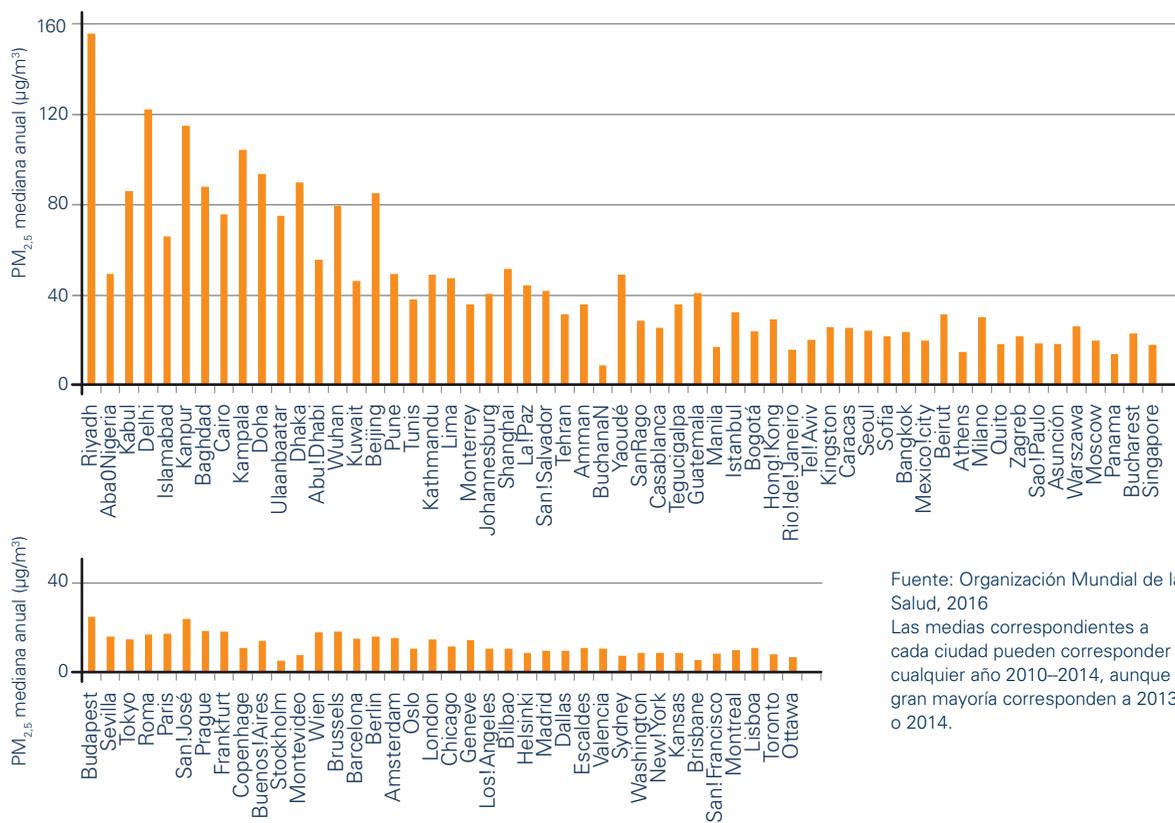
Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2016
 Las medias correspondientes a cada ciudad pueden corresponder a cualquier año 2010–2014, aunque la gran mayoría corresponden a 2013 o 2014.

La Agencia Europea de Medio Ambiente indica que anualmente se registran en Europa 400.000 muertes prematuras atribuibles a la contaminación ambiental por PM_{2,5}, otras 60.000 debidas al NO₂, y 15,000 al O₃. Ello supone en Europa alrededor del 5% del

PIB, mientras que para el O₃ estos costes representan el 0,2%, tanto por el hecho de su impacto inferior en la salud, como porque los niveles elevados afectan a zonas mucho menos pobladas, pero con igual derecho de protección de sus habitantes.

Figura 3B

Niveles medios de $PM_{2,5}$ para diferentes ciudades del mundo (el orden de las ciudades se basa en los niveles de PM_{10}).



Fuente: Organizaci3n Mundial de la Salud, 2016
 Las medias correspondientes a cada ciudad pueden corresponder a cualquier a1o 2010–2014, aunque la gran mayoria corresponden a 2013 o 2014.

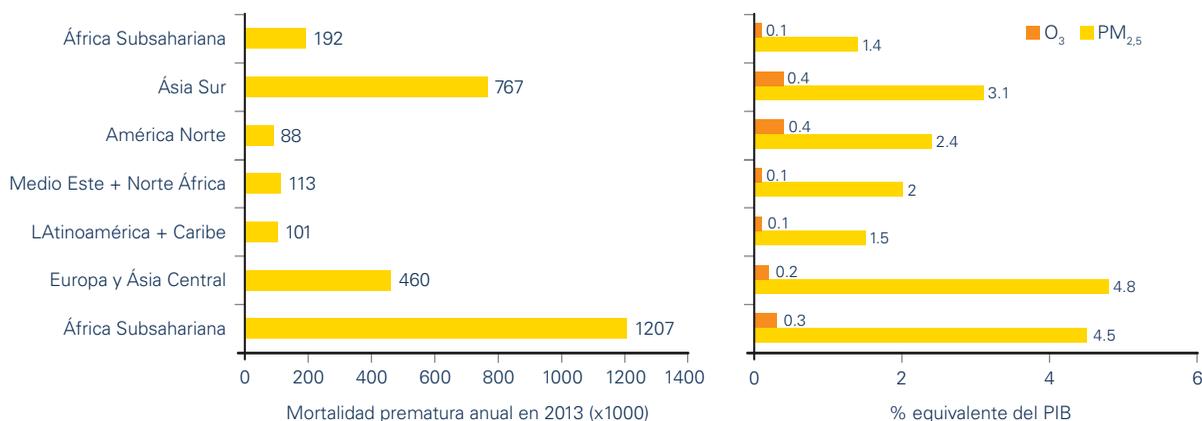
¿Cu4l es el estado actual de la calidad del aire urbano en Europa?

Los contaminantes cr4ticos en Europa por incumplimiento normativo, o de las gu4s de la OMS, son los que anteriormente se han

citado: PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 , O_3 y B(a)P. Aunque se registran tambi4n superaciones de los valores l4mite u objetivo de otros contaminantes, 4stos se producen de manera mucho m4s localizada y por causas industriales que tienen probablemente soluciones identificadas. En cuanto a la magnitud y distribuci3n de los incumplimientos normativos de los citados

Figura 4

Mortalidad prematura anual atribuible a la contaminación en aire ambiente por $PM_{2.5}$, y costes anuales relativos de la contaminación del aire ambiente por $PM_{2.5}$ y O_3 en diferentes regiones del mundo (2013; en % del producto interior bruto, PIB).



Fuente: Banco Mundial, 2016

contaminantes críticos, el valor límite de PM_{10} diario se supera en amplias zonas de Europa Central, Oriental y Meridional (ver figura 5). Además, en el resto, de manera puntual existen todavía puntos negros asociados a grandes ciudades, a su tránsito rodado o a focos industriales. En zonas rurales del centro y oriente de Europa, la quema de combustibles sólidos domésticos (carbón y biomasa) es también una causa importante. En el caso del NO_2 el valor límite de protección a la salud se supera en casi todas las grandes ciudades, incluyendo

algunas escandinavas, aunque parece haber una mayor incidencia en las del centro de Europa (ver figura 6), probablemente como resultado del mayor impacto de las situaciones anticiclónicas. El valor octohorario de O_3 , objetivo de protección para la salud humana, se supera con mayor frecuencia en Europa meridional, especialmente en el Mediterráneo Occidental y el Valle del Po, aunque en las regiones centrales se detecta también un fuerte impacto. Además de las altas emisiones de precursores de O_3 , la elevada radiación solar activa la fotoquímica que genera este

13 OMI-NASA, 2017. NASA Earth Data. Tropospheric NO_2 data. Giovanni The Bridge Between Data and Science v 4.23. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&variableFacets=dataFieldMeasurement%3ANO2%3B>

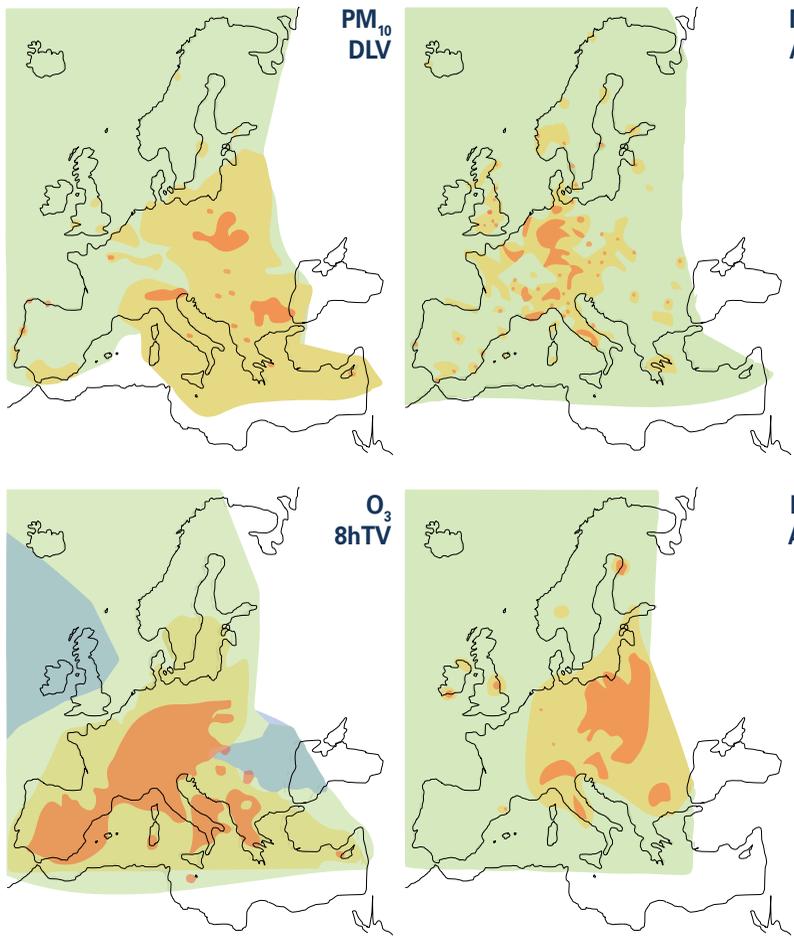


Figura 5

Mapas de probabilidad de concentraciones de los rangos y contaminantes indicados para Europa (2015).

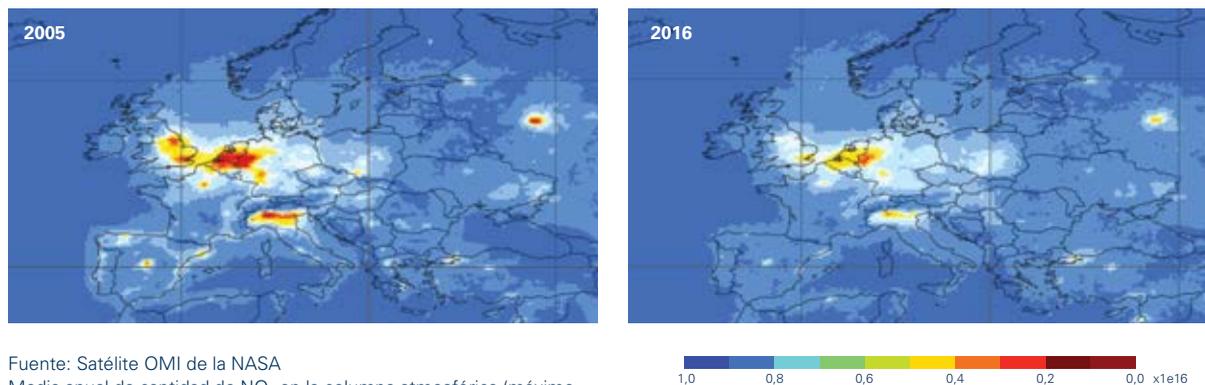
Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2017

Todos los valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excepto B(a)P en ng/m^3 . Perc., Valor del percentil anual (PM_{10}) o estival (O_3) indicado; Anual, media anual; 8h, media de 8 horas móviles; DLV, valor límite diario (las zonas en rojo lo superan); ALV, valor límite anual (las zonas en rojo lo superan); TV, valor objetivo para el periodo estival (las zonas en rojo lo superan); ATV, valor objetivo anual (las zonas en rojo lo superan).

PM₁₀	NO₂	O₃	BaP
<ul style="list-style-type: none"> Perc. 90,4 >50 Perc. 90,4 40-30 Perc. 90,4 <30 ----- 	<ul style="list-style-type: none"> Anual >40 Anual 30-40 Anual <30 ----- 	<ul style="list-style-type: none"> Perc. 93,2 >120 Perc. 93,2 100-120 Perc. 93,2 80-100 Perc. 93,2 <80 	<ul style="list-style-type: none"> Anual >1,0 Anual 0,4-1,0 Anual <0,4 -----

Figura 6

Niveles de óxidos de nitrógeno en Europa (media de 2005 y 2016).



Fuente: Satélite OMI de la NASA

Media anual de cantidad de NO₂ en la columna atmosférica (máximo valor: 10¹⁵ moléculas/cm², acumulando la concentración de la columna atmosférica al cm² superficial)¹³.

contaminante, y por tanto su distribución tiene una clara influencia climática. Por último, el valor objetivo de B(a)P para la protección de la salud se supera en Europa Central y Oriental, el Valle del Po, y diferentes puntos

negros distribuidos por todo el continente. En la gran mayoría asociados todos a la quema de combustibles sólidos –carbón y biomasa– en calefacciones domésticas, residenciales e institucionales¹⁴.

14 EEA, 2016. Air quality in Europe-2016 report. EEA Report, No 28/2016. ISBN 978-92-9213-824-0, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 88 pp.

I. El fenómeno, causas y efectos

La calidad del aire en España. Diagnóstico y comparación con otros países

Irene Olivares (MAPAMA)

Las causas y el origen de la contaminación del aire en España

Julio Lumbreras (UPM)

Las emisiones contaminantes de los vehículos

Jesús Casanova Kindelán (UPM)

Los efectos de la contaminación del aire en la salud humana

Elena Boldo (Instituto de Salud Carlos III)

La normativa de calidad del aire en España y la Unión Europea

Ángeles Cristobal (Ayuntamiento de Madrid)

Energía y contaminación del aire en el mundo. El papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire

Mariano Marzo (Universidad de Barcelona)



Licenciada en Ciencias Ambientales. Jefa de Área de Calidad del Aire en la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Colabora en programas de cooperación institucional (Twinning Programmes) de la Unión Europea para el fomento y desarrollo de la legislación europea en países candidatos, así como en la promoción de registros de contaminantes en países latinoamericanos.

Irene Olivares

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA)

La calidad del aire en España. Diagnóstico y comparación con otros países

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo se realiza la evaluación de la calidad del aire en España?
- ¿Qué indican las tendencias de calidad del aire de los últimos años?
- ¿Cómo alcanzar los objetivos de los planes de calidad del aire a nivel nacional?
- ¿Cuáles son las medidas y retos futuros que se plantean?
- ¿Cuál es la situación en otros estados miembros de la Unión Europea?
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer de este diagnóstico?

Apunte inicial

Con el objetivo de dar cumplimiento a los requisitos establecidos tanto en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, como en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) realiza anualmente la evaluación de la calidad del aire ambiente a nivel nacional. Esta evaluación anual permite obtener información comparable sobre la situación de la calidad del aire en todo el territorio nacional, para que las diferentes administraciones en el ámbito de su competencia puedan establecer las medidas necesarias en materia de prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica.

¿Cómo se realiza la evaluación de la calidad del aire en España?

La evaluación se realiza con la información que las distintas redes de control y vigilancia de calidad del aire envían al MAPAMA, utilizando un enfoque común basado en criterios también comunes. Estas redes de control y vigilancia de la calidad del aire, son las siguientes:

- **Redes de las Comunidades Autónomas** (Andalucía, Aragón, Principado de Asturias, Baleares, Canarias, Cantabria, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Cataluña, Comunidad Valenciana, Extremadura, Galicia, Comunidad de Madrid, Región de Murcia, Comunidad Foral de Navarra, País Vasco y La Rioja), utilizadas en la evaluación de los contaminantes principales regulados por la legislación.
- **Redes de entidades locales** (Ayuntamiento de Madrid, Ayuntamiento de Zaragoza), igualmente para la evaluación de los contaminantes principales.
- **Red EMEP/VAG/CAMP**, la única de carácter estatal, gestionada por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), para la observación de la calidad del aire de fondo en zonas rurales remotas.

Para realizar la evaluación de la calidad del aire ambiente, cada administración competente divide su territorio en zonas y aglomeraciones. Las zonas son porciones de territorio delimitadas por la administración competente, en cada caso, y son utilizadas

para la determinación y gestión de la calidad del aire; las aglomeraciones se definen como conurbaciones de población superiores a 250.000 habitantes o bien, cuando la población es igual o inferior a 250.000 habitantes, con una densidad de población por km² que determine la Administración competente y justifique que se evalúe y controle dicha calidad.

El establecimiento de las zonas y aglomeraciones se lleva a cabo para todos los contaminantes evaluados, excepto el ozono (O₃), conforme a los umbrales de evaluación establecidos en el Anexo II del Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. En el caso del O₃, la zonificación se realiza teniendo en cuenta el valor objetivo a largo plazo establecido en el Anexo I del Real Decreto 102/2011, de 28 de enero.

En las diferentes zonas y aglomeraciones definidas se evalúa la calidad del aire para los siguientes contaminantes: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno (NO₂, NO_x), partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}), plomo (Pb), benceno (C₆H₆), monóxido de carbono (CO), arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni), benzo(a)pireno (B(a)P) y O₃. Dicha evaluación se realiza considerando los diferentes objetivos de calidad fijados en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero (ver figura 1).

El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, establece que la evaluación de la calidad del aire ambiente se realice, dependiendo del nivel de los contaminantes con respecto a los umbrales/valores objetivo, utilizando mediciones fijas, técnicas de modelización, campañas de mediciones representativas, mediciones indicativas o investigaciones, o una combinación

de todos o algunos de estos métodos. La evaluación para todos los contaminantes, excepto para el O₃, se lleva a cabo de la siguiente forma:

- Se efectúan mediciones de la calidad del aire en lugares fijos en las zonas y aglomeraciones donde los niveles superen los umbrales superiores de evaluación. Dichas mediciones fijas pueden complementarse con modelizaciones o mediciones indicativas para obtener información adecuada sobre la distribución espacial de la calidad del aire ambiente.
- Cuando los niveles detectados están comprendidos entre los umbrales inferior y superior de evaluación puede utilizarse una combinación de mediciones fijas y técnicas de modelización y/o mediciones indicativas.
- En aquellas zonas y aglomeraciones donde el nivel de contaminantes se encuentre por debajo del umbral inferior de evaluación establecido para esos contaminantes, se pueden utilizar técnicas de modelización.

Para el O₃ los criterios establecidos son los siguientes:

- Para las zonas y aglomeraciones en las que durante alguno de los cinco años anteriores las concentraciones de O₃ hayan superado un objetivo a largo plazo, es obligatorio llevar a cabo mediciones fijas continuas. Estas mediciones fijas pueden complementarse con información procedente de modelización y/o mediciones indicativas. Cuando se disponga de datos correspondientes a un período inferior a cinco

Figura 1

Valores límite, valores objetivo y umbrales de alerta para protección de la salud.

CONTAMINANTE	VALOR LÍMITE (VL) / VALOR OBJETIVO (VO) / UMBRAL DE ALERTA	CONCENTRACIÓN	NÚMERO DE SUPERACIONES MÁXIMAS	AÑO DE APLICACIÓN
SO ₂	Media horaria (VL)	350 µg/m ³	>24 horas/año	2005
	Media diaria (VL)	125 µg/m ³	>3 días/año	
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	500 µg/m ³		
NO ₂	Media horaria (VL)	200 µg/m ³	>18 horas/año	2010
	Media anual (VL)	40 µg/m ³		
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	400 µg/m ³		
PM ₁₀	Media diaria (VL)	50 µg/m ³	>35 días/año	2005
	Media anual (VL)	40 µg/m ³		
PM _{2,5}	Media anual (VL)	25 µg/m ³		2015
Pb	Media anual (VL)	0,5 µg/m ³		2005
CO	Máximo diario de las medias móviles octohorarias (VL)	10 mg/m ³		2005
C ₆ H ₆	Media anual (VL)	5 µg/m ³		2010
O ₃	Máximo diario de las medias móviles octohorarias (VO)	120 µg/m ³	>25 días/año (en un promedio de 3 años)	2010
	Umbral de información (promedio horario)	180 µg/m ³		
	Umbral de alerta (promedio horario)	240 µg/m ³		
As	Media anual (VO)	6 ng/m ³		2013
Cd	Media anual (VO)	5 ng/m ³		2013
Ni	Media anual (VO)	20 ng/m ³		2013
B(a)P	Media anual (VO)	1 ng/m ³		2013

años para determinar las superaciones, las administraciones competentes pueden combinar campañas de medición de corta duración en los períodos y lugares en que la probabilidad de observar niveles elevados de contaminación sea alta, de acuerdo con los resultados obtenidos de los inventarios de emisiones y la modelización.

- En el resto de zonas y aglomeraciones se pueden complementar las mediciones fijas continuas con información procedente de modelización y/o mediciones indicativas.

La situación de la peor estación o los niveles más altos de un modelo son los que determinan para todos los contaminantes la clasificación de la zona correspondiente respecto a los valores legislados.

Con la información recogida, el MAPAMA publica a finales del mes de septiembre de cada año el Informe de Evaluación de Calidad del Aire¹⁵. Este informe tiene como principal objetivo presentar los resultados de la evaluación de la calidad del aire del año correspondiente, basándose en la información comunicada a la Comisión Europea para dar cumplimiento a las obligaciones establecidas en la Decisión de Ejecución de la Comisión de 12 de diciembre de 2011. En ésta se establecen disposiciones para las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en relación con el intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad

del aire ambiente, detallando la situación de las zonas con respecto a los valores legislados. Tres son los parámetros analizados por las redes de control que presentan reiteradamente valores superiores a los establecidos legalmente: NO₂, PM₁₀ y O₃ (ver figura 2) También se muestran incumplimientos de otros parámetros de forma puntual y no generalizada.

¿Qué indican las tendencias de calidad del aire de los últimos años?

A continuación se presenta un análisis detallado del diagnóstico de la calidad del aire en España en 2016¹⁶, centrado en estos tres contaminantes –NO₂, PM₁₀ y O₃– y completado con un análisis de la tendencia a lo largo de los años.

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El informe muestra que en 2016 se produjeron problemas de superaciones tanto del valor límite horario como del valor límite anual. En el caso del valor límite horario fue una única zona, Madrid, la que presentó problemas; en cambio para el valor límite anual en 2016 se registraron superaciones en siete zonas: Granada y Área

15 MAPAMA, 2017. Evaluación de la calidad del aire en España 2016. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 50 pp. http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadaireespana2016_tcm7-467179.pdf

16 Basado en la información proporcionada por el informe Evaluación de la calidad del aire en España 2016 (MAPAMA, 2017)

Figura 2

Incumplimientos normativos para los diferentes de los contaminantes atmosféricos (2005-2016).

CONTAMINANTE	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
SO ₂												
NO ₂												
PM10												
PM2,5												
Pb												
C ₆ H ₆												
CO												
O ₃												
As												
Cd												
Ni												
B(a)P												

- Sin superación de los valores legislados
- Superación de los valores legislados
- Sin obligación de evaluación (entrada en vigor: 2008)

Fuente: MAPAMA. 2017

Metropolitana, Área de Barcelona, Vallès-Baix Llobregat, L'Horta, Madrid, Corredor del Henares y La Palma, La Gomera y El Hierro. Para todas las áreas mencionadas, con excepción de la última, la causa principal de estos problemas parece ser las emisiones producidas por el tráfico rodado. El caso de La Palma, La Gomera y El Hierro está siendo objeto de estudio, aunque los indicios apuntan a que se debe a un problema en el analizador de la estación.

Haciendo un análisis comparativo con los últimos años, se puede decir que en 2016 parece recuperarse la tendencia favorable que había desde 2005. Esta tendencia positiva es especialmente notable en las estaciones

urbanas y de tráfico, si bien para las estaciones rurales la situación se mantiene estable.

Partículas PM₁₀

España, debido a su localización geográfica, presenta altos niveles de partículas, generadas de manera natural por las intrusiones de polvo africano. Estos aportes naturales de partículas no contabilizan a efectos de cumplimiento de valores límite establecidos en la legislación tal y como establece tanto en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, en su artículo 22.2 como en la Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo, en su artículo 20.

Para llevar a cabo estos descuentos procedentes de fuentes naturales, la Comisión Europea estableció un procedimiento de directrices para la identificación y descuento de las superaciones atribuibles a dichas fuentes, para saber en qué medida se ven afectados esos niveles y establecer cuál es el nivel de partículas debido a las actividades humanas.

Tras realizar los descuentos pertinentes, el diagnóstico de 2016 muestra que tres zonas de calidad del aire –Villanueva del Arzobispo, Asturias Central y Plana de Vic–, registraron superaciones del valor límite diario. Si nos fijamos en qué ocurrió con respecto al valor límite anual el diagnóstico, en 2016 se produjo una única superación localizada en la zona de Asturias central.

El análisis de los datos de los años anteriores muestra que en 2016 el número de superaciones del valor límite diario se redujo de manera significativa, ya que de 16 estaciones en 2012 se pasa a 2 en 2016, en el caso de estaciones industriales, y de 11 a 4 en estaciones urbanas y suburbanas. Los datos indican que para este contaminante las principales causas de superación de los límites legislados parecen ser el tráfico, los procesos industriales y los procesos de combustión.

Ozono (O₃)

En España, el O₃ troposférico constituye un problema generalizado, debido, en gran

medida, a la climatología y la elevada insolación. El análisis de los datos muestra que entre 2011 y 2016 las superaciones del valor legal establecido para este contaminante¹⁷ fueron disminuyendo paulatinamente, a pesar del repunte experimentado en 2015, que parece se revertió en 2016.

Si hacemos un análisis por tipo de estación, se observa que las superaciones del valor objetivo para la salud disminuyeron de manera paulatina desde 2012 a 2016 en las estaciones de tipo industrial y rural de fondo; para el caso de las estaciones de tráfico se observa que en 2016 también se invirtió la tendencia al alza experimentada hasta 2015. Por el contrario, en las estaciones de tipo urbano y suburbano el número de superaciones se incrementó.

¿Cómo alcanzar los objetivos de los planes de calidad del aire a nivel nacional?

La Ley 34/2007, de 15 de noviembre, establece en su artículo 16, que el Gobierno, en el ámbito de sus competencias, y a fin de cumplir la normativa comunitaria y los compromisos que se deriven de los acuerdos internacionales de los que España sea parte, aprobará los planes y programas de ámbito estatal que sean necesarios para prevenir y reducir la contaminación atmosférica y sus efectos

¹⁷ Valor objetivo para la salud; el máximo diario de las medias móviles octohorarias no puede superar el valor de 120 µg/m³ más de 25 veces en un promedio de 3 años; equivalente al P93,2.

transfronterizos, así como para minimizar sus impactos negativos.

Este artículo también establece la obligatoriedad de elaborar planes de mejora de la calidad del aire que permitan alcanzar los objetivos en los plazos fijados en las zonas en las que los niveles de uno o más contaminantes regulados superen dichos objetivos. Además, las Comunidades Autónomas, de acuerdo con este artículo, podrán poner en marcha planes acción a corto plazo en los que se determinen medidas inmediatas y a corto plazo para las zonas y supuestos en que exista riesgo de superación de los objetivos de calidad del aire y los umbrales de alerta.

El 12 de abril de 2013, el Consejo de Ministros acordó la aprobación del Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016 (AIRE). El Plan AIRE establecía un marco de referencia para la mejora de la calidad del aire en España, y comprendía una serie de medidas (horizontales y sectoriales) que actuaban sobre diferentes ámbitos relacionados con la calidad del aire ambiente, como por ejemplo: la información a la ciudadanía, la concienciación, administración, investigación y fiscalidad, en el caso de las medidas horizontales, o medidas dirigidas a sectores concretos como la industria, la construcción, el transporte, la agricultura y ganadería o el sector residencial cuando se trataba de medidas sectoriales. Todas ellas tenían como fin complementar los planes de actuación aprobados por las comunidades autónomas o entidades locales para cada zona de calidad del aire que presentase incumplimientos.

Este Plan se concibe como una continuación del anterior, recogiendo una serie de medidas

a nivel de la Administración general de Estado que favorezcan la mejora de la calidad del aire ambiente en España. Los objetivos generales de dicho plan (Plan AIRE II) son los siguientes:

- 1.** Garantizar el cumplimiento de la legislación en materia de calidad del aire en todos los ámbitos: nacional, europeo e internacional.
- 2.** Poner en marcha medidas de carácter general que ayuden a reducir los niveles de emisión a la atmósfera de los contaminantes más relevantes y con mayor impacto sobre la salud y los ecosistemas, especialmente en las áreas más afectadas por la contaminación.
- 3.** Fomentar la información disponible en materia de calidad del aire y, de este modo, también la concienciación de la ciudadanía.
- 4.** Poner en marcha medidas que garanticen el cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones establecidos por la Directiva (UE) 2016/2284 del Parlamento Europeo y del Consejo de 14 de diciembre de 2016 relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE.
- 5.** Especial mención al O₃ troposférico. Es importante señalar que dentro de los objetivos principales del Plan está abordar la problemática existente a nivel nacional relativa a las superaciones del valor objetivo para la protección de la salud de O₃ que se producen de manera generalizada en gran parte del país. Por tratarse de un contaminante secundario sobre el que no

se pueden aplicar medidas directas encaminadas a su reducción, la estrategia que aquí se plantea se articula en dos vías: por un lado, actuar sobre las sustancias contaminantes precursoras del O₃ [compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), CO, NO_x, y en menor medida, metano (CH₄)], y por otro lado, fomentar la puesta en marcha de estudios científicos que den un mejor conocimiento de la dinámica de formación del ozono troposférico que permita la futura puesta en marcha de medidas que contribuyan a la mejora de la situación actual.

Uno de los objetivos que persigue el Plan AIRE II es conseguir que la información sobre la calidad del aire sea más accesible y fácil de entender. Por ello, se plantean medidas para facilitar el acceso a la información que genera la red de manera comprensible a través de la adopción del índice de calidad del aire, y ofrecer información temprana sobre episodios de alta contaminación, para lo cual se contempla llevar a cabo las mejoras necesarias que permitan prever estos episodios con una mayor antelación. Además, con el fin de mejorar los datos que se proporcionan a la población en estos episodios de alta contaminación –en concreto en los referidos a altos valores de NO₂–, se propone la creación de un protocolo marco de actuación, de tal modo que tanto los umbrales de alerta como las actuaciones y restricciones sean las mismas, independientemente del lugar en el que nos encontremos.

De igual manera, la Administración General del Estado puede actuar en el ámbito fiscal, estableciendo criterios ambientales a determinados impuestos regulados por el Estado. Diversos informes elaborados por

organismos internacionales como la OCDE o la Comisión Europea, señalan que el sistema fiscal actual presenta margen para revisar los impuestos medioambientales, principalmente en los sectores del transporte y la energía, y en los ámbitos de la contaminación y el uso de los recursos. Por ello se establece la creación de un grupo de trabajo en el MAPAMA enfocado a valorar las diferentes posibilidades que existen en relación a la fiscalidad ambiental.

Una de las principales causas de problemas de calidad del aire en España, en especial en las grandes ciudades, son las emisiones provenientes del tráfico. En este sentido, el Plan recoge medidas que permitan facilitar el uso de medios de transporte alternativos y que traigan consigo una disminución del uso del coche, y por tanto una mejora de la calidad en áreas urbanas. Uno de los retos más importantes a los que se enfrenta el Reino de España a la hora de implementar la Directiva (UE) 2016/2284, de 14 de diciembre de 2016, es garantizar el cumplimiento de las nuevas exigencias que en ella se recogen, especialmente en lo que se refiere a las emisiones de amoníaco (NH₃). Por ello, una de las líneas de acción del Plan va encaminada a la puesta en marcha de medidas que permitan reducir las emisiones anuales totales, en especial de aquellas provenientes del sector agrícola y ganadero, por ser estos grandes emisores de dicho contaminante. Asimismo, se aborda el problema derivado de las emisiones provenientes del sector residencial, recogiendo la puesta en marcha de incentivos económicos que fomenten la reforma de edificios existentes para mejorar la eficiencia energética de los mismos, y que puedan traer consigo una reducción de las emisiones de este sector.

El Plan contempla también medidas encaminadas a reducir en lo posible los contaminantes del sector industrial. Las medidas están centradas en la aprobación de normativa que regule las emisiones al aire de ciertos sectores mediante, entre otras medidas, el establecimiento de valores límite de emisión de obligado cumplimiento.

La Administración General del Estado es competente en ámbitos como puertos, aeropuertos y carreteras, donde se generan muchas emisiones. El Plan AIRE II contempla algunas medidas para reducir emisiones allí donde el Estado asume competencias directas. Un ejemplo es el establecimiento de una serie de acciones encaminadas a la reducción de las emisiones procedentes de las aeronaves y de las actividades auxiliares que se llevan a cabo en los aeropuertos, o aquellas que propulsan el uso del ferrocarril frente a otros modos de transporte, especialmente en lo referido al transporte de mercancías.

Finalmente, se quiere fomentar la investigación sobre las situaciones de contaminación del aire más generalizadas, como la elevada formación de ozono en periodos de mayor insolación o la alta concentración de partículas en el aire. Dichas medidas vienen a complementar a los planes de actuación aprobados por las comunidades autónomas o entidades locales para cada zona o aglomeración que presenta incumplimientos. Las medidas han sido propuestas por los órganos directivos de los diferentes ministerios competentes incluidos el MAPAMA.

Al Plan Aire 2017-2019 le dará continuidad el Programa Nacional de la Contaminación Atmosférica que, según marca la Directiva

2016/2284 del Parlamento Europeo y el Consejo de 14 de diciembre de 2016, relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos –por la que se modifica la Directiva 2003/35/CE y se deroga la Directiva 2001/81/CE–, deberá estar aprobado en 2019.

¿Cuáles son las medidas y retos futuros que se plantean?

Aunque la situación de la calidad del aire ha mejorado en los últimos años para la mayoría de los contaminantes, aún queda trabajo por hacer. Los retos a los que hay que hacer frente a nivel nacional están centrados, principalmente, en garantizar el cumplimiento de los valores legislados para todos los contaminantes en todo el territorio nacional.

Cumplimiento de los valores límite normativos de contaminantes atmosféricos

Los principales problemas que existen en la actualidad, tal y como ya se ha descrito, están relacionados con el cumplimiento de los valores de NO_2 , PM_{10} y O_3 .

Los problemas relativos a NO_2 están localizados en grandes ciudades y su principal fuente es el tráfico rodado. En este sentido, el reto fundamental es poner en práctica políticas

y medidas que fomenten una movilidad más sostenible, con un modelo de vida acorde a los tiempos en los que estamos pero que, a su vez, garanticen que la población vive expuesta a niveles de contaminación del aire ambiente adecuados para su salud. Estas medidas deben centrarse en la reducción del tráfico rodado, especialmente en el uso de vehículos diésel.

El análisis de los datos relativos al PM_{10} indica que los principales problemas de cumplimiento de los valores legislados para este parámetro se localizan en todo tipo de áreas (urbanas, suburbanas y rurales), y de todas las tipologías (industriales, de tráfico y de fondo). Si tenemos en cuenta que gran parte de estas superaciones se producen debido a las aportaciones naturales de material particulado, se puede concluir que el resto de superaciones actuales se deben al tráfico, a los procesos industriales y, en algunas zonas urbanas y rurales, a la contribución de las emisiones domésticas y residenciales por el uso de combustibles sólidos, en concreto por el uso de biomasa en muchos de los casos. Para mejorar la situación y asegurar el cumplimiento de los valores, las administraciones deben trabajar para reducir el tráfico rodado y mejorar los sistemas productivos industriales en aras de que las instalaciones tengan un mejor comportamiento ambiental que no comprometa la calidad del aire ambiente.

Derivados de los históricos problemas de cumplimiento, España se enfrenta a dos procedimientos de infracción de la legislación europea en materia de calidad del aire: el Dictamen Motivado a España por incumplimiento de la Directiva de Calidad del Aire en lo que respecta a las partículas PM_{10} ,

y el Dictamen Motivado contra España, según el artículo 258 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea, por incumplimiento en 3 zonas de calidad del aire durante varios años consecutivos de los valores límite de NO_2 establecidos en la Directiva 2008/50/CE (Dictamen motivado 2015/2053).

Ahora bien, uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos a nivel nacional es el cumplimiento de los valores objetivo para O_3 troposférico. La contaminación fotoquímica, y en especial los niveles de O_3 troposférico, es un tema de gran importancia ambiental a nivel estatal. El cumplimiento de los niveles de O_3 es un reto difícil por las especiales características de este contaminante.

Su origen puede ser local, regional o transfronterizo, y al tratarse de un contaminante secundario, originado por la reacción de diferentes contaminantes precursores como NO_x , COVs y PM, las medidas a tomar son especialmente complejas. Las medidas a poner en marcha por las diferentes administraciones implicadas para lograr una mejora de la situación deben ir encaminadas a, por un lado, a realizar los estudios necesarios que permitan tener un mejor comportamiento del O_3 troposférico, y por el otro, a actuar sobre los contaminantes precursores de su formación.

Cumplimiento de las guías sobre calidad del aire de la OMS

Un objetivo más ambicioso es el cumplimiento de los valores de calidad del aire fijados en las guías de calidad del aire de la Organización

Figura 3

Comparativa entre los valores legislados por la Directivas Europeas de Calidad del Aire y los valores fijados por las Guías sobre Calidad del aire de la OMS (2006). Valores en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para todos los contaminantes.

CONTAMINANTE	VALOR OMS	VALOR DIRECTIVA UE	PERIODO	INFORMACIÓN ADICIONAL
PM ₁₀	20	40	Media anual	
PM ₁₀	50	50	Media diaria	3 días al año, OMS 35 días año, Directiva UE
PM _{2,5}	10	25*	Media anual	
PM _{2,5}	25	-	Media diaria	3 días al año, OMS
NO ₂	40	40	Media anual	
NO ₂	200	200	Media horaria	Directiva UE, permite 18 superaciones
O ₃	100	120	Valor octohorario	Directiva UE, que no se excedan en 25 días o más de media al año durante un periodo de 3 años

Mundial de la Salud¹⁸. Estas guías recogen concentraciones de PM, NO₂, SO₂ y O₃ que ofrecen un alto nivel de protección frente a los efectos nocivos de la polución del aire sobre la salud humana.

La figura 3 muestra que los valores establecidos en las guías de la OMS son más estrictos que los establecidos por la legislación europea para todos los contaminantes, excepto para el NO₂. Aunque los objetivos son ambiciosos, las medidas puestas en marcha por las diferentes administraciones deberían ir encaminadas a medio-largo plazo a su consecución con el fin de lograr unos niveles de contaminación

que garanticen la salud y el bienestar de los ciudadanos.

¿Cuál es la situación en otros estados miembros de la Unión Europea?

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, o EEA acrónimo inglés) presenta anualmente el Informe sobre la calidad del

18 OMS, 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005. Summary of risk assessment. WHO Geneva, 22p. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

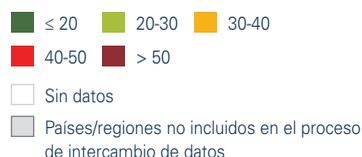


Figura 4

Concentraciones de NO₂ en 2015.

Concentración media anual de NO₂ en 2015

µg/m³



Los puntos rojos y rojo oscuro corresponden a valores superiores al valor límite anual de la UE y la OMS-AQG. Solo las estaciones con >75 datos válidos han sido incluidas en el mapa. Las estaciones de la antigua república yugoslava de Macedonia no están incluidas debido a problemas técnicos.

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017.

aire en Europa¹⁹. La última versión, publicada el 11 de octubre de 2017, presenta una visión general actualizada desde el año 2000 hasta el 2015, haciendo además un análisis de situación existente frente a los valores límite establecidos por las Directivas de calidad del aire.

La información contenida en este informe nos permite hacer un análisis comparativo entre la situación en España en relación al resto de los países de la Unión Europea. Con el fin de llevar a cabo esta comparativa se han elegido aquellos contaminantes para los que existen problemas de cumplimiento de los requisitos establecidos por las Directivas Europeas (NO₂, PM₁₀ y O₃).

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El informe de la AEMA muestra que 22 de los 28 estados miembros de la UE presentaron valores por encima del valor límite anual. La distribución espacial de los lugares en los que se presentaron estas superaciones muestra que se trata de un problema bastante extendido a lo largo del continente (ver figura 4). Haciendo un análisis del tipo de estaciones, se observa que gran parte de las estaciones que presentaron superaciones (un 89%) eran de tráfico, y si analizamos el tipo de zonas, el 98% fueron áreas urbanas o suburbanas.

19 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, EEA Report No 13/2017, 74pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

Esta información muestra que los problemas existentes en España en relación al NO_2 son similares a los que se producen en el resto de Europa, y en ambos casos suceden principalmente en áreas urbanas y tienen como fuente principal el tráfico.

Con respecto al valor límite horario, únicamente las únicas estaciones de fondo urbano que presentaron superaciones fueron las tres de Madrid; el resto eran en casi todos los casos estaciones de tráfico urbano.

Partículas PM_{10}

Los valores de PM_{10} frente al valor límite diario, en 2015 se registraron concentraciones por encima de los valores legislados en un gran número de estaciones, un 19% (ver figura 5). El reciente análisis de la Agencia Europea del Medio Ambiente muestra que en 2015 únicamente en el 3% de las estaciones se registraron valores por encima del valor legislado (ver figura 6). Al igual que ocurría con el NO_2 , la distribución espacial de las zonas y estaciones con problemas muestra que la problemática a nivel europeo para este contaminante tiene una distribución asimilable a la española, e indican que también en este caso las principales causas de superación de los límites legislados parecen ser el tráfico, los procesos industriales y los procesos de combustión.

Ozono (O_3)

Por lo que respecta a los valores de O_3 troposférico registrados en 2015, el informe

concluye que 18 estados miembros y otros 4 países informantes registraron concentraciones por encima del valor objetivo de O_3 más de 25 veces. Esto supuso que un 41% de las estaciones registraron niveles por encima del valor de protección de la salud en 2015. La distribución espacial de las zonas con superaciones, así como el tipo de zonas afectadas, muestra que se trata de un problema generalizado a nivel europeo, si bien la situación es especialmente problemática para los países del sur de Europa (Figura 7), en gran parte debido a la climatología y a la elevada insolación.

¿Qué conclusiones se pueden extraer de este diagnóstico?

Pese a que en los últimos años se han realizado importantes esfuerzos para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, aún persisten determinados problemas en la calidad del aire cuyo intento de solución debe formar parte de las prioridades en la agenda política de las administraciones públicas.

Los principales problemas relativos a la calidad del aire ambiente a nivel nacional están relacionados con el NO_2 y el PM_{10} , y se concentran principalmente en zonas urbanas y suburbanas. Esto no quita para que no se pongan esfuerzos en controlar otros parámetros de calidad del aire a fin de garantizar unos niveles que aseguren la salud y el bienestar de los ciudadanos.

El caso del O_3 troposférico requiere especial atención. Su problemática afecta a gran parte

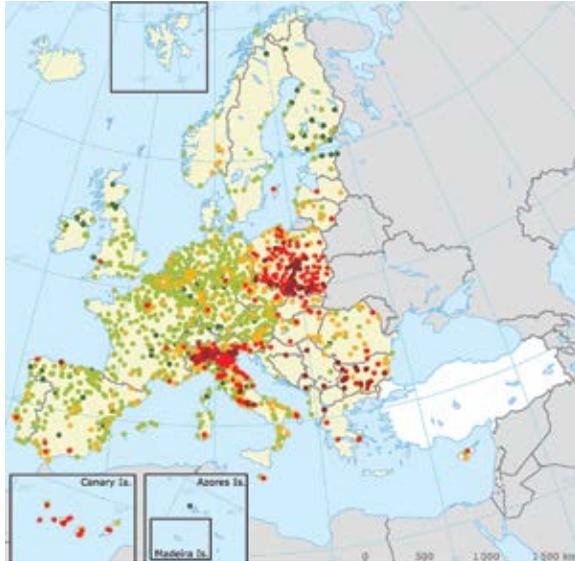


Figura 5

Concentraciones de PM_{10} en 2015. Valor límite diario.

90,4 percentil de las concentraciones diarias de PM_{10} en 2015
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



□ Sin datos

■ Países/regiones no incluidos en el proceso

El mapa muestra el 90,4 percentil de las concentraciones medias diarias de PM_{10} , representando el 36 valor más alto en una serie completa. Está relacionado con el valor límite diario de PM_{10} , lo que representa 35 superaciones del umbral de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 1 año. Los puntos rojos y rojo oscuro corresponden a valores superiores al valor límite anual. Solo las estaciones con >75 datos válidos han sido incluidas en el mapa. Las estaciones de la antigua república yugoslava de Macedonia no están incluidas debido a problemas técnicos.

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017.



Figura 6

Concentraciones de PM_{10} en 2015. Valor límite anual.

Concentraciones medias anuales de PM_{10} en 2015
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

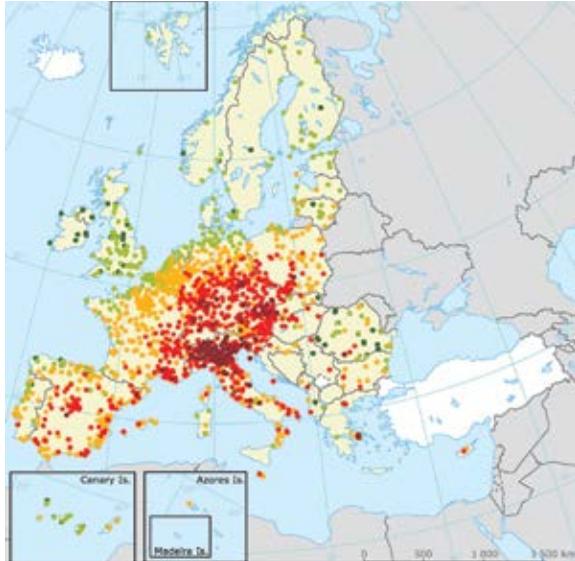


□ Sin datos

■ Países/regiones no incluidos en el proceso de intercambio de datos

Los puntos rojos y rojo oscuro corresponden a valores superiores al valor límite anual de la UE ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los puntos verde oscuro indican estaciones con valores por debajo del límite de la OMS AQG ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Solo las estaciones con >75 datos válidos han sido incluidas en el mapa. Las estaciones de la antigua república yugoslava de Macedonia no están incluidas debido a problemas técnicos.

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017.



Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017.

Figura 7

Concentraciones de O_3 , según su valor percentil 93,2 del máximo diario de las concentraciones octohorarias en 2015.

93,2 percentil de la media máxima diaria (8 horas) de O_3 en 2015

$\mu g/m^3$

- ≤ 80
 80-100
 100-120
- 120-140
 > 140

Sin datos

Países/regiones no incluidos en el proceso de intercambio de datos

El mapa muestra el 93,2 percentil de la media máxima diaria (8 horas) de O_3 , representando el 26 valor más alto en una serie completa. Está relacionado con el valor límite diario de O_3 , lo que representa 25 superaciones del umbral de $100 \mu g/m^3$. Solo las estaciones con >75 datos válidos han sido incluidas en el mapa. Las estaciones de la antigua república yugoslava de Macedonia no están incluidas debido a problemas técnicos.

del país, siendo esta afección especialmente relevante en la zona sur. Esto se debe a la especial complejidad de este contaminante y a las características climatológicas de este territorio. Por ello deben ponerse en marcha medidas en

todos los ámbitos administrativos que permitan mejorar el conocimiento de este contaminante y proporcionen una base sólida sobre la que basar la toma de decisiones encaminada a reducir los niveles de O_3 troposférico.



Julio Lumbreras es Profesor Titular de Ingeniería del Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Madrid y Visiting Scholar en la Harvard Kennedy School. Actualmente es el Director de la UPM para Norte América. Es experto en inventarios y proyecciones de emisión de contaminantes atmosféricos.

Julio Lumbreras

Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y Harvard Kennedy School (HKS)

Rafael Borge es Profesor Titular de Ingeniería del Medio Ambiente en la Universidad Politécnica de Madrid. Es el director del Laboratorio de Modelización Ambiental y es experto en la simulación de la calidad del aire.

Rafael Borge

Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Las causas y el origen de la contaminación del aire en España

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo ha evolucionado la calidad del aire en Europa y España en los últimos años?
- ¿Qué funciones cumplen los inventarios de emisiones para los contaminantes urbanos?
- ¿Cómo contribuye cada fuente de emisiones a los niveles de contaminación?
- ¿Qué factores condicionan la calidad del aire urbano?
- ¿Cuáles son los criterios de priorización a considerar para evaluar estrategias de actuación?
- ¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire?
- ¿Cuáles son los principales retos futuros?
- ¿Hacia dónde se debe avanzar para mejorar la calidad del aire en España?

Apunte inicial

Para evaluar la tendencia en la contaminación atmosférica hay que centrarse en los compuestos que más afectan en las dinámicas de transporte y reacción química en el ámbito local y regional, empeorando la calidad del aire de las ciudades, una de las principales preocupaciones ambientales de los ciudadanos que viven en las mismas, por sus efectos sobre la salud.

Así, sin perjuicio de estimar también las emisiones de gases de efecto invernadero, se ha de poner especial énfasis en los contaminantes con mayor incidencia potencial en las zonas urbanas (o contaminantes urbanos, ver figura 1): óxidos de nitrógeno (NOx), material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}, principalmente), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y amoníaco (NH₃).

La evolución en la emisión de estos contaminantes ha sido decreciente en los países más desarrollados durante los últimos años (ver figura 2), según el informe anual que elabora la Agencia Europea de Medio Ambiente²⁰.

Si se analizan los niveles de concentración en el aire ambiente (calidad del aire) la situación es similar. En el informe de 2016 del Programa de cooperación para la monitorización y evaluación de la contaminación transfronteriza en Europa²¹, se muestra una tendencia decreciente en los principales compuestos (NO₂, PM; ver figura 3).

Cabé destacar que el grueso de las emisiones se acumula en las zonas urbanas (ver figura 4), donde también se concentra la población y, por tanto, los impactos de la contaminación atmosférica. Esto las señala claramente como áreas prioritarias de actuación para reducir los efectos negativos de dicha contaminación.

Sin embargo, la situación es contraria en los países en desarrollo (ver figura 5), puesto que el incremento en los niveles de vida ha llevado a un aumento significativo de las emisiones urbanas con el consiguiente, y bien conocido, problema del empeoramiento de la calidad del aire, que se ha convertido en un problema de primer orden en ciudades como Riyadh, Delhi, Pekín o El Cairo, superando los umbrales de la Organización Mundial de la Salud (OMS)²².

20 EEA, 2017. Air quality in Europe-2017 report. EEA Report, No 13/2017. ISBN 978-92-9213-921-6, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 78 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

21 EMEP, 2016. Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. EMEP/CCC-Report 1/2016, ISBN: 978-82-425-2834-6, 107 pp. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/ExecutiveBody/35th_session/cccr1-2016_FINAL.pdf

22 OMS 2016. WHO's Urban Ambient Air Pollution database - Update 2016, available at: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

Figura 1

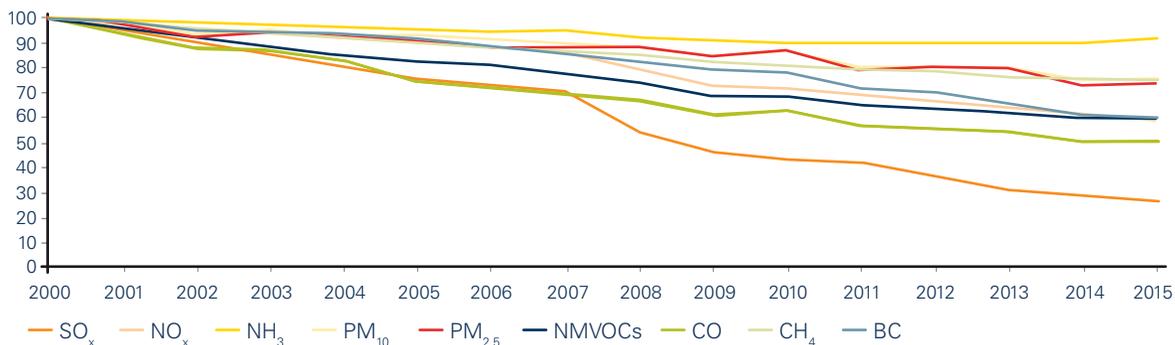
Principales contaminantes con relevancia en calidad del aire.

CONTAMINANTE	ORIGEN	TIEMPO DE VIDA ¹	IMPACTOS
SO ₂	Uso de combustibles con azufre	Días	Salud, acidificación, precursor de partículas
NO _x	Procesos de combustión de cualquier combustible	< 1 día	Salud, acidificación, eutrofización, precursores de PM y O ₃
COVNM _s	Disolventes, hidrocarburos, vegetación	Desde horas a varios días (en función de su reactividad)	Salud, precursores de O ₃ , precursores de PM
PM	Inquemados de combustión, abrasión (erosión, desgaste, etc.), industria alta temperatura, resuspensión, fuentes naturales, procesos secundarios	Desde horas a semanas (en función de su diámetro)	Salud, visibilidad, clima, ecosistemas
O ₃	Secundario a partir de NO _x y COV _s	Días	Salud, vegetación, clima
NH ₃	Gestión de residuos, agricultura, ganadería y catalizadores vehículos	Días	Acidificación, eutrofización, precursor de partículas
CO	Combustión incompleta	Meses	Salud

¹ Orden de magnitud del tiempo de vida en la atmósfera urbana.

Figura 2

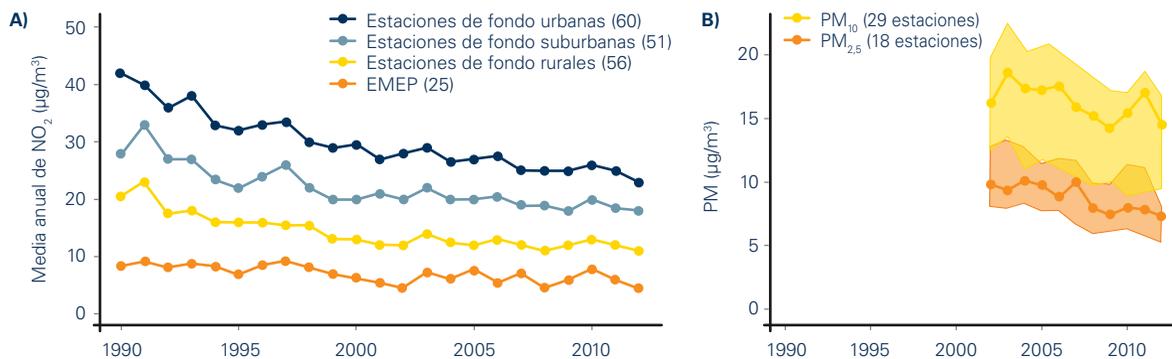
Emisiones relativas de los principales contaminantes atmosféricos en la UE-28 respecto a 2000.



Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017. Air quality in Europe-2017 report

Figura 3

Evolución en Europa de la concentración de A) NO₂ y B) PM.



Fuente: EMEP, 2016. Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. EMEP/CCC-Report 1/2016

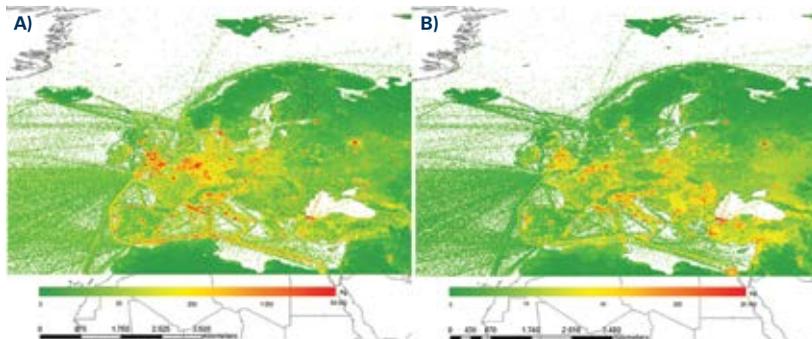


Figura 4

Niveles de concentración de a) NO₂ y b) PM_{2,5} en Europa.

Fuente: EMEP/CEIP, 2016. Present state of emissions as used in EMEP models²³

REGIÓN MUNDIAL	TENDENCIA SOBRE LA MEDIA. PERÍODO 2008-2013
África subsahariana	NA
América, LMI	→
Próximo Oriente, HI	↘
Europa mediterránea, LMI	↗
Europa mediterránea, HI	↗
Europa, LMI	↘
Europa, HI	↘
Sureste asiático	↗
Pacífico oeste, LMI	↗
Pacífico oeste, HI	↘
Mundo	↗

Figura 5

Tendencia de la concentración de material particulado en el mundo (2008-2013).

LMI: low-middle income (países con rentas medias y bajas)
 HI: high income (países con rentas altas)

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS), 2016

En el caso de España, tanto las emisiones como los niveles de calidad del aire han mejorado significativamente en los últimos 15-25 años para los óxidos de nitrógeno –NO₂ en el caso de los niveles en aire ambiente– (ver figura 6). Sin embargo, los principales problemas que persisten se asocian a áreas urbanas. La situación en las principales ciudades de España es similar a la de otros estados miembros de la Unión Europea (UE), con un mejor comportamiento cuando se analizan los valores establecidos por la legislación. En el informe de la Agencia Europea del Medio Ambiente de 2017, se muestra que España en 2015 estuvo por debajo de la mediana de la UE en lo que se refiere tanto a concentración de PM₁₀ respecto al límite diario como en cuanto al

indicador de exposición de la población de PM_{2,5} (ver figura 7).

¿Qué funciones cumplen los inventarios de emisiones para los contaminantes urbanos?

Para poder entender las causas y el origen de la contaminación urbana es necesario desarrollar documentos que permitan estimar los contaminantes que se generan en la ciudad y sus fuentes emisoras. Estos documentos se denominan inventarios de emisiones y se llevan

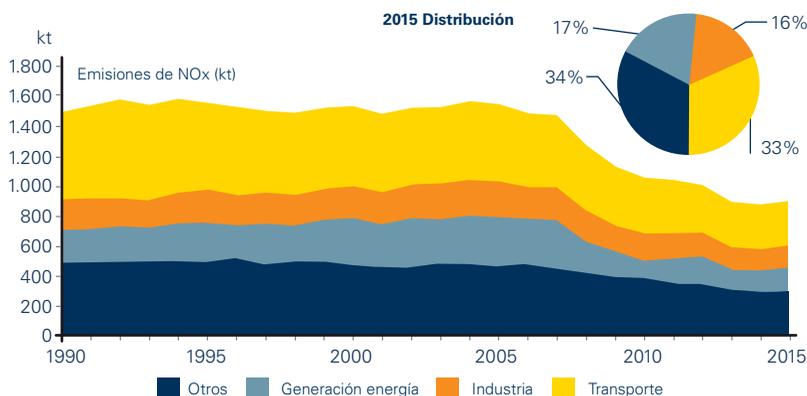
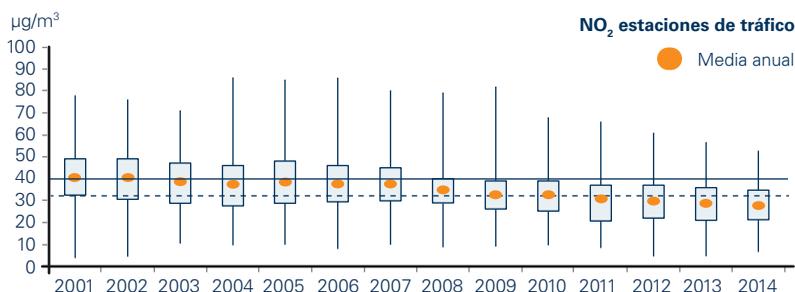


Figura 6

Evolución de las emisiones de NO_x y la concentración de NO_2 en España.

Fuente: Elaboración propia a partir de MAPAMA, 2017a y MAPAMA, 2017b)²⁴



desarrollando en la Unión Europea desde principio de los años noventa²⁵. A lo largo de estas décadas se ha trabajado en el desarrollo de metodologías que tienen unos principios básicos: coherencia, completión, transparencia, fiabilidad y comparabilidad. Esto

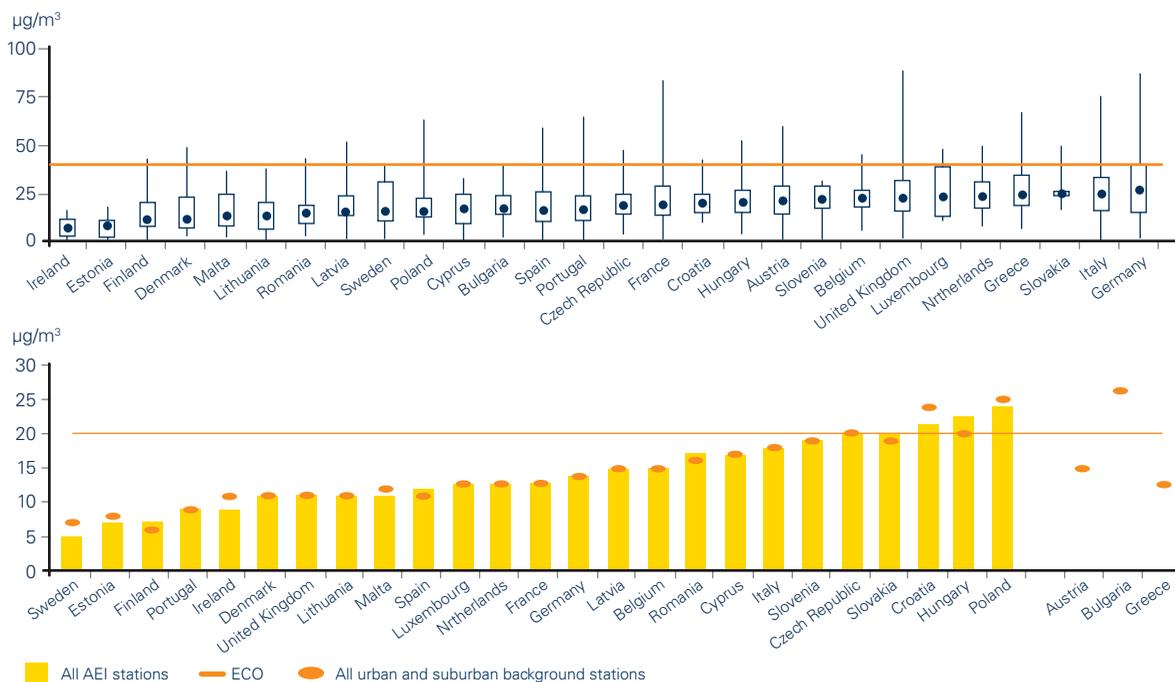
es, los inventarios tienen que ajustar el proceso de estimación de emisiones y presentación de resultados a las definiciones y nomenclaturas relevantes, aprobadas internacionalmente. Han de ser lo más exhaustivos posible, dando la máxima

²⁴ MAPAMA, 2017a. Inventario de emisiones atmosféricas a la atmósfera. Disponible en: <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/> MAPAMA, 2017b. Datos de concentración de contaminantes en las distintas estaciones de calidad del aire en España. <http://sig.mapama.es/calidad-aire>

²⁵ EMEP/EEA, 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. EMEP/EEA-Report 21/2016, ISSN: 1977-8449, 24 pp. file:///C:/Users/Usuari/Downloads/EMEP%20EEA%20air%20pollutant%20emission%20inventory%20guidebook%202016%20Introduction.pdf

Figura 7

Concentración de NO₂ respecto al valor límite establecido (superior) e Indicador Medio de Exposición (IME, calculado a partir de la concentración de PM_{2,5}) respecto al valor legalmente exigible (exposure concentration obligation, ECO) (inferior).



Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), 2017

cobertura tanto en términos de actividades emisoras como de contaminantes emitidos. Deben ser transparentes, de modo que analistas externos puedan reproducir los cálculos y en base a métodos lo más precisos y exactos posibles basándose en el

conocimiento científico-técnico actualizado en el momento de la elaboración. Por último, han de permitir establecer comparaciones entre países/regiones sobre la base de un conjunto de hipótesis de trabajo comunes y unas nomenclaturas y definiciones estandarizadas.

Sin embargo, además de servir para conocer las fuentes de emisión, los inventarios de emisiones cumplen otras funciones relevantes, como ser la base para plantear medidas de reducción de emisiones, suministrar la información de partida para la simulación de la calidad del aire urbana a través de modelos y, en definitiva, servir para el desarrollo de planes de mejora de la calidad del aire (y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero). Para cumplir con los principios y las funciones anteriormente descritos, los inventarios urbanos han de reunir diversos requerimientos, entre los que destacan: cubrir múltiples contaminantes, incluir todas las fuentes más relevantes y considerar diversas escalas temporales –estimar las emisiones anuales, pero también diarias y horarias para algunos sectores–, espaciales (horizontalmente por municipios, regiones, barrios, etc., y verticalmente, estimando las emisiones a nivel del suelo y a diferentes alturas en el caso de chimeneas o focos de emisión con un significativo gradiente vertical), y de especiación química –por ejemplo, desagregando los COVs NMs en especies, por su diversa reactividad para formar O_3 –. Sin embargo, generar toda esta información de manera precisa y específica para cada zona urbana es muy complejo, lo que lleva a tener que combinar metodologías de agregación de datos muy locales –por ejemplo, emisiones del tráfico cuando se dispone de información detallada sobre el parque de vehículos circulante en la ciudad–, con métodos de desagregación de datos regionales –por ejemplo, en lo referente a las emisiones del consumo de combustibles para calefacción cuando los datos disponibles

son las ventas de combustible a nivel municipal o incluso regional. Por otra parte, al hablar de inventarios urbanos, la atención se debe centrar en los contaminantes mencionados al principio del capítulo.

¿Cómo contribuye cada fuente de emisiones a los niveles de contaminación?

Para poder mejorar la calidad del aire urbana, lo primero que hay que identificar son las fuentes causantes de la contaminación. Cuando se habla de emisiones, se trata de un proceso relativamente sencillo, una vez se dispone de un fiable inventario de emisiones, puesto que consiste únicamente en un análisis del mismo con una ordenación de fuentes en función de la cantidad de contaminante emitido.

Sin embargo, la identificación de las principales actividades o sectores causantes de la mala calidad del aire no es un proceso inmediato. Además de las emisiones, para explicar los niveles de concentración en el aire ambiente es necesario también tener en cuenta la distancia a la población, la altura de las emisiones, y los procesos de dispersión y transformación que tienen lugar en la atmósfera. Para ello, es preciso aplicar técnicas que evalúen el impacto de las emisiones en términos de concentración teniendo en cuenta dichos procesos. Dichas técnicas son de varios tipos, destacando la

modelización del transporte físico y de la reacción química de los contaminantes en la atmósfera²⁶ considerando la ubicación de los focos contaminantes, el efecto de las variables meteorológicas fundamentales – viento, turbulencia, radiación, temperatura, precipitación, etc.– y de interacciones de unas sustancias con otras. Un ejemplo de este tipo de ejercicios, es el trabajo realizado en el contexto del Plan de calidad del aire y cambio climático del Ayuntamiento de Madrid, Plan A²⁷ (ver figura 8).

Aunque la situación de Madrid no tiene por qué ser generalizable, otros estudios²⁸ demuestran que, en el ámbito urbano, los principales sectores que contribuyen a las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos son habitualmente el transporte y el sector residencial, comercial e institucional. En algunos casos, también es relevante la contribución de determinadas industrias²⁹.

¿Qué factores condicionan la calidad del aire urbano?

Según se puede deducir de la información presentada en los apartados anteriores, la gestión de la calidad del aire en las ciudades es particularmente compleja. La dificultad de mejorar dicha calidad en entornos urbanos se debe fundamentalmente a los siguientes factores:

- **Multiplicidad de contaminantes y sus interrelaciones.** Los impactos generados por la contaminación en la salud humana, el clima y los ecosistemas, se deben a la presencia de múltiples contaminantes que, además, producen reacciones sinérgicas o antagónicas en algunos casos. Por ejemplo, la emisión de COVs MNs y NO_x en presencia de radiación ultravioleta genera O₃, que impacta negativamente tanto en la salud humana como en los ecosistemas, y potencia el calentamiento global del planeta. Sin embargo, la emisión de SO₂ y NO_x genera problemas de acidificación y un efecto de enfriamiento del planeta al ser precursores de partículas secundarias que dispersan la radiación.

26 Borge, R., Lumbreras, J., Perez, J., Paz, D., Vedrenne, M., Andrés, J.M., Rodríguez, E., 2014. Emission inventories and modeling requirements for the development of air quality plans. Application to Madrid (Spain). *Science of the Total Environment* 466-467, 809-819.

27 Ayuntamiento de Madrid, 2017. Plan A: Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid. http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/CalidadAire/Ficheros/PlanAireyCC_092017.pdf

28 DEFRA, 2011. Air Quality Plans for the achievement of EU air quality limit values for Nitrogen Dioxide (NO₂) in the UK. Available at: <http://www.eco-hubs.com/files/documents/DEFRA-Air-Quality-Plans.pdf>

Pant, P., and Harrison, R.H., 2013. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment* 77, 78-97.

Salameh, T., Sauvage, S., Afif, Ch., Borbon, A., Locoge, N., 2016. Source apportionment vs. emission inventories of non-methane hydrocarbons (NMHC) in an urban area of the Middle East: local and global perspectives. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3595-3607.

Thurston, G.D., Ito, K., Lall, R., 2011. A source apportionment of U.S. fine particulate matter air pollution. *Atmospheric Environment* 45, 3924-3936.

29 Miranda, A., Silveira, C., Ferreira, J., Monteiro, A., Lopes, D., Relvas, H., Borrego, C., Roebeling, P., 2015. Current air quality plans in Europe designed to support air quality management policies. *Atmospheric Pollution Research* 6,434-443.

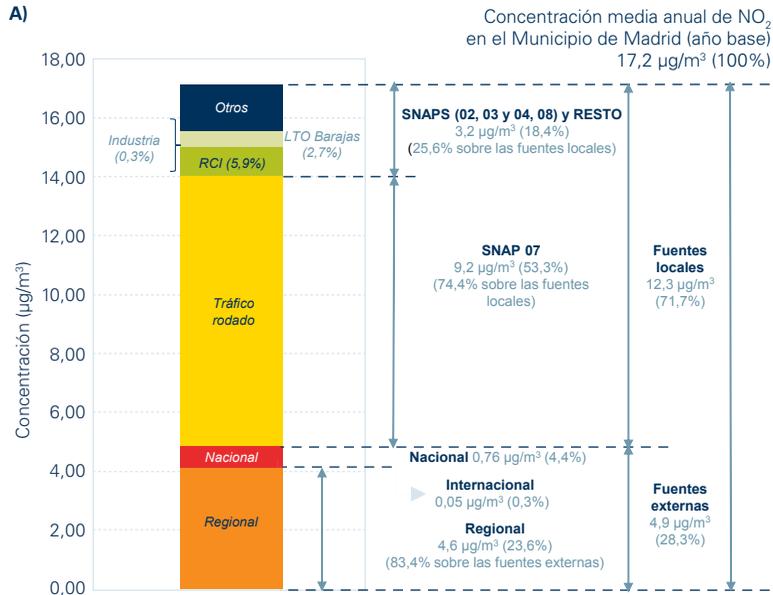
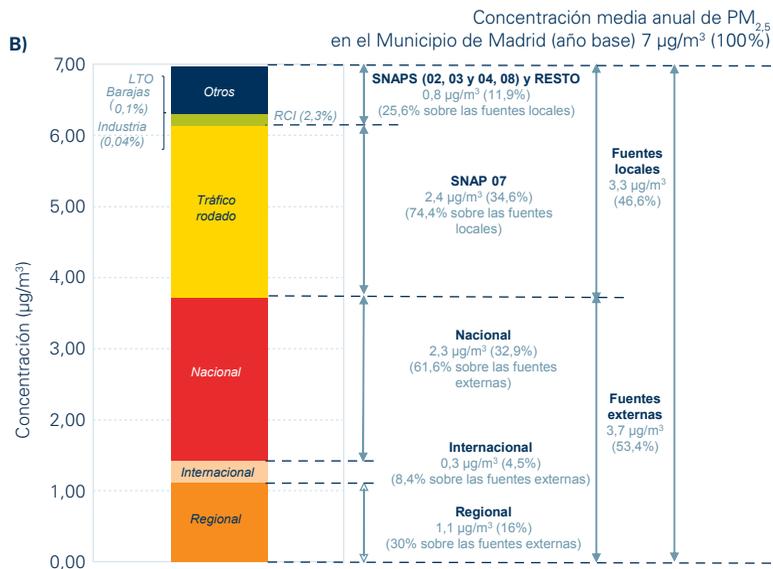


Figura 8

Análisis de contribución de fuentes en la concentración media anual de A) NO₂ y B) PM_{2,5} como media en el municipio de Madrid.

Fuente: Ayuntamiento de Madrid



- **Multiplicidad de escalas.** Las fuentes que producen los niveles de contaminación que se miden en un determinado punto son la combinación de muy diversos procesos y fuentes, situadas desde miles de kilómetros de distancia –fuentes industriales continentales o fuentes naturales del Norte de África, por ejemplo–, hasta pocos metros –por ejemplo, el tubo de escape de un vehículo circulando en el entorno.
- **Multiplicidad de fuentes.** No sólo los lugares de emisión son diversos, sino también el tipo de fuentes (tráfico, sectores residencial, comercial e institucional, industria, gestión de residuos, etc.). Sin embargo, el tráfico rodado es, en general, la principal contribución a los niveles de concentración, tanto por el gran volumen de emisiones que supone, como porque se emite a nivel del suelo y, por tanto, está más cerca de la altura de respiración de las personas, influyendo directamente en su salud.
- **Complejidad del sector “transporte rodado”.** A pesar de su gran influencia en los niveles de concentración de contaminantes, no es fácil modelizar el comportamiento de las emisiones del transporte rodado, puesto que un mismo vehículo puede producir emisiones sustancialmente distintas en función de factores como el estilo de conducción, la velocidad de movimiento, el estado de la vía o el nivel de congestión en cada momento, además de la antigüedad y mantenimiento del mismo. Por tanto, las estimaciones de emisiones del tráfico a nivel de calle pasan por determinar el comportamiento de

cada vehículo individualmente, fundamentalmente a través de modelos de simulación de tráfico a micro-escala, con la dificultad que esto conlleva. Para algunos contaminantes, como el material particulado, se deben estimar también otras emisiones que no se producen a través del tubo de escape, en particular las procedentes del desgaste de frenos y neumáticos, y la de la abrasión del pavimento y resuspensión, más aun teniendo en cuenta que se estima que en 2020 supondrán el 90% de las del transporte rodado en Europa³⁰.

- **Elevados gradientes espaciotemporales.** La influencia de los factores locales asociada a la presencia de edificios y otros obstáculos artificiales, a la circulación del viento y a la heterogeneidad de las fuentes, se traduce en diferencias de concentración en torno a un punto determinado, que puede llegar a ser hasta del 50% en un radio de 5-10 m de distancia para contaminantes como el NO₂.
- **Influencia de las condiciones meteorológicas.** A igualdad de emisión, algunas condiciones meteorológicas pueden dificultar la ventilación en la ciudad y conllevar la remanencia de contaminantes, produciéndose los denominados episodios de elevada contaminación. En estas condiciones, cuando se han alcanzado elevados niveles y no hay ventilación, la efectividad de las medidas para mejorar los niveles es muy limitada.

En resumen, a la hora de plantear las medidas necesarias para mejorar la calidad del aire,

30 Rexis M., Hausberger S., 2009. Trends of vehicle emission levels until 2020 – prognosis based on current vehicle measurements and future emission legislation, Atmospheric Environment 43, 4689-4698.

hay que tener en cuenta las limitaciones que se derivan de los factores mencionados en los párrafos anteriores. Además, dada la gran variedad de soluciones tecnológicas y no tecnológicas disponibles, es importante establecer unos criterios a la hora de priorizar las medidas que se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire urbana. Por ello, lo que se va a hacer a continuación es, en primer lugar, definir los criterios de priorización para, después, hacer una valoración general en base a los mismos de una lista de medidas que se presentarán en orden de prioridad de acuerdo con dichos criterios. Debe entenderse que esta lista no es exhaustiva y que la priorización no está basada en una metodología objetiva contrastable, sino fundamentalmente en referencias previas y en la experiencia de los autores.

¿Cuáles son los criterios de priorización a considerar para evaluar estrategias de actuación?

Los criterios que se proponen para priorizar el conjunto de medidas disponibles son:

- **Relevancia.** Con carácter general, este criterio refleja la mejora potencial de la medida, lo que está relacionado con la importancia de la fuente

sobre la que se actúa en los niveles de emisión y concentración de los principales compuestos de interés, independientemente de otras consideraciones.

- **Coste-efectividad.** Es deseable que las medidas tengan una relación elevada entre el potencial de reducción de emisiones y el coste de implementación. En última instancia, lo que se busca es la efectividad en términos de reducción de los niveles de concentración, pero dadas las dificultades de concretar este aspecto, la valoración puede realizarse en términos de emisiones.

Algunos trabajos relacionados con las medidas de mitigación del cambio climático³¹, muestran una gran diferencia en el coste de implementación por tonelada de CO₂ reducido para el abanico de medidas disponible. Es importante entender que el modo de evaluar las medidas depende de su objetivo y la escala espacio-temporal asociada al contaminante en cuestión. Por ejemplo, este estudio revelaba la existencia de medidas que podrían llegar a tener costes negativos, ya que ahorran otros costes, como los asociados al consumo energético –como la sustitución de bombillas tradicionales por LED, que conlleva un ahorro sustancial de electricidad que supone un ahorro neto de costes en su vida útil. Éste análisis a lo largo del ciclo de vida podría ser relevante también en términos de emisiones para evaluar el efecto global de una determinada medida, por supuesto para gases de efecto invernadero, pero también para los principales contaminantes urbanos.

31 McKinsey, 2013. Pathways to a Low-Carbon Economy. Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/pathways-to-a-low-carbon-economy>

- **Independencia de capital.** La experiencia demuestra que muchas de las medidas que son muy efectivas no se llegan a implementar por la elevada inversión que suponen, y la consiguiente dificultad de encontrar la financiación correspondiente. Por eso, se propone el criterio de relación entre el potencial de mitigación y la necesidad de inversión. Así, por ejemplo, la sustitución de un vehículo de combustión por otro eléctrico puede ser efectiva, pero requiere una inversión sustancial, la cual puede no ser viable para un elevado número de ciudadanos. En este criterio se ha considerado, por tanto, la necesidad de capital, tanto para la administración pública encargada de la implementación, como para los ciudadanos o empresas responsables de aplicar la medida. Por ejemplo, en la limitación de emisiones a los taxis, se tiene en cuenta tanto la necesidad de movilizar capital de la administración para dar ayudas a la renovación de la flota como la de inversión del propietario del taxi.
- **Implementabilidad.** Otros motivos de no implementación de las medidas coste-efectivas son el rechazo de los ciudadanos a modificar sus hábitos, la necesidad de cambiar la regulación, la falta de incentivos, etc. Bajo este criterio se incluyen, por tanto, todos esos factores que dificultan la adopción de medidas y que no son directamente de índole económica.
- **Co-beneficios.** Este criterio se centra en las medidas para mejorar la calidad del aire urbano, muchas de las cuales, como se ha comentado anteriormente, pueden implicar co-beneficios sobre otros problemas (principalmente, el cambio climático). Este criterio

incorpora dicho factor en la decisión. Así, la medida será más prioritaria en cuanto produzca co-beneficios sobre la lucha contra el cambio climático. En este sentido, son particularmente interesantes las que afectan a los denominados SLCP (short-lived climate pollutants), es decir, sustancias que afectan negativamente a la salud y al clima y que, asimismo, ofrecen una rápida respuesta del sistema dado su corto tiempo de vida en la atmósfera en relación a los principales gases de efecto invernadero (GEI); en este sentido, destacan el carbono negro (black carbon, BC) y el O₃ troposférico. En el caso de producir un impacto negativo en el cambio climático (por ejemplo, la reducción del uso de biomasa en las viviendas podría conllevar un aumento del consumo de combustibles fósiles y el consiguiente aumento de las emisiones de GEI), este criterio penaliza ligeramente esa medida.

- **Simplicidad.** Hay muchos trabajos académicos que muestran la importancia de implementar medidas sencillas, que sean fácilmente aceptadas y adoptadas por la población³².

¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire?

Este apartado contiene una lista de medidas potenciales para mejorar la calidad del aire (ver figura 9), ordenadas conforme a los criterios de

32 Weitzman, M.L., 2017. On a World Climate Assembly and the Social Cost of Carbon. *Economica* 84, 559-586.

priorización mostrados en el apartado anterior y teniendo en cuenta las características de España. Es decir, para la valoración se han tenido en cuenta aspectos específicos que influyen en la efectividad de las medidas como, por ejemplo, el clima. Se incluye, además, una columna donde figura el principal contaminante sobre el que cada medida tiene efecto en términos de reducción de emisiones (NOx, PM o COVs NM). Sin embargo, no se ha realizado un análisis exhaustivo ni se ha seguido una metodología de decisión multicriterio con una ponderación establecida. Por tanto, sólo pretende ser una priorización ilustrativa para que tenga algo más de valor añadido que el simple listado

de soluciones existentes. Tampoco se ha considerado el ciclo de vida completo de la tecnología, lo cual debería hacerse para no circunscribir los problemas únicamente al ámbito en donde se consumen los bienes y servicios, si bien esto requeriría un estudio específico para cada tecnología que está fuera del alcance de esta publicación. En capítulos posteriores se pueden obtener detalles sobre algunas de estas medidas y su eficiencia. El catálogo y valoración de las medidas se proponen como resultado del trabajo en los últimos quince años de los autores y la revisión de la bibliografía existente³³ para las medidas de reducción de PM.

Figura 9

Medidas potenciales para mejorar la calidad del aire ordenadas conforme a los criterios de priorización expuestos en el capítulo teniendo en cuenta las características de España.

Se incluye una columna donde figura el principal contaminante sobre el que cada medida tiene efecto en términos de reducción de emisiones (NOx, PM oCOVsNM). Los colores verde y rojo se utilizan para resaltar aspectos positivos y negativos respectivamente.

Medida	Relevancia	Coste-efectividad	Independencia de capital	Implementabilidad	Co-beneficios	Simplicidad	Prioridad	Contaminantes
Colaboración con otras administraciones	Alta	Alta	Alta	Baja	Medios	Alta	Alta	TODOS
Sensibilización ciudadana	Alta	Media	Media	Media	Altos	Media	Alta	TODOS
Limitación del tráfico de vehículos pesados en las ciudades	Alta	Alta	Alta	Baja	Medios	Media	Alta	NOx y PM
Gestión energética en edificios e instalaciones municipales	Alta	Media	Media	Media	Medios	Media	Alta	NOx y PM

Medida	Relevancia	Coste-efectividad	Independencia de capital	Implementabilidad	Co-beneficios	Simplicidad	Prioridad	Contaminantes
Planes de movilidad laboral sostenible	Media	Media	Alta	Media	Altos	Media	Alta	NOx y PM
Mejora del transporte público	Alta	Media	Baja	Media	Medios	Media	Alta	NOx
Regulación del aparcamiento con criterios de calidad del aire	Alta	Media	Media	Media	Bajos	Media	Alta	NOx
Baldeo de calles	Media	Media	Media	Alta	Bajos	Alta	Alta	PM
Compra de vehículos eléctricos, híbridos y de gas natural	Media	Media	Baja	Alta	Altos	Media	Alta	NOx
Red de recarga para vehículos eléctricos y suministro de combustibles alternativos	Media	Media	Baja	Media	Altos	Alta	Media	NOx
Reducción de la generación de residuos	Media	Media	Media	Media	Altos	Media	Media	NOx y PM
Red de aparcamientos intermodales en la corona metropolitana	Alta	Media	Baja	Baja	Medios	Alta	Media	NOx
Mejores técnicas disponibles en las industrias	Alta	Media	Baja	Media	Medios	Baja	Media	NOx y PM
Iniciativas de movilidad compartida	Media	Media	Media	Media	Altos	Media	Media	NOx y PM
Criterios de sostenibilidad en la contratación municipal	Media	Alta	Media	Media	Medios	Media	Media	NOx y PM
Limitación de la velocidad en determinadas vías	Media	Media	Alta	Media	Medios	Media	Media	NOx
Servicio del taxi con criterios ambientales	Media	Alta	Media	Baja	Altos	Media	Media	NOx y PM
Buenas prácticas en la operación del dispositivo de combustión de biomasa	Media	Alta	Media	Media	Medios	Baja	Media	PM
Priorización de la movilidad peatonal	Media	Baja	Media	Media	Medios	Alta	Media	NOx y PM
Incentivos para transformación de taxis a vehículos de bajas emisiones	Media	Media	Media	Media	Medios	Media	Media	NOx

Medida	Relevancia	Coste-efectividad	Independencia de capital	Implementabilidad	Co-beneficios	Simplicidad	Prioridad	Contaminantes
Optimización de la gestión de las reservas de carga y descarga en la vía pública para la distribución urbana de mercancías	Media	Media	Alta	Media	Medios	Baja	Media	NOx y PM
Zona de bajas emisiones con peaje	Alta	Alta	Baja	Baja	Medios	Baja	Media	NOx y PM
Sistemas de climatización eficiente de bajas emisiones	Alta	Media	Baja	Baja	Medios	Baja	Media	NOx y PM
Reducción precio transporte público	Media	Baja	Alta	Baja	Medios	Alta	Media	NOx y PM
Buenas prácticas en la manipulación y almacenamiento de graneles sólidos en instalaciones portuarias	Media	Media	Media	Media	Bajos	Media	Media	PM
Pinturas de pavimento sin disolventes	Media	Media	Media	Media	Bajos	Media	Media	COV
Regulación emisiones en el sector de la automoción	Alta	Baja	Baja	Baja	Altos	Baja	Media	TODOS
Obligación de parada de motor durante estacionamiento	Baja	Alta	Alta	Baja	Altos	Media	Media	PM
Infraestructuras reservadas para transporte público, vehículos de alta ocupación y bajas emisiones	Media	Media	Baja	Baja	Medios	Alta	Media	NOx
Limitación de emisiones a los vehículos de distribución urbana de mercancías	Media	Media	Media	Baja	Medios	Media	Media	NOx y PM
Regulación para evitar uso de sistemas de combustión de biomasa altamente emisores	Media	Alta	Alta	Baja	Negativos	Media	Media	PM
Lavado de camiones en obra	Baja	Media	Alta	Media	Bajos	Alta	Media	PM
Cobertura compartimento de carga en camiones	Baja	Alta	Media	Media	Bajos	Alta	Media	PM

Medida	Relevancia	Coste-efectividad	Independencia de capital	Implementabilidad	Co-beneficios	Simplicidad	Prioridad	Contaminantes
Mejora del mantenimiento del pavimento	Baja	Media	Media	Media	Medios	Alta	Media	PM
Reducción de emisiones en la gestión de residuos	Media	Media	Baja	Media	Bajos	Media	Media	NOx y PM
Aplicación al pavimento de líquidos aglomerantes anti-resuspensión	Media	Baja	Media	Media	Bajos	Media	Media	PM
Desincentivos para el uso de vehículos de gasóleo	Media	Media	Media	Baja	Bajos	Media	Media	NOx
Colaboración público-privada para la innovación y eficiencia en los procesos logísticos urbanos	Media	Media	Media	Baja	Medios	Baja	Media	NOx y PM
Aumento de los controles de emisión en ITV	Media	Media	Media	Baja	Bajos	Media	Media	NOx
Compra de flotas de servicios municipales de bajas emisiones	Baja	Media	Baja	Media	Medios	Alta	Media	NOx
Mejora y ampliación de la red y la movilidad ciclista	Baja	Baja	Media	Media	Medios	Alta	Media	NOx y PM
Retroadaptación de vehículos	Media	Media	Baja	Media	Negativos	Media	Media	PM
Renovación flota de autobuses	Media	Baja	Baja	Media	Bajos	Media	Media	NOx
Implementación/mejora de sistemas de bicicleta pública	Baja	Baja	Media	Media	Medios	Alta	Media	NOx y PM
Reducción de la altura máxima de carga de camiones	Baja	Baja	Alta	Media	Bajos	Alta	Media	PM
Proyectos de redes de calor y frío de alta eficiencia	Media	Media	Baja	Baja	Altos	Baja	Media	NOx y PM
Sistemas de certificación para el uso de biomasa con menores emisiones (combustión residencial)	Media	Alta	Media	Baja	Negativos	Baja	Baja	PM
Pavimentos anti-contaminación	Baja	Baja	Baja	Media	Bajos	Media	Baja	PM

¿Cuáles son los principales retos futuros?

- 1.** Dado que la transición energética que se prevé a nivel mundial conlleva un cambio drástico en el sistema de generación de energía –eléctrica, calorífica en los edificios y cinética en el transporte–, es altamente probable que a mediados de siglo la mayoría del transporte y la generación de calor sea a través de energía eléctrica. Por supuesto, además de garantizar que las fuentes renovables ganen protagonismo en la producción de dicha energía, el reto estará, a partir de entonces, en el control de las emisiones que no son del tubo de escape –por ejemplo, desgaste de frenos y neumáticos, abrasión del pavimento o resuspensión–, puesto que los vehículos eléctricos seguirán produciéndolas, incluso en mayor cantidad en algunos casos, al tener un peso superior al de los de combustión.
- 2.** Hasta que se alcance la completa electrificación, sigue siendo un reto reducir las emisiones, fundamentalmente del tráfico. Para ello, es imprescindible involucrar a la población con el fin de disminuir la movilidad motorizada y avanzar en la progresiva sustitución del vehículo convencional.
- 3.** Los sectores residencial, comercial e institucional tienen importantes consumos energéticos y emisiones atmosféricas asociadas, tanto directas como indirectas, por lo que la utilización de estándares de eficiencia energética más rigurosos en la edificación es esencial. No obstante, el mayor reto está en la remodelación y acondicionamiento del parque de viviendas existente, que constituye la mayor parte de las ciudades actuales. La penetración de tecnologías más eficientes para el acondicionamiento térmico, como las calderas de condensación o las bombas de calor, también puede tener un impacto fundamental. De nuevo es esencial que todos los consumos eléctricos asociados se basen en una producción renovable.
- 4.** En el resto de sectores, constituye un reto tener una visión global de las oportunidades y los efectos combinados con los distintos problemas ambientales. Así, por ejemplo, el uso de biomasa en el sector residencial puede ser considerado un beneficio ambiental desde el punto de vista de la lucha contra el cambio climático –hasta incluso llegar a ser la única alternativa para alcanzar los mejores niveles de certificación–, pero puede reducir significativamente la calidad del aire, como ha ocurrido en muchas ciudades europeas. Por tanto, antes de tomar medidas de reducción de emisiones, hay que considerar los diversos impactos ambientales.
- 5.** En el periodo transitorio, también es imprescindible gestionar las situaciones que generan un mayor impacto en la salud de la población, como son los episodios de elevada contaminación. Dichos episodios pueden producirse por una acumulación de la concentración de contaminantes, tanto por condiciones meteorológicas desfavorables como por contribuciones elevadas de fuentes externas (polvo de Sáhara o productos de la combustión incontrolada de la biomasa e incendios, fundamentalmente). En dichos casos, se ha de considerar el carácter puntual de la situación y que las causas específicas de la alta concentración

son de tipo meteorológico –escasa ventilación o llegada de contaminación del exterior. Sin embargo, dada la emergencia de la situación, es necesario asumir la implantación de medidas extraordinarias que mejoren, en la medida de lo posible, la situación, y que reduzcan la exposición de la población a los elevados niveles de contaminación. Además, es importante aprovechar estas ocasiones como ventanas de oportunidad para concienciar a los ciudadanos sobre la problemática de la calidad del aire y que éstos puedan probar alternativas reales de movilidad.

6. El último reto está relacionado con la responsabilidad en la acción. Estamos acostumbrados a querer que los políticos nos resuelvan los problemas. Sin embargo, no basta con que éstos decidan aplicar todas las medidas propuestas. Este es un problema común ligado a un bien público, y todos los ciudadanos tenemos el derecho y la responsabilidad de contribuir a su solución. Más allá de la responsabilidad de empresas y administraciones, los ciudadanos jugamos también un papel esencial.

La primera forma de contribuir puede ser la reflexión sobre nuestro estilo de vida y sobre las acciones que podemos llevar a cabo para construir ese bien común que es la salud pública. Así, la racionalización del uso del vehículo privado es, en muchas ocasiones, una decisión personal. Estas conductas, además, basadas en una mayor sensibilización y valoración de los aspectos ambientales, influyen en las agendas políticas las cuales, a su vez, condicionan los aspectos legislativos y socioeconómicos necesarios para que los modelos urbanos de nuestra sociedad evolucionen, y lo hagan en

consonancia a las necesidades acuciantes de limitar las emisiones de contaminantes atmosféricos y reducir los graves efectos que éstos tienen sobre el planeta y el bienestar de sus habitantes.

Por último, también como ciudadanos podemos participar en el debate público. Quizá se pueden organizar consultas donde haya una comunicación bidireccional; desde los ayuntamientos y la comunidad científica informando, y desde la ciudadanía consultando y aportando posibles soluciones. Esto, como casi todo, requiere dedicar recursos económicos, humanos y temporales. Así, quizá no resolvamos el problema de la contaminación a corto plazo, pero sí seremos capaces de abordarlo conjuntamente, y ofrecer alternativas que hagan de las ciudades unos lugares más saludables.

¿Hacia dónde se debe avanzar para mejorar la calidad del aire en España?

La calidad del aire en España está mejorando, pero aún existen problemas, fundamentalmente en zonas urbanas. Para poder abordarlos, es necesario desarrollar inventarios de emisiones y estudios de simulación que identifiquen las principales fuentes de emisión en cada ciudad. Además, es necesario avanzar no sólo en la caracterización de las emisiones sino, también, en la contribución de las fuentes en términos de calidad del aire (niveles de concentración

en el aire ambiente). Para ello, hay que aplicar metodologías específicas para cada contaminante.

La mejora de la calidad del aire en entornos urbanos es esencial para reducir los impactos negativos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana, puesto que es donde se concentra la mayor concentración de contaminantes y de población expuesta, y porque las principales fuentes de emisión se encuentran en la cercanía de la población que recibe los impactos.

En general, y en las ciudades españolas en particular, el tráfico rodado es la fuente con mayor contribución a las emisiones de contaminantes atmosféricos y a la calidad del aire, tanto en términos de NO_x como PM. Por tanto, las medidas de mejora deben tener como prioridad principal la reducción del tráfico motorizado en las ciudades.

Sin embargo, las opciones de mejora deben estudiarse específicamente para ajustarse a las peculiaridades de cada entorno y momento. Para ello, se han de analizar factores como el margen de mejora o impacto potencial de la medida, su relación coste-efectividad, la necesidad de inversión, la implementabilidad, los co-beneficios y la simplicidad de las propuestas. Así, hay medidas que serían aplicables de forma general en las ciudades españolas con una elevada probabilidad de alcanzar el objetivo de mejora de la calidad del aire a un coste razonable. Estas medidas son las siguientes:

- Colaboración con otras administraciones.
- Acciones de sensibilización ciudadana.
- Planes de movilidad laboral sostenible.

- Promoción de la compra de vehículos eléctricos, híbridos, de gas natural y de hidrógeno.
- Mejora del transporte público.
- Regulación del aparcamiento con criterios de calidad del aire.
- Limitación del tráfico de vehículos pesados en las ciudades.
- Gestión energética en edificios e instalaciones municipales.

En el caso de querer tener un elevado efecto, pese a la dificultad de la implantación por problemas de potencial rechazo social, necesidades de inversión o dificultad de los instrumentos a implementar, destacan las siguientes medidas:

- Implementación de zona de bajas emisiones con peaje.
- Limitación de emisiones a los vehículos de distribución urbana de mercancías.
- Diversificación y/o electrificación de la flota de autobuses municipales y de las flotas cautivas de las administraciones públicas.

Además de las medidas destinadas a reducir emisiones directamente, también es importante incidir en la necesidad de seguir profundizando en el conocimiento de los fenómenos de emisión, evolución de contaminantes e impactos en la población de la contaminación atmosférica. Los proyectos de investigación en esta área pueden beneficiarse además de la proliferación de nuevas tecnologías a nivel de comunicación e infraestructuras en la ciudad para mejorar la efectividad de las medidas y la búsqueda de alternativas para minimizar la exposición y fomentar los estilos de vida más saludables y sostenibles.



Doctor Ingeniero Industrial y Catedrático de Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Madrid. Miembro del Grupo de Investigación en Seguridad e Impacto Medioambiental de Vehículos y Transportes del INSIA. Ha dirigido trabajos de investigación sobre procedimientos de medidas de emisiones en motores y vehículos.

Jesús Casanova Kindelán

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid (ETSII-UPM)

Las emisiones contaminantes de los vehículos

Preguntas clave del artículo

- ¿Qué tipos de vehículos están incluidos en las regulaciones de emisiones y qué contaminantes se consideran?
- ¿Cómo se regulan las emisiones de los vehículos a motor en Europa?
- ¿Cómo han evolucionado los valores límite de las emisiones?
- ¿Qué tecnologías de reducción de emisiones y tratamiento de los gases de escape se han introducido en los últimos años?
- ¿Cuáles son las posibles soluciones tecnológicas para reducir emisiones a corto y medio plazo?

Apunte inicial

Actualmente hay en España unos 31 millones de vehículos, lo que equivale a 491 por cada 1.000 habitantes, de los que 4,9 millones son vehículos industriales (490.000 camiones y 2,3 millones de furgonetas), 61.000 son autobuses y 22,9 millones son turismos (9,8 millones de gasolina y 13 millones diésel). La edad media es de unos 12 años³⁴.

Otros vehículos que pueden circular por las carreteras son los tractores agrícolas, de los que hay unos 210.000, y los vehículos especiales como barredoras y maquinaria de obras públicas, que hay unos 425.000, ambos también sometidos a regulaciones específicas sobre limitaciones en sus emisiones contaminantes.

¿Qué tipos de vehículos están incluidos en las regulaciones de emisiones y qué contaminantes se consideran?

Con objeto de reducir el impacto ambiental del transporte, las directivas y regulaciones europeas establecen las limitaciones de las emisiones contaminantes provenientes de los vehículos según su categoría (ver figura 1), y los procesos de homologación certifican el cumplimiento de las normas y regulaciones establecidas en las directivas.

Los denominados –vehículos ligeros– son los M1 y N1 y todos los L. Su homologación se realiza sobre el modelo de vehículo completo y sus emisiones por el tubo de escape se miden en un banco de rodillos en el que el vehículo completo se hace circular igual que si estuviera en carretera siguiendo un ciclo de conducción definido en la regulación que les afecte.

Sin embargo, en el caso de los camiones y autobuses –vehículos pesados– (M2, M3, N2 y N3), son las emisiones del motor las que se certifica que cumplen la regulación. Es decir, el motor se ensaya en un banco de pruebas de motores y queda homologado para ser instalado en camiones y autobuses diferentes.

En el caso de los tractores agrícolas y otros vehículos especiales, las emisiones se limitan por regulaciones específicas de motores para maquinaria no de carretera (Off-Road) diferentes a las de los vehículos de carretera.

³⁴ DGT. Tablas estadísticas de la Dirección General de Tráfico. Ministerio del Interior. <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>

TIPO	CATEGORÍA	CARACTERÍSTICAS	MODOS	CICLO
Turismos	M1	≤ 9 pasajeros		
Furgonetas	N1 CL1	≤ 1.305 kg	Banco rodillos	WHLC
	N1 CL2	1.305 - 1.760 kg		
	N1 CL3	1.760 - 3.500 kg		
Autobuses	M2	≤ 5.000 kg	Banco motor	WHSC y WHTC
	M3	> 5.000 kg		
Camiones	N2	3.500 - 12.000 kg		
	N3	> 12.000 kg		
Motocicletas	Ciclomotores	L1	Banco rodillos	ECE R47
	Motos 2 ruedas	L3, L4		WMTC
	Motos 3 ruedas	L5		
Quads (gasolina y diésel)	L6, L7	3 - 4 ruedas		WMTC, ECE R40 y R47

Figura 1

Clasificación de los vehículos de carretera en Europa y modo de ensayo de emisiones.

Clasificación establecida en la Unión Europea (UE) sobre categorías de vehículos de carretera, indicando el modo de ensayo de sus emisiones y el ciclo de ensayo en referencia a temas que se tratan en apartados posteriores.

Los vehículos automóviles emiten a la atmósfera productos contaminantes por tres vías:

- Evaporación de las fracciones más volátiles de los combustibles como la gasolina, el gas licuado de petróleo (GLP), los alcoholes o el gas natural (GN).
- Sustancias contenidas en los gases de escape que son indeseables en una combustión completa diferentes al dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua.
- Sólidos provenientes del desgaste de componentes del vehículo como pastillas y disco de freno, embrague y neumáticos. Actualmente, esta emisión no está regulada en ninguna parte del mundo.

Algunos gases contaminantes del gas de escape provienen de la combustión no completa, como el monóxido de carbono (CO) y los diversos hidrocarburos (HC), mientras que los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO₂) provienen de una buena combustión³⁵.

El metano (CH₄) emitido por el escape de los motores no se considera como contaminante en muchas normativas que solo limitan la emisión de HC sin incluir el CH₄, como los HC no metánicos (HCNM) o los gases orgánicos no-metánicos (GO-NM o COVs NM). El material particulado (PM) procede sobre todo del hollín y de algunos hidrocarburos líquidos. También podría emitirse dióxido de azufre (SO₂), plomo (Pb) u otros metales si el combustible los contuviera en su formulación, pero actualmente está limitado su contenido en los combustibles que pueden ser vendidos en las estaciones de servicio.

El CO₂ no es contaminante pero es un gas de efecto invernadero y aparece en la reacción de combustión de un hidrocarburo. Otros gases de efecto invernadero como el CH₄ o el anhídrido nitroso (N₂O) se emiten en los vehículos en cantidades tan pequeñas que su efecto es muy poco significativo.

A continuación se hace un breve resumen de los fenómenos que favorecen la aparición de los componentes indeseables en el gas de escape de los procesos de combustión.

- **Monóxido de carbono (CO).** Se genera por causas químicas en la reacción de combustión y postcombustión. Es la consecuencia de la falta de oxidación del carbono a CO₂ por lo que se emite en cantidades muy abundantes cuando la mezcla es rica (falta oxígeno). Pero también se emite en mezcla estequiométrica o pobre por la cinética lenta de la oxidación del CO al bajar la temperatura en la expansión de los gases y no alcanzarse el equilibrio químico de la reacción $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
- **Hidrocarburos (HC).** Los HC contenidos en un gas de escape son diversos y en buena parte corresponden a los del combustible por apagado de la llama o porque existen zonas de la cámara de combustión a los que la llama no puede llegar (resquicios). Las superficies de la cámara, los resquicios o las zonas de la pared excesivamente frías favorecen su aparición. Pero parte de estos HC pueden oxidarse parcialmente en las etapas posteriores del proceso. También pueden aparecer otros HC por fenómenos de degradación del combustible en zonas de alta temperatura sin oxígeno, sobre todo en motores diésel.
- **Óxidos de nitrógeno (NOx).** En los procesos de combustión a alta temperatura se forma NO por la reacción de equilibrio $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NO}$. Esta reacción es de cinética lenta en ambas direcciones, por lo que la concentración depende del tiempo de residencia de los gases a alta temperatura, pero también de su enfriamiento en la cámara. Por otra parte, la presencia de oxígeno es necesaria, por lo que los motores de gasolina con mezclas estequiométricas o ricas emiten menos NO que los diésel, que usan exceso de oxígeno en la combustión y tienen mayor temperatura de combustión. El NO se oxida posteriormente a NO₂ en la atmósfera. Pero cuando los gases que salen del motor contienen oxígeno, parte del NO se oxida a NO₂ en el propio sistema de escape, dando lugar a una mezcla de NO y NO₂ que se denomina NO_x. Por ello, la emisión de NO₂ por el escape es un problema asociado fundamentalmente a los motores diésel, y la presencia de un catalizador de oxidación en su sistema de escape agudiza aún más el problema.

- **Material particulado (PM).** El PM procedente del hollín se forma por nucleación en zonas de la cámara de combustión en las que haya combustible a alta temperatura en ausencia de oxígeno. Esto ocurre sobre todo en los motores diésel en la llama de difusión, y en menor intensidad en los motores de gasolina de mezcla estratificada (inyección directa). Las partículas inicialmente formadas de tamaño nanométrico van creciendo y juntándose con otras por aglomeración, y posteriormente, al bajar la temperatura en el escape, adsorben hidrocarburos de alto peso molecular condensados. El tamaño de las partículas se relaciona con el fenómeno de atomización del combustible, que depende de la presión de inyección y la viscosidad del combustible.

Las partículas líquidas que se emiten en los gases de escape provienen de la condensación de HC del combustible con temperatura de condensación superior a la del gas de escape. Por eso su concentración es mayor si el sistema de escape está frío.

¿Cómo se regulan las emisiones de los vehículos a motor en Europa?

En la Unión Europea no se limita el valor de emisión de CO₂, y se mide en la homologación de los vehículos ligeros pero no en los pesados. Este valor se usa para el etiquetado energético de los

vehículos junto con el consumo de combustible. Pero también se han establecido unos acuerdos europeos para que el valor medio de esta emisión en la flota vendida por cada fabricante no supere unos ciertos valores, con unas multas por incumplimiento al fabricante. En el año 2016 la media de emisión de los vehículos vendidos fue de 115,3 gCO₂/km algo menor que la media europea de 119,5 gCO₂/km, aunque se pretende llegar a un valor de 90 gCO₂/km en el año 2020³⁶. A la hora de establecer los controles de emisiones para los vehículos de carretera –y, en concreto, los vehículos ligeros que son sobre los que recae mayor número de controles–, existen los siguientes tipos de ensayos en su proceso de homologación:

- Emisiones de CO en vacío y de opacidad, medida indirecta del PM, en aceleración libre.
- Emisiones de gases y PM por el tubo de escape.
 - Emisiones urbanas y extraurbanas.
 - Emisiones con arranque a -7 °C.
 - Emisiones de CO₂ y consumo de combustible.
- Durabilidad de los sistemas anticontaminación.
- Control de la producción: vehículos de la cadena de montaje.
- Conformidad de los vehículos a lo largo de su vida útil.
- Emisiones por evaporación.
- Emisiones de gases del cárter.
- Inspección técnica periódica de vehículos en uso.

Toda la información relativa a los controles y límites de emisiones aparece repartida en un innumerable cantidad de directivas y

regulaciones de la Unión Europea, pero un resumen muy útil puede encontrarse en los dos documentos de Delphi³⁷.

Inicialmente se limitaba el CO en ralentí y las emisiones de CO, HC, NO_x solo para los turismos según su peso. Hasta los años 1990, el PM se limitaba por la limitación de la opacidad del humo de escape. A partir del año 1992, en que se establece el ciclo de homologación *New European Driving Cycle* (NEDC), los sucesivos valores límites se han ido denominando con el acrónimo Euro, del 1 hasta el 6 para los vehículos ligeros, y del I hasta el VI para los pesados.

La medida de estos límites en los ligeros se realiza con el vehículo rodando en un banco de rodillos en el que se ajustan las resistencias según su peso y resistencia aerodinámica para simular una conducción real. Las emisiones se miden por acumulación de toda la masa de cada contaminante emitida en el ciclo, una vez diluidas con aire limpio, y el resultado se da en gramos por kilómetro (g/km) recorrido en el ensayo. En los vehículos ligeros se seguía inicialmente un ciclo de conducción urbano, denominado ciclo Europa o ciclo ECE R15, que se realizaba con el motor precalentado, pero posteriormente las normas se fueron endureciendo y añadiendo una parte del ciclo en condiciones de tráfico extra-urbano (velocidad hasta 120 km/h), y más tarde midiendo las emisiones desde el arranque en frío (ver figura 2A).

El ciclo NEDC fue desarrollado en los años sesenta con vehículos y carreteras de la

época, por lo que reproduce una conducción bastante suave y no la realidad de la conducción actual, así como a las emisiones y el consumo real. Ello motivó hace ya más de 10 años a las autoridades europeas a estudiar una modificación sustancial del ciclo de conducción en el banco de rodillos y su aplicación a los vehículos, lo que dió lugar al ciclo *Worldwide Harmonized Lightduty Vehicle Test Cycle* (WLTC) desarrollado por el grupo UN ECE GRPE³⁸. Este ciclo forma parte del procedimiento *Worldwide Harmonized Lightduty vehicle Procedure* (WLTP) publicado como regulación técnica UNECE n°15³⁹, que incluye otros ensayos y procedimientos necesarios para homologar un vehículo. Se aplican ciclos diferentes según la relación peso en vacío/potencia máxima del vehículo: clase 2 (< 34), clase 3a (< 34 y v_{max} < 120 km/h) y clase 3b (v > 120 km/h) (ver figura 2B, que muestra el ciclo correspondiente a la clase 3b que es la más común en turismos). Los vehículos híbridos e híbridos enchufables se ensayan en sus diferentes modos de operación siguiendo un ciclo WLTP clase 3.

Desde la aplicación de la regulación Euro 6, se ha implantado la obligatoriedad de comprobar el cumplimiento de los límites de emisiones también en tráfico real urbano, carretera y autopista –denominada *Real Driving Emissions* (RDE)–, mediante el registro de las emisiones en tiempo real con equipos de medida de emisiones portátiles embarcados (ver figura 3). El post-procesamiento de los datos

37 Delphi. Worldwide Emissions Standards, Passenger Cars 2016/2017, 104 pp. <https://www.delphi.com/sites/default/files/inline-files/delphi-worldwide-emissions-standards-passenger-cars-light-duty-2016-7.pdf>

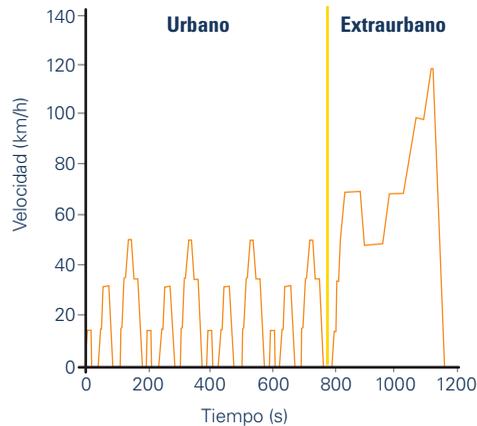
38 UNECE, 2012. "Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)"; ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2017/7.

39 UNECE, 2014. "Global technical regulation No. 15"; United Nations, ECE/TRANS/180/Add.15.

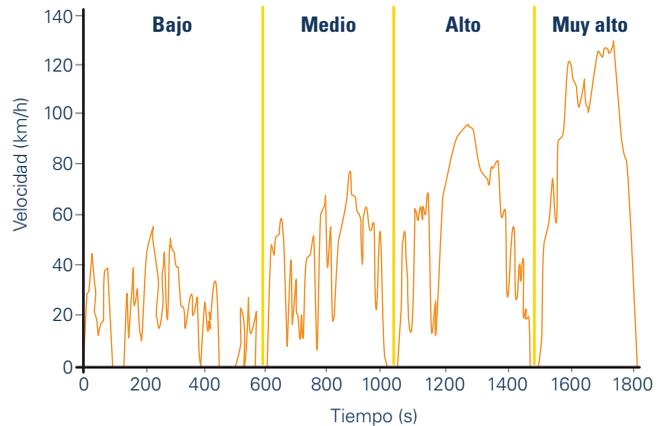
Figura 2

Ciclo NEDC y ciclo WLTC.

A) Ciclo NEDC.



B) Ciclo WLTC (Clase 3b).



instantáneos se hace mediante un cálculo basado en los datos de CO_2 del ensayo WLTC, dando como resultado los valores de g/km en tráfico real. Estos valores pueden ser superiores a los del banco de rodillos con un factor de 2,1, que se irá reduciendo sucesivamente hasta 1,0. La medida de la emisión de CO_2 , que no está actualmente limitada pero debe ser un dato disponible para etiquetar el vehículo, se mide en estos mismos ensayos, mientras que el consumo de combustible se calcula de las emisiones de CO_2 , CO y HC por el balance de carbonos.

Para las motocicletas y vehículos similares se usan actualmente varios tipos de ciclos, pero se trata de homogenizarlos todos al nuevo ciclo WMTC (*World Harmonized Motorcycle Test*

Cycle), parecido al WLTC de turismos.

Los límites de emisiones son distintos en cada tipo de vehículo (ver figura 4), habiendo sido siempre los turismos M1 a los que se les ha impuesto valores más pequeños. A las furgonetas se les asignan valores límite algo más altos para los tipos N2 y N3, y las motocicletas y similares tienen unos límites específicos algo más laxos que los de los turismos.

Los límites de emisiones se vinculaban inicialmente a la potencia y peso del vehículo, y se fueron reduciendo drásticamente hasta el año 1991: entre 1970 y 1985 bajaron un 50% en CO y un 53% en la suma HC + NO_x , y un 84% para el primero y un 78% para el segundo entre 1985 y 1991 (ver figura 5).



Figura 3

Vehículo sometido a un ensayo RDE.

FASE	FECHA	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Motor diésel						
Euro 1	07/1992	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2	01/1996	1,0	-	0,90	-	0,10
Euro 3	01/2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro 4	01/2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5	09/2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	09/2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005
Motor de gasolina						
Euro 1	07/1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	01/1996	2,2	-	0,50	-	-
Euro 3	01/2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro 4	01/2005	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro 5	09/2009	1,0	0	-	0,06	0,005
Euro 6	01/2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005

Figura 4

Evolución de los límites de emisiones de turismos desde 1991 (g/km).

Valores de límites desde el año 1992 hasta la actualidad. En algunos casos los límites se dan como suma de las emisiones de HC y de NO_x, asumiendo que, desde un punto de vista técnico, las soluciones para reducir de uno suelen provocar el aumento del otro. En todos los casos la reducción global es de 100 a 1 desde el año 1972.

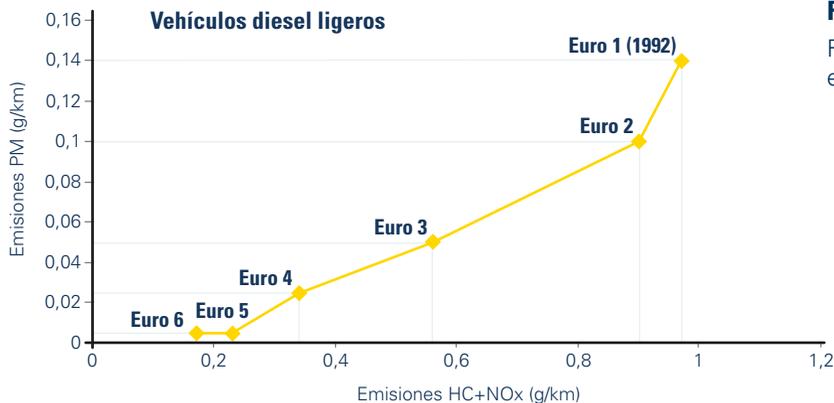
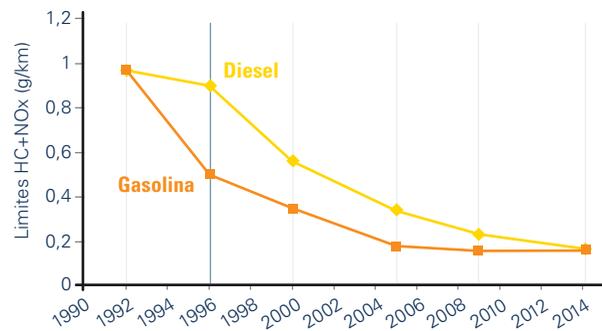
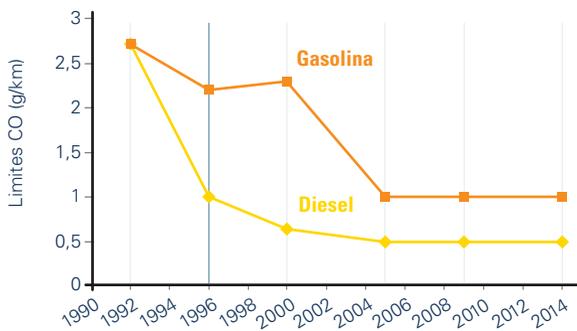


Figura 5

Reducción de límites de emisiones en turismo de gasolina y diésel.



¿Cómo han evolucionado los valores límite de las emisiones?

Es importante hacer notar que actualmente, con el papel decisivo de los sistemas de post-tratamiento en la reducción de emisiones, los minutos siguientes al arranque en frío tienen un

peso muy significativo en el valor total de los gramos emitidos (sobre todo de CO y HC), dado el tiempo que tardan en calentarse los sistemas catalíticos del escape.

Los vehículos ligeros, tipo motocicletas y cuadríciclos, tienen unos límites de emisiones algo menos exigentes que los turismos, pero diferentes según la categoría, estando en su nivel Euro 4. La nueva Euro 5 para estos vehículos aplicará en todos los casos

siguiendo el ciclo WMTC y en límites será similar a la de los turismos con los valores siguientes en mg/km:

- CO: 1.000 para los de gasolina y 500 para los diésel.
- HC: 100.
- NO_x: 69 para los de gasolina y 90 para los diésel.
- PM: 4,5 para los diésel, o gasolina de inyección directa.

En los vehículos pesados (camiones y autobuses), las medidas de homologación de las emisiones se ensayan en un banco de pruebas de motor siguiendo dos ciclos diferentes que han ido evolucionando a lo largo del tiempo: un ciclo estacionario –ESC: *European Steady-state Cycle*, y actualmente *World Heavy-duty Steady-state Cycle* (WHSC)–, y un ciclo dinámico –ETC: *European Transient Cycle*, y actualmente el *World Heavy-duty Transient Cycle* (WHTC).

El ciclo estacionario recorre 12 condiciones de par y régimen de giro del motor a lo largo de su curva de par motor-régimen de giro, y el ciclo transitorio reproduce una conducción de un camión en carretera con aceleraciones y deceleraciones consecutivas en el banco de pruebas, programado para provocar una inercia resistente. Las emisiones se miden también diluidas en bolsas o por integración, y el resultado se da en gramos por hora, emitidos en el ensayo por cada kilovatio de potencia promediada en el ciclo de medida (g/kWh, ver figura 6).

A los motores de los vehículos pesados también se les somete en homologación a una prueba de conformidad en uso mediante ensayos en un camión en tráfico real, siguiendo una

metodología de conducción y utilizando equipos portátiles embarcados que van registrando las emisiones en tiempo real. Se comprueba así que sus emisiones en g/kWh, promediadas de acuerdo a un complicado proceso de cálculo de los valores instantáneos y de la potencia estimada en cada momento, no superan los valores establecidos por la normativa.

En el caso de los vehículos especiales y los tractores agrícolas, existen también regulaciones europeas que limitan las emisiones de sus motores. Los límites de emisiones gaseosas y de partículas siguen de alguna manera a los de los motores de transporte por carretera, pero difieren en sus valores al ser distinto el ciclo del ensayo. A modo de ejemplo, los motores de tractores agrícolas se ensayan en un ciclo de 8 modos de funcionamiento a dos regímenes de giro, y los límites actuales establecidos para motores de potencia máxima entre 76 y 177 CV son, en g/kWh, de 5,0 para el CO, de 0,19 para los HC, de 0,4 para los NO_x de y 0,025 para el PM, valores éstos muy superiores a los de los motores de camiones y autobuses.

Tanto en los motores de los vehículos ligeros como en los de los pesados existe un procedimiento de control de la producción en las cadenas de montaje con objeto de controlar que todas las unidades producidas sean iguales a la que se utiliza en el proceso de homologación. Se realiza de manera estadística como un tipo de “control de calidad”.

Las emisiones de evaporación se controlan solo en los vehículos ligeros (turismos, furgonetas y motocicletas) que usan combustibles volátiles, y se miden introduciéndolos en una cámara sellada, denominada SHED, que va midiendo

FASE	FECHA	CICLO	CO	HC	NOx	PM	HUMO	
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49, ESC, WHSC	4,5	1,1	8,0	0,612	--	
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36	--	
Euro II	10/1996		4,0	1,1	7,0	0,25	--	
	10/1998		4,0	1,1	7,0	0,15	--	
Euro III	10/2000		2,1	0,66	5,0	0,10	0,8	
Euro IV	10/2005		1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	
Euro V	10/2008		1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	
Euro VI	10/2013		1,5	0,13	0,4	0,01	--	
			CO	NMHC	NOx	PM	CH ₄	
Euro III	10/2000		ETC, WHTC	5,45	0,78	5,0	0,16	1,6
Euro IV	10/2005	4,0		0,55	3,5	0,03	1,1	
Euro V	10/2008	4,0		0,55	2,0	0,03	1,1	
Euro VI	01/2013	4,0		0,16	0,4	0,01	0,5	

Evolución de los límites de emisiones de los motores de los vehículos pesados desde que existe tal limitación. PM indica la medida de partículas en masa y Humo como opacidad del gas de escape en m⁻¹.

Figura 6

Evolución de los límites de emisiones de vehículos pesados (g/kWh).

el contenido de HC en el ambiente. Se realizan dos tipos de ensayos:

- Emisión de HC al parar del motor en caliente tras un ciclo de conducción.
- Emisión del tanque de combustible a lo largo de 24 horas con temperaturas exteriores de hasta 35°C.

El valor máximo que se puede emitir en la suma de los dos ensayos es, actualmente en Europa, de 2 gramos.

En resumen, cabe decir que los vehículos ligeros y los vehículos pesados tienen unos límites de emisiones muy diferentes y difícilmente comparables. En las regulaciones actuales para

los ligeros el valor límite trata de simular lo que se emitiría en la realidad por cada kilómetro recorrido, por lo que a mayor distancia recorrida mayor masa emitida. Los límites actuales para los turismos son los más bajos, pero algo mayores para las furgonetas de más de 1.300 kg de masa máxima autorizada (MMA) y también para las motocicletas. En cambio, en el caso de los vehículos pesados, al limitarse los g/kWh, a mayor potencia entregada por el motor –por ser el vehículo más pesado o por transportar más carga o más pasajeros–, mayor es la emisión en masa de cada contaminante a la atmósfera; o, dicho de otro modo, emitirá mayor masa de contaminante por kilómetro recorrido.

¿Qué tecnologías de reducción de emisiones y tratamiento de los gases de escape se han introducido en los últimos años?

Para conseguir las importantes reducciones de emisiones de los vehículos actuales frente a los de hace 20 o 30 años, ha sido necesario ir introduciendo tecnologías muy diversas en el diseño del motor y sus sistemas de formación de la mezcla y combustión, así como en la programación de las unidades de control electrónica que gestionan todas las funciones del motor en tiempo real.

Pero las limitaciones impuestas a los vehículos han llevado a los fabricantes de vehículos a tener que añadir sistemas de tratamiento de los gases de escape para reducir la concentración de las emisiones una vez que dichos gases han salido del motor y antes de que salgan por el tubo de escape a la atmósfera (ver figura 7). Ejemplo de los órdenes de magnitud de las masas de cada contaminante emitidas por un motor diésel de camión en un ciclo de conducción por cada litro de gasóleo, y las que serían necesarias para cumplir las reglamentaciones en Europa. Actualmente, los sistemas de post-tratamiento de un motor de camión tienen un coste que es del mismo orden de magnitud que el del propio motor.

Tecnologías del motor que han evolucionado para reducir las emisiones

La optimización de la geometría de la cámara de combustión ha dado lugar a cámaras con formas compactas en motores de gasolina que controlan la emisión de HC, y cámaras talladas en el pistón en motores diésel con geometrías adecuadas que controlan las emisiones de hollín (PM) y HC.

Los sistemas de inyección de gasóleo de muy alta presión en los motores diésel (actualmente por encima de 2.000 bar), con un control electrónico muy preciso como en los actuales sistemas *common rail*, ha contribuido significativamente a reducir las emisiones de PM, aunque ha agudizado en parte el problema de la emisión de PM muy fino.

El control del aire admitido en el motor es importante para mantener la relación aire/combustible dentro de los valores razonables para no elevar las emisiones de CO, HC y PM. En motores con turbo, el control del paso variable o los sistemas con doble turbo secuencial son algunas de las soluciones actuales en motores diésel.

Los sistemas de recirculación de gases de escape (*Exhaust Gas Recirculation*, EGR) son una excelente solución para reducir la emisión de NO_x al bajar la temperatura de combustión, tanto en motores de gasolina como diésel, pero puede producir problemas por el aumento de las emisiones de PM e HC que hay que controlar por otros medios (ver figura 8).

La gestión adecuada y precisa del punto de encendido en los motores de gasolina, y la del punto y la ley de inyección en los motores diésel, se utiliza para controlar la temperatura

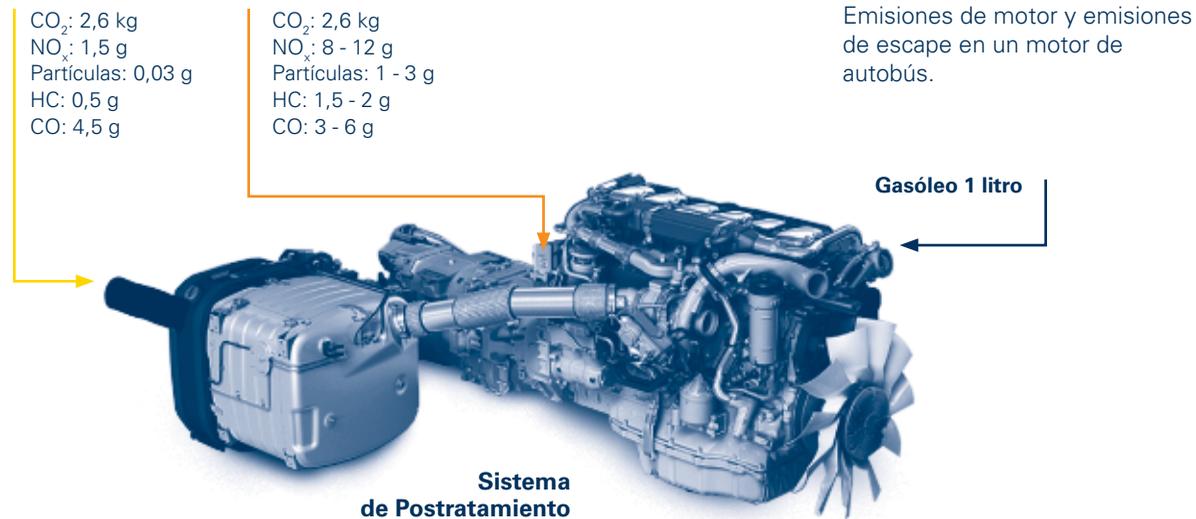


Figura 7

Emisiones de motor y emisiones de escape en un motor de autobús.

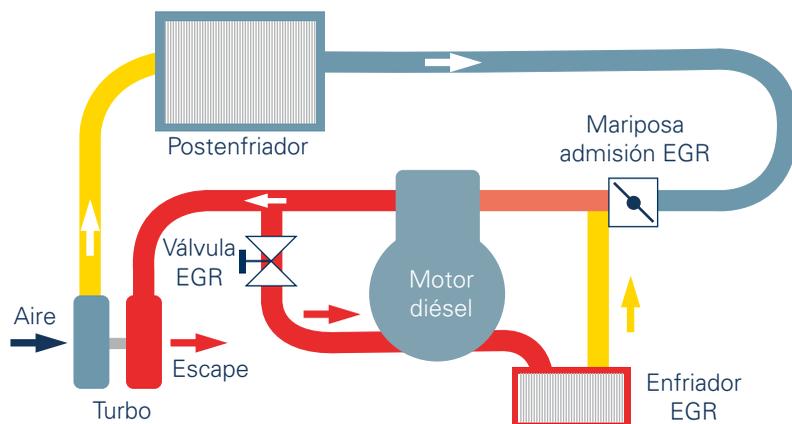


Figura 8

Sistema de recirculación de gases de escape EGR en un motor turbo-diésel.

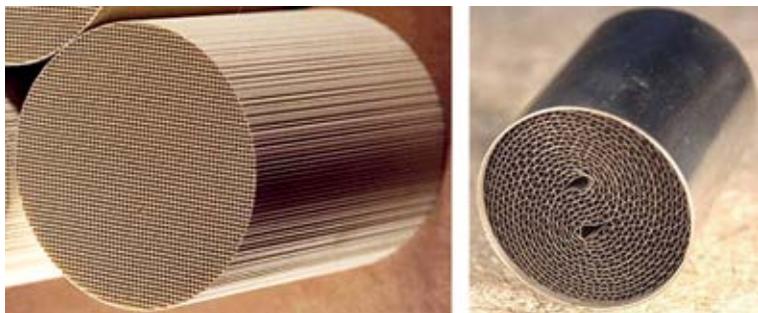


Figura 9

Monolito de catalizador cerámico y metálico.

Monolito cerámico y uno metálico. Los metálicos son más costosos pero tienen periodos de calentamiento mucho más rápidos, lo cual es importante, ya que la actividad del catalizador no suele comenzar hasta que se alcanzan temperaturas de la superficie interior entre 250 y 300 °C.

y los tiempos de la combustión, reduciendo de este modo las emisiones de NO_x , CO e HC. La gestión adecuada del arranque en frío y el calentamiento inicial del motor hasta su temperatura normal de funcionamiento, sobre todo en los vehículos ligeros, también ha evolucionado mucho en los últimos años para reducir las emisiones de CO e HC.

Sistemas de postratamiento de los gases de escape

Los sistemas de postratamiento de los gases de escape se basan en convertidores catalíticos con diversas funciones de activación de reacciones químicas, y en filtros para retener el PM (ver figura 9).

Los convertidores catalíticos o catalizadores tratan de activar ciertas reacciones químicas en los gases de escape pasándolos por uno o varios monolitos que contienen muchos conductos de pequeño diámetro, en cuya superficie interior se depositan metales o compuestos que hacen la función de catalizadores de dichas reacciones químicas. Su

longitud debe ser tal que el tiempo de residencia de los gases en contacto con el catalizador sea el suficiente para completar la reacción química. Contienen sustancias catalizadoras entre 0,1 y 0,15% del peso del sustrato.

El éxito de la reducción de la concentración de cada producto contaminante, que el sistema de post-tratamiento aporta, se valora por su rendimiento en tanto por ciento, entendido como porcentaje de masa de cada contaminante que es eliminado del gas de escape en el sistema.

Catalizadores de oxidación

Tienen por objeto acelerar las reacciones de oxidación del CO y los HC: $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ y $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. La actuación de los catalizadores de oxidación sobre la reducción de NO_x en gases que contiene oxígeno es insignificante, pero favorecen la oxidación del NO a NO_2 . El problema es que por debajo de 200 °C el rendimiento del catalizador en la conversión de CO y HC es muy bajo.

Se usan en motores diésel debido al contenido de oxígeno en el gas de escape en dichos

motores. Normalmente, se colocan a la salida del motor, donde las temperaturas son entre 100 y 550 °C. Se desactivan por la conversión del SO₂ a SO₃ que se acumula en el catalizador, por lo que se ha implantado el uso de combustibles de muy bajo contenido en azufre (S). La presencia de este catalizador favorece la conversión de NO a NO₂ en el escape de los motores diésel, por lo que en los últimos años se han reducido las emisiones de NO_x pero no las de NO₂ en la misma proporción.

Catalizadores de reducción

Para que un catalizador pueda acelerar la reacción de reducción de los NO_x es necesario que el gas de escape no contenga oxígeno, mientras que la presencia de CO, HC y H₂ en el gas de una mezcla rica sí favorece dicha reacción.

En esencia, un catalizador de platino (Pt) o de paladio (Pd) puede comportarse como de oxidación o de reducción según el contenido de oxígeno en el gas de escape; es decir, según el dosificado de la mezcla en el proceso de combustión.

Se han estudiado también catalizadores de reducción en mezclas pobres con diversas sustancias catalíticas en base a reacciones químicas entre el NO_x y los HC, pero su rendimiento depende mucho del material catalizador y de la relación HC/NO_x. Su temperaturas de actividad se encuadra, además, en una ventana muy estrecha.

Una opción para reducir las emisiones de NO_x en gases de escape con oxígeno son los sistemas de captura o almacenamiento en forma química del NO. Se denominan Lean

NO_x *Trapping* (LNT) o NO_x *Storage Reduction* (NSR). Se trata de capturar y almacenar los NO_x durante condiciones de mezcla pobre para liberarlos en condiciones de mezcla rica. El NO se convierte previamente a NO₂ en un catalizador de oxidación en mezcla pobre y es atrapado en forma de nitrato en un óxido metálico alcalino (normalmente bario, Ba) depositado junto con el recubrimiento de un catalizador convencional de oxidación de tres vías. Cuando el sistema de satura químicamente de nitrato, debe regenerarse. Para ello, el motor debe pasar a quemar en los cilindros una mezcla rica durante un corto periodo de tiempo (aproximadamente, 1 s) con la reacción $Ba(NO_3)_2 + H_2 \rightarrow BaO + NO_2 + H_2O$. El NO₂ es reducido a N₂+O₂ en el propio catalizador de Pt, con buen rendimiento por ser una mezcla rica. El rango de temperaturas en que este sistema es activo está entre 350 y 450 °C.

Catalizadores de tres vías

Puesto que los metales nobles actúan sobre los gases de escape acelerando los procesos de oxidación del CO e HC, y de reducción del NO, se denomina catalizador de tres vías al que tiene por objeto actuar sobre los tres contaminantes en un gas de escape de una combustión con mezcla estequiométrica. Solo funcionan adecuadamente en una ventana de dosificado relativo muy estrecha para tener un buen rendimiento de conversión de los tres contaminantes, de modo que solo pueden emplearse en motores de encendido provocado de mezcla homogénea, con un procedimiento de control de la mezcla muy preciso. Para ello existe en el escape un sensor de oxígeno en el tubo

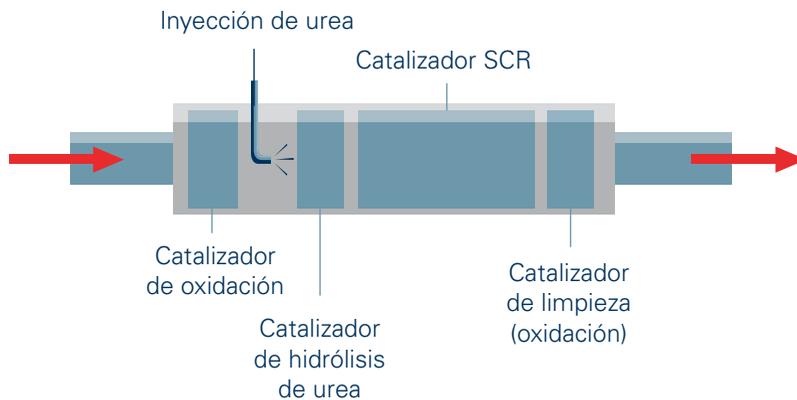


Figura 10

Esquema de un catalizador SCR con urea para motores diésel.

de escape, denominado sonda lambda. Como el dosificado relativo de la mezcla en los cilindros oscila alrededor del valor 1, se adicionan óxidos de cerio (Ce) o de renio (Re), que actúan como un almacenamiento de oxígeno.

Para controlar las emisiones de CO e HC en los periodos de arranque en frío, algunos motores incorporan catalizadores precalentados con resistencias eléctricas, catalizadores de matriz metálica o un catalizador de arranque de baja inercia térmica, de menor tamaño que el principal y situado muy cerca del motor, que pueden calentarse en menos de 40 segundos.

Sistemas de reducción catalítica selectiva (Selective Catalytic Reduction, SCR)

Se basan en reacciones entre amoníaco y NO y NO₂ para dar N₂ y agua, activadas por un catalizador en una matriz de sustrato cerámico. Debido a la peligrosidad del amoníaco, en los motores de automoción no se transporta en el

vehículo sino que se produce internamente a partir de la hidrólisis de urea, un compuesto no tóxico, biodegradable y de bajo coste. Es usual instalar previamente un catalizador de oxidación para reducir la concentración de CO e HC, que también oxida parte del NO a NO₂. Se inyecta una solución acuosa al 30-40% denominada genéricamente Adblue para generar amoníaco (NH₃) (ver figura 10). Para alcanzar rendimientos superiores al 90% en la conversión de NO_x hace falta una relación molar NH₃/NO_x de aproximadamente 0,9. Debido a la necesidad de tiempos de residencia suficientes, los catalizadores SCR con urea son bastante más voluminosos que los catalizadores convencionales de motores de encendido provocado. La inyección de Adblue debe controlarse con precisión, ya que un exceso produciría emisiones de amoníaco por el escape, aunque suele instalarse un catalizador de oxidación de seguridad y un sensor de este gas a la salida del escape para prevenir emisiones de NH₃ en los transitorios del motor.

Filtros de partículas

Estos filtros se utilizan para retener las partículas de hollín que emiten los motores diésel, aunque también algunos motores de gasolina actuales. En el caso concreto de los diésel a veces se denominan Diesel Particulate Filter (FPD). Consisten en una estructura monolítica de material cerámico poroso extruido similar al de los catalizadores –normalmente cordierita o carburo de silicio–, que tiene un gran número de canales paralelos de sección transversal cuadrada. Al estar sellados los extremos de los canales alternativamente, uno sí y otro no, los gases de escape deben atravesar la pared para salir por el extremo opuesto, y al atravesar el material poroso depositan el PM en su superficie y en los canales interiores. La porosidad es de entre 35-50% y el diámetro medio de los poros suele estar entre 10 y 25 µm.

En los filtros de partículas para los motores de combustión interna coexisten dos modos de filtrado:

- Retención superficial del PM con tamaño mayor que el poro que queda retenido en el mismo.
- Retención en la superficie interna cuando el tamaño de poro es mayor que el diámetro de las partículas. Al penetrar en los poros se quedan adheridas al material del filtro en su superficie interior por efecto de deposición, adherencia, choque o impacto.

La relación entre la eficiencia de filtrado y la contrapresión de escape se ajusta en el diseño en base al volumen y espesor de las paredes, así como a las características del elemento filtrante, como su porosidad y distribución de tamaño de

los poros. Un menor tamaño de éstos da lugar a una mejor retención de las partículas, pero causa una mayor contrapresión de escape.

Durante el uso del motor, el filtro se va colmatando y aumenta la contrapresión, y cuando alcanza valores excesivos es necesario eliminar el PM retenido. Este proceso se lleva a cabo en motores de automoción durante su funcionamiento. Como el PM retenido es en su mayor parte hollín, puede ser eliminado por combustión en lo que se denomina “regeneración”; si bien la deposición de cenizas, sales o metales dan lugar a un tipo de colmatación del filtro que no puede ser regenerado.

La combustión del PM necesita que los gases contengan oxígeno y se produce cuando la temperatura es superior a 550 °C. Sin embargo, las temperaturas de escape son normalmente menores y se requiere realizar otras acciones para oxidar el hollín. Se pueden clasificar en tres tipos:

- Regeneración activa aumentando en ciertos periodos la temperatura del gas de escape con estrategias de inyección o mediante un calentamiento eléctrico adicional.
- Regeneración pasiva promoviendo la reacción de oxidación del hollín a baja temperatura por una deposición de material catalítico en la superficie del filtro o por la inyección de aditivos activadores en el propio filtro o acompañando al combustible.
- Regeneración en continuo (*Continuous Regenerative Trapping*, CRY) utilizando el NO₂ obtenido en los gases de escape por oxidación del NO en un catalizador de oxidación previo. Se produce la reacción $2\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{NO}$.

¿Cuáles son las posibles soluciones tecnológicas para reducir emisiones a corto y medio plazo?

Reducción de emisiones en vehículos en uso

La reducción de las emisiones de los vehículos en uso, adquiridos años atrás con unas limitaciones de emisiones menos estrictas que las actuales, podría realizarse mediante reacondicionamiento del motor y postratamiento en lo que se ha denominado *retrofitting*. Aunque no puede descartarse que una recalibración de la unidad de control electrónico pueda aportar la reducción de ciertas emisiones, y probablemente un aumento de otras, la modificación del motor para contaminar menos es algo casi impensable actualmente por el elevado número de horas/persona con sofisticados ensayos en un banco de pruebas. Por otra parte, la reducción de las emisiones durante el arranque en frío del motor, significativa en el caso de los vehículos de gasolina, no es posible sin cambiar el motor. Lo que se ha planteado es el postratamiento de los gases de escape entre el motor y la atmósfera, aunque ello implica también de algún modo a la gestión electrónica del propio motor. En algunas ciudades europeas, se ha llevado a cabo la experiencia de modificar autobuses urbanos con motor diésel añadiéndoles filtros de partículas y/o sistemas SCR. Evidentemente, una cuestión es disponer de sitio para acoplar

estos sistemas, que son voluminosos, y otra muy distinta asumir el coste de los mismos y su durabilidad. Las regeneraciones del filtro de partículas dependen de la emisión de hollín desde el propio motor, que no puede ser reducida fácilmente en un motor ya diseñado y construido. Los sistemas SCR son voluminosos y pesados, pero algo más susceptibles de ser acoplados a un motor en uso, aunque sería difícil asegurar su durabilidad.

En vehículos ligeros todo esto es aún más difícil por el menor tamaño y disponibilidad de espacio, aunque algunos fabricantes han valorado la posibilidad de adaptar sistemas SCR a vehículos diésel Euro 5 para convertirlos a Euro 6 con un coste superior a los 2.000 euros. En resumen, el *retrofitting* podría ser una opción en vehículos de flotas cautivas, pero la mejor opción continua siendo la renovación de la flota con vehículos que cumplan con las nuevas limitaciones de emisiones, y las que en el futuro se vayan imponiendo. Así como, obviamente, tratar de mantener los vehículos de normativa más antigua en su mejor estado de mantenimiento para mantener las emisiones en sus valores de homologación.

Tecnologías de motor y de postratamiento hacia el futuro

Actualmente, no se prevén cambios drásticos o significativos en las tecnologías de motor y de postratamiento. Hasta ahora los dos problemas a resolver en los motores diésel habían sido las partículas, solucionables con filtros, y los NO_x que se resolvían con SCR y Adblue. Sin embargo, las emisiones de CO_2 y el consumo

eran menores que los de la gasolina, y de ahí su éxito en Europa. Como los filtros y el SCR causan molestias por la regeneración del filtro y la urea, los fabricantes limitaban en lo posible su uso y tamaño.

En los vehículos pesados esto está bastante bien resuelto, pero en los vehículos ligeros las nuevas medidas RDE serán un quebradero de cabeza para el diseño de estos motores si no quieren encarecerse en exceso y se desea mantener el consumo y emisión de CO₂ en los valores actuales. Se necesitan sistemas más voluminosos y costosos, por lo que el uso de motores diésel se deberá circunscribir a vehículos grandes –todoterrenos y furgonetas– o de alta gama, mientras que desaparecerá de los pequeños.

En los últimos años ha sido la reducción de consumo en los motores de gasolina lo que ha marcado el paso de su evolución tecnológica, pero ello ha provocado problemas de emisión de PM y NO_x al no poder compaginar mezcla estratificada y catalizador de tres vías. Una de las opciones es el retorno a la mezcla homogénea estequiométrica con catalizador de tres vías, opción que permite una potencialidad de reducción de emisiones mayor y puede ser aplicada también a motores de gas natural, autogás o etanol, pero no a motores diésel. Pero la reducción simultánea de emisiones y consumo solo se conseguirá con una mayor electrificación de la propulsión, tratando de gestionar la energía en el vehículo de manera eficiente, reduciendo la necesidad de potencia del motor y buscando su utilización en las

condiciones de menores emisiones. Los híbridos serie, y en el futuro cada vez más los híbridos paralelo, se extenderán a casi toda la oferta.

Evolución futura de la composición de la flota de vehículos

En Europa, muy probablemente, se va a reducir significativamente el porcentaje de vehículos con motor diésel en favor de los de gasolina. Sin embargo, esto será tanto por sus menores emisiones –aunque actualmente son muy similares al haberse introducido las medidas RDE–, como por el precio de los diésel para cumplir la norma Euro 6d.

Este incremento de precio favorecerá a los híbridos de gasolina, que si bien actualmente están sometidos a limitaciones de emisiones contaminantes iguales a las de los no híbridos, la potencialidad de reducción de CO₂ es mayor. Asimismo, en el futuro podrán establecerse límites a las emisiones de CO, HC y NO_x más bajas que las de los vehículos de propulsión convencional. La implantación de propulsión híbrida con motores diésel en vehículos ligeros es, sin embargo, poco probable por su elevado coste. Por último, cabe decir que el potencial de reducción de emisiones y consumo del gas natural como combustible, así como de ciertos combustibles sintéticos, aunque no cambia sustancialmente la tecnología de motor y postratamiento, será una opción razonable en la extensión de vida de los motores de combustión interna en el sector del transporte.



Licenciada en Biología y doctora por la Universidad Autónoma de Madrid. Científica titular del Centro Nacional de Epidemiología del Instituto de Salud Carlos III. Su principal línea de investigación es la evaluación del impacto que producen las exposiciones ambientales en la salud, principalmente por contaminación atmosférica. Entre sus compromisos profesionales destaca la aplicación efectiva del principio de salud en todas las políticas.

Elena Boldo

Centro Nacional de Epidemiología-Instituto de Salud Carlos III (CNE-ISCIII) y Centro de Investigación Biomédica en Red Epidemiología y Salud Pública (CIBERESP).

Los efectos de la contaminación del aire en la salud humana

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo afectan a la salud los compuestos químicos del aire contaminado?
- ¿Afecta la exposición a los contaminantes a todos por igual?
- ¿Qué efectos adversos produce la contaminación en el cuerpo humano?
- ¿Qué beneficios para la salud supone el cumplimiento de las recomendaciones oficiales?
- ¿Cuáles son los principales retos para lograr un aire de calidad?

Apunte inicial

La mano humana está detrás de la degradación del medio ambiente, que puede alcanzar grandes dimensiones como ocurre con el cambio climático, la pérdida de la biodiversidad o la desertización. El aire, recurso natural imprescindible para nuestra vida, no se libra tampoco de la continua acción contaminante de nuestras actividades. Dado que respirar es primordial para nuestra supervivencia, es lógico pensar que el deterioro de la calidad del aire afecta inevitablemente a nuestra salud. De hecho, la mayor parte de los ciudadanos comprende intuitivamente el vínculo existente entre la contaminación atmosférica y determinados efectos en la salud, como alergias o asma⁴⁰. La contaminación atmosférica, que no entiende de fronteras, se ha convertido en un problema de escala mundial. La ciencia ha mostrado que la deficiente calidad del aire puede ocasionar graves

consecuencias para el medio ambiente y para nuestra salud⁴¹. Los contaminantes atmosféricos se han relacionado, sobre todo, con enfermedades cardiorrespiratorias⁴², con daños en la vegetación⁴³, con la acidificación y eutrofización de suelos y aguas⁴⁴, con la reducción de cosechas⁴⁵, con el cambio climático⁴⁶ o con la corrosión de edificios⁴⁷. Este enorme impacto exige nuestra reacción y responsabilidad para actuar a favor de una atmósfera menos contaminada y, en definitiva, de la vida en la Tierra.

¿Cómo afectan a la salud los compuestos químicos del aire contaminado?

En un aire contaminado se encuentra una mezcla de miles de compuestos químicos. La legislación europea ha regulado aquellos

40 Boldo E., 2016. La contaminación del aire Editorial Catarata. ISBN (Catarata): 978-84-9097-228-1. ISBN (ISCI): 978-84-95463-55-5. NIPO: 725160248.

41 Kelly F.J., Fussell J.C., 2015. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ. Geochem. Health* 37, 631–649.

42 OMS, 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report. OMS Regional Office for Europe, 309 pp. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>

43 García-Gómez H., Aguilera L., Izquierda-Rojano S., Valiño F., Ávila A., Elustondo D., et al., 2016. Atmospheric pollutants in peri-urban forests of *Quercus ilex*: evidence of pollution abatement and threats for vegetation. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23, 6400–6413.

Rai P.K., 2016. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 129, 120–136.

44 EEA, 2015. Exposure of ecosystems to acidification, eutrophication and ozone. 21 pp. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-of-ecosystems-to-acidification-2/exposure-of-ecosystems-to-acidification-4>

45 Van Dingenen R., Dentener F.J., Raes F., Krol M.C., Emberson L., Cofala J., 2009. The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation. *Atmos. Environ.* 43, 604–618.

46 Orru H., Ebi K.L., Forsberg B., 2017. The Interplay of Climate Change and Air Pollution on Health. *Curr. Environ. Health Rep.* 4, 504–513.

47 Venkat Rao N., Rajasekhar M., Chinna Rao D.R.G., 2014. Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials and Historical Structures. *AJER* 3, 359–364.

con potencial de ocasionar efectos agudos y/o crónicos sobre la salud, que se utilizan como indicadores de la calidad del aire⁴⁸. Desde una perspectiva sanitaria, destacan las partículas suspendidas en el aire (PM) y los contaminantes gaseosos, como el ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂), los compuestos orgánicos volátiles (COVs, incluido el benceno, C₆H₆), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂), entre otros⁴⁹. Muchos de ellos tienen su origen, en parte o en su totalidad, en la quema de combustibles de origen fósil. En el ámbito urbano, el PM y el NO₂ están ligados en gran parte a las emisiones de los automóviles, en particular, los vehículos diésel. Los contaminantes inhalados con el aire viajan a distintas partes de nuestro sistema respiratorio y pueden incluso alcanzar otras partes de nuestro organismo (ver figura 1). Mientras que el SO₂ no suele pasar de la región traqueo-bronquial, el NO₂ y el O₃ pueden avanzar hasta los alveolos de los pulmones. El PM se ha ganado la triste fama de ser el contaminante atmosférico más perjudicial para la salud, si bien sus efectos

dependen fundamentalmente de su tamaño y composición química⁵⁰. A menor tamaño, mayor capacidad de penetración en el organismo, mayor superficie de contacto con los sistemas biológicos y mayor reactividad química. Esto implica un potencial incremento del riesgo de lesión en tejidos y órganos, dependiente además de las sustancias químicas nocivas que contengan. En cuanto al tamaño, el PM más grande de 10 µm, como el polvo o el polen, generalmente queda atrapado por la nariz y la garganta. Por consiguiente, la investigación epidemiológica centra sus esfuerzos en fracciones más pequeñas, el PM inferior a 10 y 2,5 µm (PM₁₀ y PM_{2,5} respectivamente), que pueden avanzar más en el sistema respiratorio a medida que el tamaño se reduce⁵¹. Las partículas ultrafinas (UFP) pueden atravesar la barrera alveolo-capilar y llegar por la circulación sanguínea a otros órganos, como el corazón y el cerebro⁵². En relación con los componentes del PM, el mayor impacto en la salud parece que viene determinado por una serie de componentes, entre los que destacan el carbono elemental

48 EEA, 2017a. Air quality in Europe 2017. EEA Report, N° 13/2017. ISSN 1725-9177. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 80 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

49 Mannucci P.M., Harari S., Martinelli I., Franchini M., 2015. Effects on health of air pollution: a narrative review. *Intern. Emerg. Med.* 10, 657–662.

50 Tyler C.R., Zychowski K.E., Sanchez B.N., Rivero V., Lucas S., Herbert G., et al., 2016. Surface area-dependence of gas-particle interactions influences pulmonary and neuroinflammatory outcomes. *Part. Fibre Toxicol.* 13, 64.

51 Churg A., Brauer M., 2000. Ambient atmospheric particles in the airways of human lungs. *Ultrastruct. Pathol.* 24, 353–361.
Sturm R., 2013. Theoretical deposition of carcinogenic particle aggregates in the upper respiratory tract. *Ann. Transl. Med.* 1, 25.
Sturm R., 2012. Theoretical models of carcinogenic particle deposition and clearance in children's lungs. *J. Thorac. Dis.* 4, 368–376.

52 Oberdörster G., Sharp Z., Atudorei V., Elder A., Gelein R., Kreyling W., Cox, C., 2004. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal. Toxicol.* 16, 437–445.
Schmid O., Möller W., Semmler-Behnke M., Ferron G.A., Karg E., Lipka J., et al., 2009. Dosimetry and toxicology of inhaled ultrafine particles. *Biomark. Biochem. Indic. Expo. Response Susceptibility Chem.* 14 Suppl 1, 67-73.

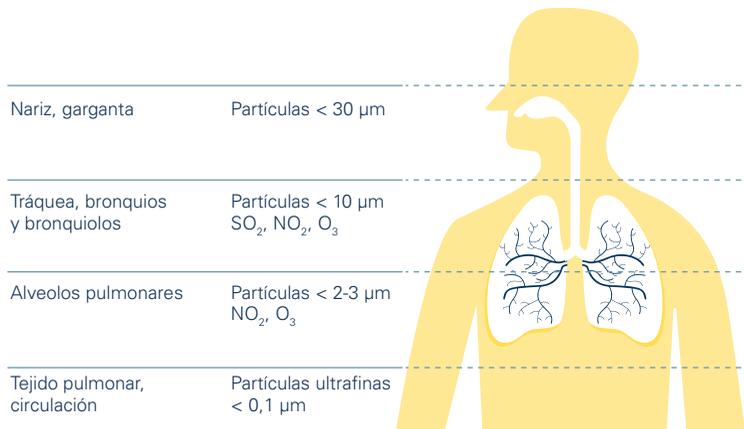


Figura 1

Penetración de diversos contaminantes en el sistema respiratorio.

Adaptado de Guarieiro et al y Künzli et al.⁵³

(EC), los compuestos orgánicos –OC, concretamente los hidrocarburos aromáticos policíclicos, HAP–, los sulfatos y los nitratos, así como determinados metales –arsénico, cadmio, hierro, zinc, níquel–.

¿Afecta la exposición a los contaminantes a todos por igual?

La contaminación del aire es importante en la determinación de la calidad de vida y del estado de salud de la población. Por regla general, la

gran mayoría de los individuos no sienten nada anormal por estar expuestos a concentraciones bajas o moderadas de contaminación atmosférica, las que habitualmente están presentes en las ciudades europeas o norteamericanas. Pero, incluso a esos niveles relativamente discretos de contaminación, ciertos colectivos pueden sufrir alteraciones de la salud. Esto supone que el riesgo no se distribuye por igual en toda la población, sino que probablemente plantea una grave amenaza para determinadas personas, aunque aparentemente estén sanas.

Varios factores influyen en la toxicidad para que un individuo se vea afectado finalmente por la contaminación atmosférica: los compuestos del aire a los que la persona se ve expuesta en su

53 Guarieiro L., Guarieiro A., 2013. Vehicle Emissions: What Will Change with Use of Biofuel? Ch 14 Biofuels - Economy, Environment and Sustainability. ISBN 978-953-51-0950-1. Edited by Zhen Fang. Publisher: InTech, Chapters published, 394 pp.
Künzli N., Laura P., Regula R., 2010. Air Quality and Health. European Respiratory Society. ISBN 978-1-84984-008-8. 72 pp. <https://www.ersnet.org/publications/air-quality-and-health>

medio de vida –propiedades físico-químicas o biológicas–, la dosis que se alcanza en puntos críticos de los tejidos, la frecuencia y la duración de exposición a los contaminantes –exposición puntual, repetida, aguda o crónica–, la susceptibilidad de cada individuo a los efectos perjudiciales de la contaminación –la edad o la predisposición genética– y los hábitos o circunstancias de la vida de la persona –el tabaquismo o trabajar en ambientes exteriores–. El grado y lesión esperados pueden cambiar en función de las posibles reacciones de combinación entre contaminantes (sinergias), la sensibilidad de los receptores y la capacidad de respuesta del organismo frente a la sustancia. El impacto en la salud se observa especialmente entre los grupos más susceptibles y vulnerables, que sufren con más rigor las consecuencias de vivir en entornos insanos⁵⁴. En general, los

más susceptibles, debido a factores biológicos o intrínsecos, son los niños, los ancianos, los enfermos crónicos y las mujeres, especialmente las embarazadas y lactantes⁵⁵. Los más vulnerables, debido a factores no biológicos o extrínsecos, son las personas de bajo nivel socioeconómico⁵⁶. Finalmente, otros colectivos pueden presentar un mayor riesgo por estar más expuestos a los contaminantes, como los trabajadores⁵⁷ o deportistas⁵⁸ que desarrollan su actividad al aire libre, o los residentes en barrios próximos a carreteras muy transitadas o zonas industriales⁵⁹.

Los efectos adversos encontrados en fetos, bebés y niños sugieren que requieren más protección de la que se les proporciona actualmente⁶⁰. Los fetos y los bebés son especialmente susceptibles a los efectos de los agentes ambientales que interrumpen el

-
- 54 Bell M.L., Zanobetti A., Dominici F., 2013. Evidence on Vulnerability and Susceptibility to Health Risks Associated With Short-Term Exposure to Particulate Matter: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Am. J. Epidemiol.* 178, 865–876.
- 55 Westergaard N., Gehring U., Slama R., Pedersen M., 2017. Ambient air pollution and low birth weight - are some women more vulnerable than others? *Environ. Int.* 104, 146–154.
- 56 Gordon S.B., Bruce N.G., Grigg J., Hibberd P.L., Kurmi O.P., Lam K.H., et al., 2014. Respiratory risks from household air pollution in low and middle income countries. *Lancet Respir. Med.* 2, 823–860.
- O' Lenick C.R., Chang H.H., Kramer M.R., Winquist A., Mulholland J.A., Friberg M.D., Sarnat, S.E., 2017. Ozone and childhood respiratory disease in three US cities: evaluation of effect measure modification by neighborhood socioeconomic status using a Bayesian hierarchical approach. *Environ. Health Glob. Access Sci. Source* 16, 36.
- 57 Adetona O., Reinhardt T.E., Domitrovich J., Broyles G., Adetona A.M., Kleinman M.T., Ottmar R.D., Naeher L.P., 2016. Review of the health effects of wildland fire smoke on wildland firefighters and the public. *Inhal. Toxicol.* 28, 95–139.
- 58 An R., Zhang S., Ji M., Guan C., 2017. Impact of ambient air pollution on physical activity among adults: A systematic review and meta-analysis. *Perspect. Public Health* 1757913917726567.
- 59 Fernández-Navarro P., García-Pérez J., Ramis R., Boldo E., López-Abente G., 2017. Industrial pollution and cancer in Spain: An important public health issue. *Environ. Res.* 159, 555–563.
- Rodrigues P.C. de O., Santos E.S.D., Hacon S. de S., Ignotti, E., 2017. Risk factors in cardiovascular disease mortality associated with high exposure to vehicular traffic. *Rev. Bras. Epidemiol. Braz. J. Epidemiol.* 20, 423-434.
- 60 Iñiguez C., Esplugues A., Sunyer J., Basterrechea M., Fernández-Somoano A., Costa O., et al., 2016. Prenatal Exposure to NO2 and Ultrasound Measures of Fetal Growth in the Spanish INMA Cohort. *Environ. Health Perspect.* 124, 235–242.
- Sunyer J., Esnaola M., Alvarez-Pedrerol M., Fors J., Rivas I., López-Vicente J, et al., 2015. Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. *PLoS Med.* 12, e1001792.

proceso de desarrollo, lo que puede ocasionar secuelas para el resto de la vida. Por otro lado, los niños son sensibles frente a los contaminantes ambientales porque los sistemas respiratorio e inmunológico, así como los mecanismos de desintoxicación del organismo, no están completamente desarrollados. Son más activos y pasan más tiempo en ambientes exteriores, además de recibir una dosis de exposición mayor por peso corporal y superficie del pulmón, lo que potencialmente puede ocasionar efectos irreversibles en el desarrollo de dicho órgano.

Las lesiones ocasionadas por la contaminación atmosférica durante la etapa infantil pueden ser importantes precursores de la morbilidad y mortalidad en la edad adulta⁶¹. Además, las personas mayores, especialmente a partir de los 65 años, parecen ser hipersensibles a la contaminación atmosférica⁶². El envejecimiento provoca un deterioro natural de los sistemas biológicos y una declinación gradual de los procesos fisiológicos, lo que acarrea una salud más frágil y una mayor susceptibilidad a las exposiciones ambientales. Entre otros, presentan menor fuerza de los músculos

inspiratorios, menor efectividad de la tos, menor percepción de la obstrucción bronquial, menor depuración de las vías respiratorias, así como menor capacidad antioxidante y de adaptación de sus sistemas de defensa. Además, los ancianos presentan una mayor prevalencia de enfermedades o dolencias preexistentes, como enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), aterosclerosis, hipertensión o diabetes, así como el deterioro cognitivo (párkinson o alzhéimer), que pueden acelerarse o agravarse por la contaminación atmosférica⁶³.

Por otra parte, a pesar de que diversos estudios señalan un mayor riesgo para las mujeres⁶⁴, la evidencia científica no es todavía consistente para establecer diferencias en los efectos en la salud por género. No obstante, en comparación con los hombres, las mujeres presentan diferencias estructurales –menor tamaño pulmonar o del diámetro de las vías respiratorias–, y hormonales –la progesterona y los estrógenos influyen en el sistema pulmonar–, que pueden conducir a una mayor hiperreactividad de las vías respiratorias. En cualquier caso, sí se ha constatado que el género influye en la tasa de depósito y a localización del

61 Martens D.S., Cox B., Janssen B.G., Clemente D.B.P., Gasparrini A., Vanpoucke C., et al., 2017. Prenatal Air Pollution and Newborns' Predisposition to Accelerated Biological Aging. *JAMA Pediatr.* doi: 10.1001/jamapediatrics.2017.3024. [Epub ahead of print]

Rodgers K.M., Udesky J.O., Rudel R.A., Brody J.G., 2018. Environmental chemicals and breast cancer: An updated review of epidemiological literature informed by biological mechanisms. *Environ. Res.* 160, 152–182.

62 Kelly F.J., Fussell J.C., 2015. Air pollution and public health: emerging hazards and improved understanding of risk. *Environ. Geochem. Health* 37, 631–649.

Ward-Caviness C.K., Nwanaji-Enwerem J.C., Wolf K., Wahl S., Colicino E., Trevisi L., et al., 2016. Long-term exposure to air pollution is associated with biological aging. *Oncotarget* 7, 74510–74525.

63 Cournane S., Conway R., Byrne D., O'Riordan D., Coveney S., Silke B., 2017. High Risk Subgroups Sensitive to Air Pollution Levels Following an Emergency Medical Admission. *Toxics* 5, 27.

Simoni M., Baldacci S., Maio S., Cerrai S., Sarno G., Viegi G., 2015. Adverse effects of outdoor pollution in the elderly. *J. Thorac. Dis.* 7, 34–45.

64 Rodrigues P.C. de O., Santos E.S.D., Hacon S. de S., Ignotti, E., 2017. Risk factors in cardiovascular disease mortality associated with high exposure to vehicular traffic. *Rev. Bras. Epidemiol. Braz. J. Epidemiol.* 20, 423-434.

PM depositado en el tracto respiratorio, debido a diferencias de tamaño corporal o de las vías respiratorias y parámetros de ventilación⁶⁵. En términos generales, las poblaciones con nivel socioeconómico más bajo padecen mayores problemas de salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) alerta que la pobreza es la causa principal de enfermedad y muerte en el mundo, ejerciendo su influencia destructiva en todos los estadios de la vida humana; es decir, desde el momento de la concepción hasta la muerte. La contaminación atmosférica también puede contribuir a las desigualdades sociales por dos vías: por una mayor exposición del país, por la localización concreta de la residencia o por la ocupación desarrollada; así como por un aumento de la vulnerabilidad porque el estado de salud es globalmente más frágil⁶⁶. En múltiples ocasiones, las medidas de control de la calidad del aire generan un notable crecimiento de la brecha social, provocando una mayor carga para los más desfavorecidos. Pongamos, por ejemplo, la penalización económica que se decreta a los vehículos más antiguos –no siempre más contaminantes– en el aparcamiento regulado de muchas ciudades, cuando es obvio que todo un colectivo no puede adquirir un vehículo más eficiente en igualdad de oportunidades. La gestión de la calidad del aire debería basarse en proyectos inclusivos donde todos los integrantes de la comunidad realicen esfuerzos similares por un beneficio común.

Finalmente, ciertas actividades profesionales implican una mayor exposición a la contaminación atmosférica, en comparación con la población general. Es el caso de los bomberos, los barrenderos, los camioneros, los conductores de autobús o las personas que ejercen actividades en contacto con el tráfico (agentes de circulación, personal de mantenimiento de carreteras, agentes de peajes o de aparcamientos cubiertos). Si bien los usuarios de autobuses y de aparcamientos subterráneos pueden estar también expuestos al mismo nivel de concentración de contaminantes que los trabajadores, el tiempo de exposición es mucho menor. Todo ello sin olvidar las ocupaciones desarrolladas en industrias contaminantes o en áreas industriales, que pueden estar afectadas por sustancias específicas.

¿Qué efectos adversos provoca la contaminación del aire en el cuerpo humano?

La calidad del aire escapa del control personal, por lo que respiramos las sustancias que contenga sin ninguna posibilidad de elección. La exposición a un aire deteriorado perjudica a toda la población

65 Sturm R., 2016. Total deposition of ultrafine particles in the lungs of healthy men and women: experimental and theoretical results. *Ann. Transl. Med.* 4, 234.

66 Cournane S., Conway R., Byrne D., O’Riordan D., Coveney S., Silke B., 2017. High Risk Subgroups Sensitive to Air Pollution Levels Following an Emergency Medical Admission. *Toxics* 5, 27.
Hajat A., Hsia C., O’Neill M.S., 2015. Socioeconomic Disparities and Air Pollution Exposure: A Global Review. *Curr. Environ. Health Rep.* 2, 440–450.

en menor o mayor medida, provocando una gran variedad de efectos en la salud con distinto grado de severidad, desde cambios funcionales subclínicos –no detectados por la persona– a diversos síntomas, visitas a los servicios de urgencias sanitarias, hospitalizaciones por diversas patologías y muertes.

Mortalidad prematura

Aunque los efectos más graves son, por fortuna, menos frecuentes entre la población, la OMS señala que una de cada ocho muertes en el mundo está relacionada con la contaminación atmosférica. En el año 2012, esta cifra se tradujo en la muerte prematura de unos 7 millones de personas, de los que 3,7 millones –6,7% del total de muertes– se atribuyen al aire ambiente y, el resto, a la contaminación en espacios interiores. Por causas específicas, supone el 16% de las muertes por cáncer de pulmón, el 11% por EPOC, el 20% por cardiopatía isquémica y el 13% por infecciones respiratorias⁶⁷.

El detrimento en la salud, que puede conducir a la muerte prematura, explica que

la contaminación atmosférica esté asociada con pérdida de bienestar, menor calidad de vida y reducción en la esperanza de vida. Un estudio realizado en España⁶⁸, concluye que un incremento de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} supone una pérdida de casi un año de vida. A su vez, un aumento de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de $\text{PM}_{2,5}$ se relacionó con una reducción de siete meses de vida. Estos incrementos en la concentración de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ se asociaron con un aumento del riesgo de morir del 5,7% y del 3,7%, respectivamente.

Efectos prenatales y postnatales

Antes de nacer ya estamos amenazados por la contaminación atmosférica⁶⁹. La literatura científica⁷⁰ relaciona la exposición de las embarazadas a la contaminación –especialmente por O_3 , NO_2 , CO , PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ – con el parto prematuro –por debajo de la semana 37 de gestación– y el bajo peso al nacimiento de sus bebés –bajo <2.500 g; muy bajo <1.500 g–. Reuniendo información de 14 cohortes europeas de recién nacidos, se ha concluido que el riesgo de bajo peso al nacimiento es de un 18% por

67 OMS, 2016. Ambient and household air pollution and health http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/

68 de Keijzer C., Agis D., Ambrós A., Arévalo G., Baldasano J.M., Bande S., et al., MED-HISS Study group, 2017. The association of air pollution and greenness with mortality and life expectancy in Spain: A small-area study. *Environ. Int.* 99, 170–176.

69 Ebisu K., Malig B., Hasheminassab S., Sioutas C., Basu R., 2018. Cause-specific stillbirth and exposure to chemical constituents and sources of fine particulate matter. *Environ. Res.* 160, 358-364.

Veras M.M., de Oliveira Alves N., Fajersztajn L., Saldiva P., 2017. Before the first breath: prenatal exposures to air pollution and lung development. *Cell Tissue Res.* 367, 445–455.

70 Li X., Huang S., Jiao A., Yang X., Yun J., Wang Y., et al., 2017. Association between ambient fine particulate matter and preterm birth or term low birth weight: An updated systematic review and meta-analysis. *Environ. Pollut.* 227, 596–605.

Stieb D.M., Chen L., Eshoul M., Judek S., 2012. Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Res.* 117, 100–111.

cada incremento de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las $\text{PM}_{2,5}$ ⁷¹. Este parámetro sanitario es trascendental porque se correlaciona con el estado de salud a lo largo de la vida de la persona: menor peso, peor salud. Además, existe preocupación por los efectos de $\text{PM}_{2,5}$, NO_2 y HAP sobre el neurodesarrollo⁷², que es el proceso de evolución del sistema nervioso que se extiende desde el período embrionario –estadio inicial del embarazo– hasta la adolescencia. Los estudios experimentales sugieren que la contaminación atmosférica puede ocasionar un serio impacto en el sistema nervioso central, ya que se ha observado efectos tales como la inflamación crónica del cerebro, la activación de las células microglía, principal línea de defensa del sistema nervioso central, y daños en la sustancia blanca. Podría ocurrir un efecto general en el cerebro o en determinadas zonas específicas, lo que se relaciona con alteraciones en el funcionamiento cognitivo y psicomotor.

Efectos sobre el sistema respiratorio

La circulación de gases y partículas por las vías respiratorias provoca un gradiente de consecuencias agudas y crónicas, entre las

que destacan la tos y la expectoración, la reacción inflamatoria e irritación de las vías respiratorias, la alergia, las deficiencias en la función pulmonar, la hiperreactividad y la obstrucción bronquial, el agravamiento de enfermedades respiratorias preexistentes – asma, EPOC⁷³, bronquitis–, los nuevos casos de asma o bronquitis crónica, el incremento de infecciones respiratorias, así como el aumento del riesgo de morir por causa respiratoria y la disminución de la esperanza de vida⁷⁴. El $\text{PM}_{2,5}$ se señala específicamente como el causante de los efectos más graves en el sistema respiratorio, provocando además cáncer de pulmón⁷⁵. Evidentemente todas estas dolencias ocasionadas por la inhalación de contaminantes atmosféricos se relacionan con una mayor frecuencia de consumo de medicamentos y una mayor demanda de los servicios sanitarios, incluyendo las hospitalizaciones, especialmente entre los asmáticos y los enfermos de EPOC.

La disrupción en el desarrollo de los sistemas respiratorio e inmune por los contaminantes ambientales puede reducir la capacidad de combatir las infecciones y la función pulmonar. Se incrementa también el riesgo de desarrollo

71 Pedersen M., Giorgis-Allemand L., Bernard C., Aguilera I., Andersen A.N., Ballester F, et al., 2013. Ambient air pollution and low birthweight: a European cohort study (ESCAPE). *Lancet Respir. Med.* 1, 695–704.

72 Suades-González E., Gascon M., Guxens M., Sunyer J., 2015. Air Pollution and Neuropsychological Development: A Review of the Latest Evidence. *Endocrinology* 156, 3473–3482.

Xu X., Ha S.U., Basnet R., 2016. A Review of Epidemiological Research on Adverse Neurological Effects of Exposure to Ambient Air Pollution. *Front. Public Health* 4, 157.

73 Enfermedades pulmonares de obstrucción crónica.

74 Hoek G., Krishnan R.M., Beelen R., Peters A., Ostro B., Brunekreef B., Kaufman J.D., 2013. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ. Health* 12, 43.

Mannucci P.M., Harari S., Martinelli I., Franchini M., 2015. Effects on health of air pollution: a narrative review. *Intern. Emerg. Med.* 10, 657–662.

75 Hoek G., Raaschou-Nielsen O., 2014. Impact of fine particles in ambient air on lung cancer. *Chin. J. Cancer* 33, 197-203.

de alergias y asma. Los niños expuestos a la contaminación atmosférica sufren un menor desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio, lo que puede suponer unos pulmones más frágiles a lo largo de la vida⁷⁶. Los que viven en zonas más contaminadas, por ejemplo con PM y NO₂, tienen mayor riesgo de padecer más tos, más bronquitis agudas, más enfermedades infecciosas –como la neumonía–, más crisis asmáticas o desarrollar cáncer. En España, las enfermedades del sistema respiratorio suelen figurar como la tercera causa de mortalidad⁷⁷. En 2015, ocasionaron un 12% de las defunciones de nuestro país –51.848 muertes; tasa de 102 fallecidos por cada 100.000 habitantes–. La contaminación atmosférica sería un riesgo modificable de estas patologías.

Efectos sobre el sistema cardiovascular

La carga de enfermedad derivada de este riesgo ambiental es más elevada para las enfermedades cardiovasculares que para las respiratorias⁷⁸. Aunque el mecanismo de entrada en el organismo se produzca a través de la respiración, diversos tóxicos pueden

llegar hasta el sistema cardiovascular directamente y causar todo tipo de lesiones. En general, las patologías cardiovasculares son la causa más importante de morbimortalidad en el mundo desarrollado, siendo la primera causa de muerte en España. En 2015, las enfermedades del sistema circulatorio provocaron un 30% de las defunciones de nuestro país –124.197 muertes; tasa de 268 fallecidos por cada 100.000 habitantes–. Esto explica en parte que este peligro ambiental cause muchas más muertes relacionadas con dichas enfermedades.

La investigación científica sugiere una relación causal entre la exposición a los contaminantes del aire y las enfermedades cardiovasculares, con mayor evidencia para las partículas –especialmente por PM_{2,5} y UFP– que para los contaminantes gaseosos –como el O₃, NO₂, CO y SO₂⁷⁹–. También han sido relacionadas estas enfermedades con fuentes específicas de contaminación, como el tráfico⁸⁰. El deterioro de la calidad del aire está implicado tanto en eventos cardíacos y agravamiento de las patologías preexistentes, como en el proceso de desarrollo de dichas enfermedades.

76 Schultz E.S., Litonjua A.A., Melén E., 2017. Effects of Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution on Lung Function in Children. *Curr. Allergy Asthma Rep.* 17, 41.

Stern D.A., Morgan W.J., Wright A.L., Guerra S., Martinez F.D., 2007. Poor airway function in early infancy and lung function by age 22 years: a non-selective longitudinal cohort study. *Lancet Lond. Engl.* 370, 758-764.

77 INE, 2017. INEbase. Mortalidad 2015. http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176780&menu=ultiDatos&idp=1254735573175.

78 Lee B.J., Kim B., Lee K., 2014. Air Pollution Exposure and Cardiovascular Disease. *Toxicol. Res.* 30, 71–75.

79 Bourdrel T., Bind M.A., Béjot Y., Morel O., Argacha J.F., 2017. Cardiovascular effects of air pollution. *Arch. Cardiovasc. Dis.* 110, 634-642.

Martinelli N., Olivieri O., Girelli D., 2013. Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review. *Eur. J. Intern. Med.* 24, 295–302.

80 Rodrigues P.C. de O., Santos E.S.D., Hacon S. de S., Ignotti, E., 2017. Risk factors in cardiovascular disease mortality associated with high exposure to vehicular traffic. *Rev. Bras. Epidemiol. Braz. J. Epidemiol.* 20, 423-434.

En 2015, la Sociedad Europea de Cardiología elaboró un documento de consenso de expertos que resumía las relaciones entre la contaminación atmosférica y las enfermedades cardiovasculares⁸¹. La exposición al PM_{2,5} incrementa la presión arterial y la viscosidad plasmática, además de modificar la coagulación sanguínea. Todos estos factores favorecen el desarrollo de trombos y coágulos, que explican una mayor incidencia de la cardiopatía isquémica –infartos de miocardio y anginas de pecho–. Otros efectos son las arritmias, las insuficiencias cardíacas, los accidentes cerebrovasculares y las muertes por cualquier causa cardiovascular, especialmente en las personas con antecedentes previos de enfermedad cardíaca.

Efectos cancerígenos

Se estima que un 40% de los cánceres se deben a la acción de agentes externos que actúan sobre el organismo⁸². Para los agentes carcinogénicos, se considera que no existe umbral de concentración en el que no se esperen efectos adversos para la salud. Dicho de otro modo, cualquier nivel de exposición a sustancias que producen cáncer es inseguro, aunque cuanta más dosis se reciba más daños se pueden producir sobre la salud.

El conocimiento científico ha establecido que el aire contaminado es una causa de cáncer en el ser humano, particularmente de pulmón. En 2013, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC), organismo especializado de la OMS, declaró la contaminación atmosférica como cancerígena para humanos (Grupo 1)⁸³. Específicamente señalaron que existe suficiente evidencia para PM_{2,5}. Además, se encontró que existe una asociación positiva con el incremento de cáncer de vejiga. La IARC ya había clasificado anteriormente como carcinógenos determinados contaminantes que pueden estar presentes en el aire, incluyendo algunos COVs –benceno, formaldehído, cloruro de vinilo, óxido de etileno–, metales –As, Cd, Cr, Ni–, HAP (benzo(a)pireno), dioxinas (2,3,7,8 TCDD), el amianto y determinadas emisiones industriales o de los tubos de escape del motor diésel, entre otros.

Un número elevado de los contaminantes anteriormente mencionados y el tráfico están relacionados con el cáncer de pulmón, que es uno de los más comunes entre la población urbana, tiene muy mal pronóstico y su letalidad es muy elevada. La supervivencia sigue siendo obstinadamente corta, especialmente entre aquellos detectados en fases avanzadas, siendo del 10% en hombres y del 15% en mujeres a

81 Newby D.E., Mannucci P.M., Tell G.S., Baccarelli A.A., Brook R.D., Donaldson K., et al., 2015. Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. *Eur. Heart J.* 36, 83–93.

82 Vineis P., Wild C.P., 2014. Global cancer patterns: causes and prevention. *The Lancet* 383, 549–557.

83 Hamra G.B., Guha N., Cohen A., Laden F., Raaschou-Nielsen O., Samet J.M., et al., 2014. Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environ. Health Perspect.* 122, 906–911.
Hoek G., Raaschou-Nielsen O., 2014. Impact of fine particles in ambient air on lung cancer. *Chin. J. Cancer* 33, 197–203.

los 5 años desde el diagnóstico⁸⁴. En España, los tumores de bronquios y de pulmón son los responsables de la mayor mortalidad por cáncer⁸⁵. En 2015, la incidencia fue de 77 casos por 100.000 habitantes y fallecieron por esta causa 21.596 personas, 17.239 hombres y 4.357 mujeres.

Alrededor de un 10-15% de todos los casos de cáncer de pulmón se producen en no fumadores. Además, un 6% de todas las muertes por este tumor, se atribuyen a la contaminación del aire ambiente. En Europa, el proyecto Escape⁸⁶ encontró relación entre la exposición a largo plazo de PM₁₀ y PM_{2,5} y el incremento del riesgo de padecer cáncer de

pulmón⁸⁷. Además, estimaron que por cada aumento del tráfico en más de 4.000 vehículos diarios, dentro de un radio de 100 m de la residencia, se produce un aumento del 9% en el riesgo de incidencia de cáncer de pulmón⁸⁸. Finalmente, otros tumores están siendo analizados, pero las evidencias científicas aún no son concluyentes. El cáncer de mama se ha encontrado asociado principalmente con el NO₂, aunque también se estudia su relación con los contaminantes relacionados con el tráfico⁸⁹. La leucemia mieloide, causada por el benceno en adultos, está en proceso de investigación con el tráfico y el NO₂ tanto para niños como para adultos⁹⁰.

-
- 84 López-Abente G., Aragonés N., Pérez-Gómez B., Pollán M., García-Pérez J., Ramis R., Fernández-Navarro P., 2014. Time trends in municipal distribution patterns of cancer mortality in Spain. *BMC Cancer* 14, 535.
- Lopez-Abente G., Nuñez O., Perez-Gomez B., Aragonés N., Pollan M., 2015. La Situación Del Cáncer En España: Informe 2015 (The Situation of Cancer in Spain: Report 2015) (SSRN Scholarly Paper No. ID 2863882). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- 85 INE, 2017. INEbase. Mortalidad 2015. http://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176780&menu=ultiDatos&idp=1254735573175.
- 86 ESCAPE: European Study of Cohorts for Air Pollution Effects.
- 87 Adam M., Schikowski T., Carsin A.E., Cai Y., Jacquemin B., Sanchez M., et al., 2015. Adult lung function and long-term air pollution exposure. ESCAPE: a multicentre cohort study and meta-analysis. *Eur. Respir. J.* 45, 38–50.
- 88 Raaschou-Nielsen O., Andersen Z.J., Beelen R., Samoli E., Stafoggia M., Weinmayr G., et al., 2013. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *Lancet Oncol.* 14, 813–822.
- 89 Andersen Z.J., Stafoggia M., Weinmayr G., Pedersen M., Galassi C., Jørgensen J.T., et al., 2017. Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Incidence of Postmenopausal Breast Cancer in 15 European Cohorts within the ESCAPE Project. *Environ. Health Perspect.* 125, 107005.
- 90 Filippini T., Heck J., Malagoli C., Del Giovane C., Vinceti M., 2015. A Review and Meta-Analysis of Outdoor Air Pollution and Risk of Childhood Leukemia. *J. Environ. Sci. Health Part C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev.* 33, 36–66.

¿Qué beneficios para la salud supone el cumplimiento de las recomendaciones oficiales?

Las Directrices de la OMS sobre la calidad del aire⁹¹ señalan unos límites de contaminantes atmosféricos que no deberían sobrepasarse para una adecuada protección de la salud. Estas recomendaciones se fundamentan en la evidencia científica mundial existente sobre los efectos de estos compuestos sobre la salud. Asimismo, proporcionan referencias para la formulación de políticas y orientan a los responsables de la gestión de la calidad del aire en el mundo.

Generalmente, la OMS plantea metas mucho más estrictas que las reguladas por las normativas sobre calidad del aire (ver figura 2). Cabe destacar, por ejemplo, que la recomendación de la OMS para $PM_{2,5}$ ($10 \mu g/m^3$) es menos de la mitad que el valor límite anual europeo ($25 \mu g/m^3$).

Mejorar la calidad del aire hasta alcanzar los límites que propone la OMS tendría un beneficio en la salud muy elevado, que

vendría acompañado de un sustancial ahorro económico. Los países pueden calcular la distancia que les separa de esos objetivos, estimar los efectos sobre la salud de sus actuales niveles de contaminación y los beneficios que serían logrados reduciendo tales niveles hasta los recomendados por la OMS. A modo de ejemplo, el proyecto europeo APHEKOM⁹² (2008-2011)⁹³ estimó el impacto de reducir hasta el valor guía anual de la OMS ($10 \mu g/m^3$), la exposición a largo plazo a $PM_{2,5}$ en 25 ciudades europeas (12 países), donde habita una población cercana a los 39 millones. Si la concentración de este contaminante no superara dicha recomendación, anualmente podrían evitarse 19.000 defunciones prematuras por todas las causas, de las cuales 2.719 se producirían en 6 ciudades españolas participantes del proyecto –Barcelona, Valencia, Sevilla, Bilbao, Granada y Málaga–. El ahorro económico estimado por este impacto en la salud ascendería a 31.500 millones de euros anuales para el conjunto de las ciudades participantes. Este coste, en términos de salud y monetarios, proporciona herramientas de decisión para la toma de medidas de control de la calidad del aire.

91 OMS, 2005. Air quality guidelines - global update 2005. ISBN 92 890 21926. WHO Regional Office for Europe, 496 pp. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/
WHO, 1999. WHO air quality guidelines for Europe. ISBN 92 890 1358 3. WHO Regional Publications. European Series; N° 91. 288 pp. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/pre2009/who-air-quality-guidelines-for-europe,-2nd-edition,-2000-cd-rom-version>

92 APHEKOM: Improving knowledge and communication for decision making on air pollution and health in Europe.

93 Pascal M., Corso M., Chanel O., Declercq C., Badaloni C., Cesaroni G., et al., Aphekom group, 2013. Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: results of the Aphekom project. *Sci. Total Environ.* 449, 390-400.

Parámetro de referencia	Valor límite anual		Valor límite diario		Valor límite horario	
	Directiva europea	OMS	Directiva europea	OMS	Directiva europea	OMS
PM ₁₀	40	20	50	50		
PM _{2,5}	Fase I: 25 (2015) Fase II: 20 (2020)	10		25		
NO ₂	40	40			200	
O ₃			120	100		
SO ₂			125	20	350	

Figura 2

Comparación entre los valores regulados por la Directiva europea de calidad del aire (2008/50/CE)⁹⁴ y los valores guía de la OMS (1999, 2005) para determinados contaminantes atmosféricos (expresados en µg/m³).

La reducción de la exposición a la contaminación siempre es beneficiosa para la salud, por lo que cuanto más se aproxime la legislación, y su cumplimiento, a la recomendación de la OMS mayor protección se espera. Los resultados mostrados por los científicos, tales como los del proyecto APHEKOM aportan nuevos argumentos para futuras regulaciones europeas sobre límites de concentración de contaminantes del aire y animan a invertir esfuerzos para alcanzar los valores guía de la OMS. De hecho, en 2013 se lanzó una nueva edición del Programa "Aire Puro para Europa"⁹⁵, que pretende un mayor acercamiento a las directrices de la OMS en 2030, lo que exigirá un esfuerzo elevado de reducción de emisiones. Si se alcanza este objetivo, la Comisión Europea estima que se evitarán 58.000 muertes

prematuras y se ahorrarán unos 40.000 millones de euros anuales en costes sanitarios. Cabe preguntarse por qué no se regula directamente el valor de la OMS para que la legislación sea más protectora. Atendiendo a criterios de salud pública y considerando limitaciones de toda índole, es obvio que la regulación y la gestión de la calidad del aire deberían orientarse hacia las concentraciones de contaminantes más bajas posibles. Sin embargo, la calidad del aire es dependiente de un contexto histórico, socioeconómico y político. De este modo, las normas establecen un marco legal que contempla el difícil equilibrio entre los riesgos para la salud, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos y otros diversos factores políticos y sociales, que a su vez dependerán del nivel de desarrollo y la

94 2008/50/CE. Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. DOUE L152 de 11.06.2008.

95 EC, 2013. The Clean Air Policy Package. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/air/clean_air_policy.htm

	Valores límite u objetivo de la UE		Valores guía de la OMS	
PM _{2,5}	7-8 %		82-85 %	
PM ₁₀	16-20 %		50-62 %	
O ₃	7-30 %		95-98 %	
NO ₂	7-9 %		7-9 %	
BaP	20-25 %		85-91 %	
SO ₂	<1 %		20-38 %	

Figura 3

Población urbana europea expuesta en 2013-2015 a niveles de concentración de contaminantes atmosféricos considerados nocivos.

Según los valores límite u objetivo de la Unión Europea (izquierda) y según los valores guía de la Organización Mundial de la Salud.⁹⁷

capacidad de los países para gestionar la calidad del aire. En cualquier caso, el compromiso político y social debería dirigirse hacia aquellas políticas y conductas que mejoran la calidad del aire y minimizan los riesgos para la salud. A pesar de los progresos realizados para controlar emisiones nocivas en las últimas décadas, en líneas generales, los países europeos aún se encuentran lejos de alcanzar estos valores recomendados por la OMS para una adecuada protección de la salud de la población. El informe de calidad del aire de 2017 de la Agencia Europea de Medio Ambiente⁹⁶ señala que en Europa ésta mejora lentamente, gracias a las políticas pasadas y presentes

y a los avances tecnológicos. Según este organismo los contaminantes más perjudiciales son el PM, el NO₂ y el O₃, a los que gran parte de la población se enfrenta a niveles insalubres. En 2015, el 7% de la población urbana de la Unión Europea estuvo expuesta a niveles de PM_{2,5} superiores al valor límite anual de la UE. Atendiendo al valor guía de la OMS, más estricto, ese porcentaje alcanza el 82% (ver figura 3). En España, el 32%, el 14% y el 5% de la población urbana estuvo expuesta en 2014 a niveles superiores al valor anual regulado en O₃, NO₂ y PM₁₀, respectivamente. En Europa, la lacra de respirar un aire contaminado por PM_{2,5} supone más de 400.000 muertes prematuras

96 EEA, 2017a. Air quality in Europe 2017. EEA Report, N° 13/2017. ISSN 1725-9177. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 80 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

97 EEA, 2017b. Mejorar la calidad del aire en las ciudades europeas resultará muy beneficioso para la salud, 7 pp. Noticias: <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/mejorar-la-calidad-del-aire>

anuales y un coste económico estimado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico entre 330.000 y 940.000 millones de euros, entre el 3% y el 9% del Producto Interior Bruto de la Unión Europea.

Otro contaminante que merece especial atención por el incremento en exposición en años recientes es el benzo(a)pireno (B(a)P). En España, hasta ahora, no se superaba el valor objetivo legislado para la protección de la salud humana y el medio ambiente. No obstante, este es uno de los contaminantes emergentes de los que seguro que hablaremos mucho más en el futuro, debido al aumento del uso de biomasa como fuente de energía⁹⁸. Su empleo de forma masiva preocupa en Europa por los potenciales efectos que ocasiona en la salud⁹⁹. El B(a)P y otros HAP son conocidos por sus efectos cancerígenos, cardiovasculares, neurotóxicos, genotóxicos e inmunotóxicos¹⁰⁰.

¿Cuáles son los principales retos para lograr un aire de calidad?

¿Qué aires nos traerá el futuro? No podemos permitirnos el lujo de dejar nuestra salud en el aire. La muerte prematura supone pérdida de vida, un daño que debería ser inaceptable para la sociedad. En vista del marcado impacto que supone la contaminación atmosférica, la mejora de la calidad del aire es ya una cuestión ineludible que el hombre debe afrontar sin más demora. La lucha activa contra este riesgo ambiental supone un reto mundial partiendo desde la escala local, que exige compromiso, concertación y actuación coordinada de todos los sectores sociales. Los avances en el conocimiento científico y en la percepción social de esta amenaza ambiental presionan a las autoridades gubernamentales para que realicen esfuerzos para proteger la salud de la población. Pero todavía queda mucho camino por recorrer que no estará exento de múltiples escollos y resistencias.

98 Sigsgaard T., Forsberg B., Annesi-Maesano I., Blomberg A., Bølling A., Boman C., et al., 2015. Health impacts of anthropogenic biomass burning in the developed world. *Eur. Respir. J.* 46, 1577-1588.

99 Guerreiro C.B.B., Horálek J., de Leeuw F., Couvidat F., 2016. Benzo(a)pyrene in Europe: Ambient air concentrations, population exposure and health effects. *Environ. Pollut.* 214, 657-667.

100 Agudelo-Castañeda D.M., Teixeira E.C., Schneider I.L., Lara S.R., Silva L.F.O., 2017. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM1.0 of urban environments: Carcinogenic and mutagenic respiratory health risk by age groups. *Environ. Pollut. Barking Essex* 1987 224, 158-170.

Chepelev N.L., Moffat I.D., Bowers W.J., Yauk C.L., 2015. Neurotoxicity may be an overlooked consequence of benzo(a)pyrene exposure that is relevant to human health risk assessment. *Mutat. Res. Rev. Mutat. Res.* 764, 64-89.

Aumento del conocimiento científico-técnico

La ciencia entiende probada la existencia de una relación causa-efecto entre la exposición a los contaminantes del aire y los efectos nocivos en la salud. Esto no significa que no existan incertidumbres en el conocimiento de esa relación, ni que haya un consenso pleno en todos los aspectos relativos al tema. Por un lado, es necesaria una mejor caracterización de la exposición de la población a contaminantes en el aire, incluyendo el posible efecto producido por comportamientos individuales y por los ambientes interiores. Además, los estudios epidemiológicos suelen emplear el enfoque “un contaminante-un efecto en salud,” a pesar de que estamos expuestos a una mezcla compleja de contaminantes. El desarrollo de modelos multi-contaminantes será pertinente para una mejor evaluación de impactos en salud. Por otra parte, la ciencia trabaja por la determinación de nuevos efectos en la salud, los mecanismos biológicos subyacentes, la cuantificación y la magnitud de los efectos o los costes socioeconómicos asociados. Igualmente, será oportuno realizar estudios de intervención, que valoran los beneficios que se producen en la salud como consecuencia de la implantación de medidas que mejoran la calidad del aire. Discernir todas esas cuestiones redundará en un avance para el diseño de medidas que reduzcan el daño de este factor de riesgo ambiental.

Firme voluntad política

Sabido es que la política está en el aire mismo que respiramos. Los planes de gestión de calidad del aire deberían basarse en estudios más precisos de exposición de la población y de impacto en la salud pública, sin olvidar los grupos de especial riesgo. Se requiere planteamientos globales y a largo plazo, con implantación de medidas de control de contaminación que salten la esfera más local y los marcos temporales de las legislaturas. Por otro lado, integrar el impacto de las políticas sectoriales sobre la salud debería ser una prioridad de los gobernantes, que deben actuar con valentía para la construcción y defensa de entornos saludables por encima de los intereses privados, comerciales o industriales. La apuesta debe ser por aquellas políticas que marcan la diferencia en el control del deterioro del aire y que prestan especial atención a los colectivos más afectados, evitando las desigualdades frente a los riesgos y garantizando la justa repartición de los beneficios para la salud.

Nuevos paradigmas de ciudades y recursos económicos

Los ambientes más sanos preservan mejor la salud, pero su generación suele requerir inversión económica. La prevención de los daños ocasionados por la contaminación atmosférica pasa básicamente por reducir la exposición de las poblaciones. Un nuevo paradigma urbano es necesario, que permita el progreso de la ciudad a la vez que integra

criterios de sostenibilidad y formas de vida contemporánea. La planificación del territorio, especialmente el urbano, debe desincentivar el uso del vehículo privado en aras de un mayor espacio para la movilidad y la convivencia ciudadana. La calidad de vida también se incrementa con un buen servicio de transporte público a precio asequible, con vías seguras para las bicicletas y con corredores verdes para peatones.

Mayor compromiso ciudadano

La calidad del aire está muy relacionada con la organización social, el comportamiento y los hábitos de los ciudadanos. Por tanto, la acción de la ciudadanía es imprescindible para sumar fuerzas en la lucha contra el aire contaminado. Sin embargo, las limitaciones cotidianas ligadas al marco de desarrollo de la vida –localización de la vivienda, acceso a infraestructuras, ritmos de vida, necesidad de ahorro de tiempo, etc.–, a los desplazamientos para realizar diferentes actividades –largos trayectos, lejanía de la red de transporte público, saturación de ciertas líneas, atascos, etc.– y a otras múltiples circunstancias, dificultan en gran medida los cambios y adaptaciones precisas para tener un mayor compromiso con el medio ambiente. El desarrollo efectivo de posibles iniciativas, como el teletrabajo, ayudarían a la protección del medio ambiente –menos desplazamientos al trabajo, menos consumo energético, menos ruido y emisiones, etc.–.

La responsabilidad cívica debe acompañarse de programas de educación ambiental que

conciencien de la magnitud del problema. Al mismo tiempo, las Administraciones públicas deben impulsar y facilitar el justo derecho de la participación ciudadana en la definición de intervenciones que repercutan sobre su salud. La participación comunitaria y de todos los grupos afectados en los procesos de gestión de este riesgo ambiental representa el derecho de las personas a estar informados y de tomar parte activa en las decisiones que modifican su contexto de vida.

Las evidencias científicas, por tanto, señalan que la contaminación atmosférica es un factor determinante de la calidad de vida y del estado de salud de la población. El aire deteriorado ocasiona una gran variedad de efectos agudos y crónicos de distinto grado de severidad, desde leves, como la tos, hasta graves, como la muerte prematura. Se relaciona, sobre todo, con daños en los sistemas cardiovascular –infartos, insuficiencia cardíaca, etc.–, y respiratorio –asma, EPOC, cáncer de pulmón, etc.–, así como con efectos prenatales –por ejemplo, bajo peso al nacimiento o parto prematuro–. Asimismo, cada vez son más concluyentes las alteraciones que se producen en el funcionamiento neurocognitivo, en etapas tempranas (neurodesarrollo) o más tardías (neurodegeneración). Respirar aire contaminado amenaza especialmente a niños, ancianos, embarazadas, enfermos crónicos y a personas con baja posición socioeconómica. Este panorama de enfermedad debe alentarnos para combatir la contaminación atmosférica, dado que se ha demostrado que la mejora de la calidad del aire se traduce en un impacto positivo en la salud pública. Más esfuerzos

deben dirigirse a conocer la exposición de la población, las patologías asociadas y la magnitud real del impacto en la salud derivado de la contaminación atmosférica. Diversas disciplinas científicas trabajan por aportar la mejor información posible para la acción política, que debería contemplar como

referencia las recomendaciones de la OMS para velar por entornos saludables. La conciencia ciudadana es también imprescindible para luchar contra el aire contaminado. Afortunadamente, la creciente percepción del deterioro ambiental nos conducirá a sumar fuerzas para lograr un aire de calidad.



Licenciada en Ciencias Químicas y Sociología, ha desempeñado diferentes puestos en la Administración Pública en el área de medio ambiente. Ha ocupado la Jefatura del Área de calidad del aire del Ministerio de Medio Ambiente. En la actualidad es Subdirectora General de Sostenibilidad en el Área de Medio Ambiente y Movilidad del Ayuntamiento de Madrid, siendo responsable de la dirección del sistema integral de vigilancia, predicción e información de la calidad del aire de Madrid y del Departamento de Educación Ambiental.

Ángeles Cristóbal

Subdirección General de Sostenibilidad,
Dirección General de Sostenibilidad y Control
Ambiental, Área de Gobierno de Medio
Ambiente y Movilidad, Ayuntamiento de Madrid

La normativa de calidad del aire en España y la Unión Europea

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo era la legislación de calidad del aire en España antes de las normas de la Unión Europea?
- ¿Cómo ha evolucionado la legislación europea en materia de contaminación del aire?
- ¿Qué nuevos parámetros y objetivos de calidad ha ido incorporando la legislación europea?
- ¿Qué cambios se han introducido en la legislación española en los últimos años?
- ¿Qué dificultades existen para implementar la legislación sobre calidad del aire en Europa?
- ¿Cómo funcionan las redes de vigilancia de la calidad del aire en España?
- ¿Con qué retos futuros se enfrenta la legislación?

Apunte inicial

El crecimiento industrial habido en España en la década de los sesenta tuvo como consecuencia el aumento significativo del número de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos en determinadas áreas. Ello generó que hubiera poblaciones sometidas a elevados niveles de contaminación fruto de la insuficiencia de las medidas correctoras incluidas en el Reglamento entonces vigente¹⁰¹.

Asimismo, en esas fechas el problema de la contaminación atmosférica tuvo una importancia relevante en el ámbito internacional. Hay que destacar que en el año 1972 tuvo lugar en Estocolmo la Conferencia sobre Medio Ambiente Humano organizada por las Naciones Unidas, donde la contaminación atmosférica transfronteriza fue uno de los principales puntos de análisis y debate.

¿Cómo era la legislación de calidad del aire en España antes de las normas de la Unión Europea?

Por tanto, la constatación, tanto en el ámbito nacional como internacional, del deterioro de la atmósfera y la necesidad de hacer compatible el crecimiento económico con la protección

del medio ambiente, llevó en España a la promulgación de la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico. Esta Ley, que puede calificarse como muy avanzada para su época, fue desarrollada mediante el Decreto 833/1975 y varias órdenes ministeriales de marcado carácter técnico que configuraron la legislación básica estatal.

Los principales instrumentos para la protección del ambiente atmosférico consistían en el establecimiento de un catálogo de actividades potencialmente contaminadoras y de niveles máximos de emisión y de inmisión, la creación de la red nacional de vigilancia y prevención de la contaminación atmosférica y la regulación de situaciones excepcionales de contaminación (situaciones de emergencia y zonas de atmósfera contaminada).

Desde 1977 hasta 1985 se declararon diez zonas de atmósfera contaminada: Gran Bilbao, Madrid, Cartagena, Punta del Sebo en Huelva, Badalona, Avilés, San Adrián de Besós, Langreo, Cassà de la Selva y Montcada y Reixac, donde era obligatorio aprobar un plan de actuaciones tendentes a la reducción de los altos niveles de contaminación fundamentalmente de dióxido de azufre (SO₂) y partículas en suspensión (PM). Posteriormente, esta legislación se fue adaptando para incorporar las más estrictas normas europeas que estaban en vigor cuando España ingresó en la Unión Europea en 1986, así como a la nueva configuración del Estado en cuanto a distribución de competencias en materia de vigilancia y control de la contaminación atmosférica. De este modo,

¹⁰¹ Hasta el año 1972, la normativa española sobre contaminación atmosférica se integraba en el Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas (RAMINP, Decreto 2414/1961 de 30 de noviembre).

se aprobaron los Reales Decretos 1613/1985 y 717/1987, por los que se modificaba parcialmente el Decreto 833/1975, y se establecían nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por SO₂ y PM –partículas totales en aquel momento, las cuales sustituían a humos negros que se venían controlando hasta entonces–, y posteriormente para el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el valor límite para el plomo (Pb) contenido en la atmósfera.

¿Cómo ha evolucionado la legislación europea en materia de contaminación del aire?

La política europea en materia de medio ambiente se remonta al Consejo Europeo celebrado en París en 1972, en el que los Jefes de Estado y de Gobierno, tras la primera conferencia de las Naciones Unidas sobre medio ambiente celebrada en Estocolmo, reconocieron la necesidad de establecer una política comunitaria en materia de medio ambiente que acompañara la expansión económica. Uno año después se aprobó el primer programa de acción en el que se fijaron propuestas legislativas y objetivos para la política ambiental de la Unión. Desde ese primer programa, la lucha contra la contaminación atmosférica ha estado siempre presente en los sucesivos programas. Proteger a los ciudadanos de la Unión frente a las presiones y riesgos ambientales para la salud y el bienestar, como

es la contaminación del aire, es uno de los objetivos prioritarios del actual VII Programa. El enfoque ha ido evolucionando a lo largo del tiempo desde una visión meramente correctiva y centrada fundamentalmente en el establecimiento de normas de carácter sectorial, a la visión actual con la aplicación de nuevos principios como el de prevención y con un nuevo enfoque integrador que tenga en cuenta no sólo los aspectos ambientales, sino también los socioeconómicos. De ahí la importancia cada vez mayor de la participación e información a los ciudadanos. Las primeras normas europeas (directivas) sobre calidad del aire se aprobaron en la década de los ochenta para establecer valores límite y guía, a largo plazo, de concentraciones para algunos contaminantes atmosféricos –SO₂, PM, Pb y NO₂–. El análisis de los resultados de la aplicación de esas directivas puso de manifiesto algunas carencias, entre las que se pueden destacar:

- La falta de resultados en la mejora de la calidad del aire para algunos contaminantes.
- La evaluación incompleta de la calidad del aire.
- La falta de comparabilidad de los datos de las mediciones –diferencia entre Estados Miembros en las estrategias de vigilancia, métodos de medición, calidad de las mediciones, etc.–.
- La insuficiente información a la población.

En el año 1996 se aprobó la Directiva marco de evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente, que supone un cambio en el enfoque de la legislación comunitaria. Previamente se había aprobado la Directiva sobre ozono (O₃) troposférico (Directiva 92/72/CEE), contaminante no regulado hasta entonces, donde se establecía por primera vez la obligatoriedad

por parte de las administraciones públicas de informar a la población por la superación de niveles de concentración fijados en la norma –umbrales de información– con el objetivo de proteger la salud de los ciudadanos, haciendo especial hincapié en los grupos de población especialmente sensibles.

La aprobación de dicha Directiva marco supuso un avance importante en el conocimiento de los problemas de contaminación atmosférica, al extender la obligación de evaluar la calidad del aire a todo el territorio europeo y donde el objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente en su conjunto.

¿Qué nuevos parámetros y objetivos de calidad ha ido incorporando la legislación europea?

Además, se introdujeron parámetros novedosos, como los umbrales de evaluación, para determinar el método de evaluación a aplicar en función de los niveles de concentración y nuevos contaminantes como metales pesados distintos del plomo –arsénico (As), níquel (Ni), cadmio (Cd) y mercurio (Hg)– e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). La necesidad de evaluar siguiendo métodos y criterios comunes

motivó que se incluyeran directrices para la implantación de los puntos de muestreo en los casos de medición obligatoria. Todo ello para asegurar que la información recabada sobre la contaminación atmosférica fuera suficientemente representativa y comparable en todo el territorio de la Unión Europea.

Se definieron objetivos de calidad, niveles de concentración, que no deben ser superados con el fin de evitar los efectos perjudiciales sobre la salud humana y el medio ambiente, primordial objetivo de la legislación. Se incorporaron nuevos conceptos como umbrales de información, umbrales de alerta, niveles para protección de la vegetación. También se vieron reforzadas las obligaciones de información de los Estados Miembros (EEMM) a la Comisión Europea (CE), lo que daría lugar a la aprobación de normas específicas (Decisiones) para fijar formatos normalizados de intercambio de información y datos en materia de calidad del aire.

Como desarrollo de la Directiva marco se aprobaron posteriormente cuatro directivas denominadas “hijas” hasta cubrir los trece contaminantes contemplados:

- Directiva 1999/30/CE relativa a los valores límite de SO_2 , NO_2 y NO_x , PM_{10} y Pb en el aire ambiente¹⁰².
- Directiva 2000/69/CE sobre los valores límite para el benceno (C_6H_6) y el monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente¹⁰³.

102 Directiva 1999/30/CE relativa a los valores límite de SO_2 , NO_2 y NO_x , PM_{10} y Pb en el aire ambiente. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:163:0041:0060:ES:PDF>

103 Directiva 2000/69/CE sobre los valores límite para el benceno (C_6H_6) y el monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2000:313:0012:0021:ES:PDF>

- Directiva 2002/3/CE, relativa al O₃ en el aire ambiente¹⁰⁴.
- Directiva 2004/107/CE relativa al As, Cd, Hg y Ni y los HAPs en el aire ambiente¹⁰⁵.

Además, en este período, en el año 2001, se puso en marcha el programa CAFE (Clean Air for Europe, “Un aire puro para Europa”) para el análisis técnico y la elaboración de medidas, con el principal propósito de desarrollar una estrategia integrada a largo plazo para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos de la contaminación atmosférica. Después de más de tres años de actividades a través de varios grupos de trabajo con una amplia representación: EEMM, CE y otros organismos internacionales como la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas (UNECE), la Oficina europea de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y grupos interesados (asociaciones industriales europeas y organizaciones ambientalistas) dicha estrategia fue aprobada el 21 de septiembre de 2005. En ella se fijaron objetivos para 2020 de reducción de las emisiones de los principales contaminantes para proteger a los ciudadanos de la UE de la exposición al PM₁₀ y PM_{2,5} y al O₃ en la atmósfera y a los ecosistemas europeos de la lluvia ácida, el exceso de nutrientes de nitrógeno (N) y el O₃.

Asimismo, se propuso la actualización de la legislación vigente: la simplificación y mejora de la legislación existente en materia de calidad del aire ambiente y de la Directiva sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes. El cumplimiento de ese mandato dio lugar a la aprobación de la Directiva 2008/50, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa¹⁰⁶.

¿Qué cambios se han introducido en la legislación española en los últimos años?

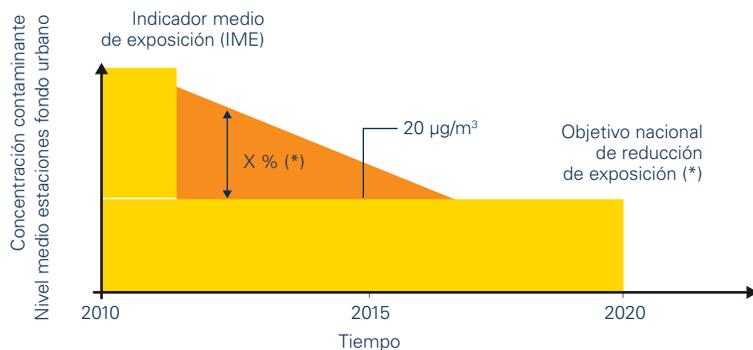
La necesidad de actualizar y modernizar la legislación básica española llevó a la aprobación en 2007 de la Ley de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera (Ley 34/2007 de 15 de noviembre¹⁰⁷). Con esta ley se disponía de un nuevo marco normativo acorde con las exigencias del ordenamiento jurídico y administrativo vigente en España y con los principios que definen y orientan la política ambiental de la Unión europea, dando cabida a los planteamientos y requisitos técnicos que

104 Directiva 2002/3/CE, relativa al O₃ en el aire ambiente. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:067:0014:0030:ES:PDF>

105 Directiva 2004/107/CE relativa al As, Cd, Hg y Ni y los HAPs en el aire ambiente. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0107&from=ES> Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-1645>

106 Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:Es:PDF>

107 Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-19744>



(*) 20% Si $18 > \text{IME} > 22 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 15% Si $13 > \text{IME} < 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 10% Si $8,5 > \text{IME} < 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$
 0% Si $\text{IME} \leq 8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 1

Objetivo de reducción de la exposición entre 2010 y 2020 de la Directiva 2008/50/CE.

Basado en el indicador medio de exposición (IME) nacional y calculado mediante la media trienal en ubicaciones urbanas de fondo.

conforman el acervo comunitario en materia de contaminación atmosférica y el derivado de los correspondientes convenios internacionales. En la legislación europea, la Directiva 2008/50/CE fusionó en una única norma las tres primeras Directivas hijas y la Decisión de intercambio de información e intentó incorporar los últimos avances sanitarios y científicos en la materia. Las novedades y modificaciones más relevantes introducidas en esta Directiva fueron las siguientes:

- La regulación del material particulado $\text{PM}_{2,5}$. No debían considerarse del mismo modo que otros contaminantes atmosféricos debido a sus importantes repercusiones negativas para la salud humana y al hecho de que no existiese un umbral por debajo del cual el $\text{PM}_{2,5}$ resultaran inofensivas. Por eso se le da un nuevo enfoque combinado tendente a conseguir una reducción general de las concentraciones en el medio urbano, para

garantizar que amplios sectores de la población puedan disfrutar de una mejor calidad del aire y, a la vez, asegurar un grado mínimo de protección de la salud en todas las zonas.

De este modo se fijó un valor límite para aplicar en todo el territorio, que en una primera etapa debía ir precedido de un valor objetivo, y un indicador medio de exposición de la población calculado a partir de las concentraciones de estaciones urbanas de fondo (ver figura 1), seleccionadas por los EEMM, sobre el que se aplicaría un porcentaje de reducción en función de la concentración de partida –objetivo nacional de reducción de la exposición que debe alcanzarse, en la medida de lo posible, en el plazo de diez años–.

Esto significa que tal objetivo puede ser diferente en cada EM y supone un criterio novedoso en la legislación europea. La justificación es actuar con mayor intensidad donde haya mayor exposición de la población a ese contaminante

y por ello se basa en las concentraciones alcanzadas en estaciones urbanas de fondo que son las que representan mejor la exposición a la contaminación. Al mismo tiempo se renunció a poner en marcha la fase II para PM_{10} contemplada en la Directiva 1999/30/CE que recogía los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

- Ampliación del concepto de contaminante –toda sustancia que pueda tener efectos nocivos sobre la salud o el medio ambiente en su conjunto– con respecto al que figuraba en la Directiva marco de 1996 en la que se optaba por el origen antropogénico –toda sustancia introducida directa o indirectamente por el hombre–.
- Mayor atención a los fenómenos naturales: se incluyen los aerosoles marinos, se mantiene la resuspensión atmosférica y el transporte de partículas procedentes de regiones áridas y el compromiso de aprobar directrices para la demostración y sustracción de superaciones atribuibles a fuentes naturales.
- Mayor comparabilidad entre los países europeos: mayor detalle de los criterios de macro y microimplantación de estaciones de medición, exigencia de una distribución de estaciones según la tipología definida en la norma –tráfico, urbana de fondo y suburbana–.

En la Directiva se recogía la obligación de revisión de las disposiciones relativas al $PM_{2,5}$ y,

en su caso, a otros contaminantes, teniendo en cuenta, los siguientes elementos:

- La información científica más reciente de la OMS y demás organizaciones pertinentes.
- Las distintas situaciones de la calidad del aire y los potenciales de reducción en los EEMM.
- La revisión de la Directiva 2001/81/CE, sobre techos nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos.
- Los progresos registrados en la aplicación de las medidas comunitarias de reducción de contaminantes del aire.

Además de la Directiva 2008/50/CE, sigue vigente la Directiva 2004/107/CE relativa al As, Cd, Hg y Ni y los HAPs en el aire ambiente, aunque en este caso los valores normativos son objetivo y no límite, como es el caso de la mayoría de los contaminantes incluidos en la Directiva 2008/50/CE (ver figura 2).

En 2013¹⁰⁸, siguiendo el mandato de la Directiva, se procedió a la revisión y se aprobó en diciembre de ese año el nuevo paquete de medidas para mejorar la calidad del aire en Europa que consistía en:

- Un nuevo Programa «Aire Puro» para Europa, con medidas para garantizar que se cumplan los objetivos existentes a corto plazo, y nuevos objetivos de calidad del aire para el período que va hasta 2030. El conjunto de actuaciones incluye también medidas para ayudar a reducir la contaminación atmosférica, centradas en la

108 Decisión 1386/2013/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de noviembre de 2013 relativa al Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020 «Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta» <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2013:354:FULL&from=ES>

Figura 2

Valores legislados en la normativa europea y valores guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

OBJETIVOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD			
Contaminante	Valor límite / objetivo / umbral de alerta	Concentración (legislación UE)	Valores guía OMS
PM ₁₀	Media anual	40 µg/m ³	20 µg/m ³
	Media diaria	50 µg/m ³ (máximo 35 días / año)	50 µg/m ³
PM _{2,5}	Media anual	25 µg/m ³	10 µg/m ³
	Índice Medio Exposición Media anual. (estaciones de fondo urbano)	20 µg/m ³	
SO ₂	Media diaria	125 µg/m ³ (máximo 3 días/año)	
	Media horaria	350 µg/m ³ (máximo 24 horas/año)	
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	500 µg/m ³	
NO ₂	Media anual	40 µg/m ³	
	Media horaria	200 µg/m ³ (máximo 18 horas /año)	
	Umbral de alerta (3 horas consecutivas en área representativa de 100 km o zona o aglomeración entera)	400 µg/m ³	
Pb	Media anual	0,5 µg/m ³	
CO	Media máxima octohoraria diaria	10 mg/ m ³	
C ₆ H ₆	Media anual	5 µg/m ³	
O ₃	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias	120 µg/m ³ (máximo 25 superaciones en un promedio de 3 años)	100 µg/m ³
	Umbral de información (media horaria)	180 µg/m ³	
	Umbral de alerta (media horaria)	240 µg/m ³	
Arsénico	Media anual	6 ng/ m ³	
Cadmio	Media anual	5 ng/ m ³	
Niquel	Media anual	20 ng/ m ³	
Benzo (a) pireno	Media anual	1 ng/ m ³	

OBJETIVOS PARA LA PROTECCIÓN DE LA VEGETACIÓN

Compuesto	Nivel crítico/ valor objetivo	Concentración
SO ₂	Media anual o invernal	20 µg/m ³
NO _x	Media anual	30 µg/m ³
Ozono	AOT 40 (mayo a julio) Objetivo a largo plazo: AOT 40 (mayo a julio)	18.000 µg/m ³ ·ha promediados en un período de cinco años 6.000 µg/m ³ ·ha

mejora de la calidad del aire en las ciudades, el apoyo a la investigación y la innovación, y la promoción de la cooperación internacional.

- Una revisión de la Directiva sobre límites máximos nacionales de emisión, con unos límites máximos nacionales de emisión más estrictos para los seis contaminantes principales.
- Una propuesta de nueva Directiva para reducir la contaminación procedente de las instalaciones de combustión de tamaño medio (1-50 MW), como las centrales energéticas para bloques de viviendas o edificios grandes, y las instalaciones industriales pequeñas.

Por tanto no se considera conveniente reformar sustancialmente la normativa sobre calidad del aire ambiente, sino que la estrategia es centrarse en conseguir que se cumplan las normas vigentes a lo más tardar en el año 2020.

La Directiva 2008/50/CE ha sido modificada por la Directiva 2015/1480 en varios de sus anexos sobre normas relativas a los métodos de referencia, la

validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo y ha sido incorporada al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 39/2017, de 27 de enero¹⁰⁹.

¿Qué dificultades existen para implementar la legislación sobre calidad del aire en Europa?

Se ha producido sin duda un avance en la implantación en cuanto a los requisitos técnicos fijados para una completa y rigurosa evaluación de la calidad del aire: mejor cobertura y representatividad de los puntos de medición, mejor calidad de los datos y mayor comparabilidad.

En cuanto a los niveles de contaminación, año tras año los informes elaborados por la Agencia europea de Medio Ambiente (AEMA)

¹⁰⁹ Real Decreto 39/2017, de 27 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2017-914

con los datos oficiales de los EEMM ponen de manifiesto que, a pesar de las mejoras en la reducción de las concentraciones de algunos contaminantes, muchos países siguen sin cumplir las normas europeas sobre la calidad del aire y que el incumplimiento de las directrices de la OMS sobre la contaminación atmosférica es general, especialmente en zonas urbanas, lo que da lugar a que una gran proporción de población europea esté expuesta a niveles de contaminantes superiores a los estándares europeos y especialmente los más estrictos valores guía de la OMS.

El último informe referido a 2015¹¹⁰ revela que 19% de las estaciones europeas superan el valor límite diario de PM₁₀, el 41% el valor objetivo de O₃ y el 10% el valor límite anual de NO₂. Estos porcentajes son mucho más elevados si tomamos los valores guía de la OMS que para PM₁₀, PM_{2,5} y O₃ son más estrictos. El incumplimiento de los valores límite legislados ha llevado al inicio de procedimientos de infracción contra varios EEMM, entre ellos España. El elevado volumen de tráfico motorizado que soportan muchas zonas de Europa, sobre todo ciudades, y las altas emisiones de los vehículos, incluso los de normas Euro más recientes, constituyen la principal causa de los altos niveles de contaminantes y el consiguiente incumplimiento de los límites establecidos.

¿Cómo funcionan las redes de vigilancia de la calidad del aire en España?

La vigilancia de la calidad del aire podría definirse como el conjunto de sistemas o procedimientos para determinar la presencia de agentes contaminantes en la atmósfera, así como la evolución de sus concentraciones tanto en el tiempo como en el espacio, con el fin de prevenir y en su caso reducir los efectos que pueden causar sobre la salud humana y el medio ambiente.

Las primeras redes de vigilancia se instalaron a finales de los años sesenta y se han ido adaptando según evolucionaban las situaciones y características de la contaminación y se disponía de un mayor conocimiento de la química atmosférica y de los efectos de los contaminantes que a su vez ha supuesto una evolución de los criterios de la legislación aplicable. Como se ha comentado anteriormente, es a partir de la Directiva marco 96/62 cuando, ante la falta de armonización en este campo, se fijan criterios para la ubicación de estaciones de medición. Estos criterios se han ido ampliando con las modificaciones introducidas por la Directiva 2008/50/CE y la más reciente Directiva 2015/1480¹¹¹.

110 AEMA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, EEA Report No 13/2017, 74pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

111 Directiva 2015/1480 de la Comisión de 28 de agosto de 2015 por la que se modifican varios anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en los que se establecen las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L1480&from=ES>

El criterio de población determina el mínimo número de puntos de muestreo y se establece la proporción de estaciones de tráfico o de fondo urbano (lugares situados en zonas urbanas cuyos niveles sean representativos de la exposición de la población urbana en general). Se distingue por tipo de contaminante, con un tratamiento diferenciado para el caso del O₃ troposférico por sus especiales características de contaminante secundario que llevan a exigir un mínimo de estaciones de tipo suburbano para medir los máximos de concentración. También se definen requisitos de macro y microimplantación. Junto con detalles concretos como indicaciones sobre la toma de muestras, distancias a vías de tráfico, etc., se expresa la necesidad de que la ubicación sea tal que evite el que se midan microambientes muy pequeños y que sea representativa de la exposición de la población o de la vegetación y los ecosistemas naturales, según el objetivo de la estación. En la Directiva 2015/1489 se recoge la obligatoriedad de documentar y reevaluar la elección de los emplazamientos al menos cada cinco años para que los criterios de selección, el diseño de la red y la ubicación de los puntos de control sigan siendo válidos y óptimos a lo largo del tiempo. Además, la CE supervisará la aplicación de criterios para la selección de puntos de muestreo para facilitar una aplicación armonizada.

A pesar de que en las Directivas más recientes se incluye un mayor grado de detalle en las condiciones y requisitos que deben cumplir los emplazamientos, los criterios siguen siendo demasiado generales lo que da lugar a diferencias entre zonas europeas. Sería de gran ayuda para los gestores de redes

contar con guías o directrices que incluyan metodologías que ayuden a determinar la representatividad de las estaciones, elemento clave para el diseño óptimo de un sistema de vigilancia, sin olvidar sistemas que garanticen de forma cada vez más exhaustiva y exigente la calidad de los datos obtenidos por los sistemas de medición.

¿Con qué retos futuros se enfrenta la legislación?

La mejora de la calidad del aire en Europa implica una mayor exigencia en cuanto al control de emisiones de todo tipo de focos. Las nuevas iniciativas legislativas incluidas en el paquete de medidas de 2013, junto con el cambio del Reglamento que regula los procedimientos de ensayo para que reflejen las emisiones reales de los vehículos, tendrán un efecto sin duda importante pero en un plazo mayor del que hubiera sido deseable para conseguir una reducción de la población expuesta a niveles de contaminación.

La legislación europea debe converger en el plazo más breve posible con los valores guía de la OMS. En la actualidad los valores límite de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}) son muy superiores en las normas europeas y contrasta con la legislación de otros países como es el caso de Estados Unidos (ver figura 3). La regulación de las partículas en suspensión deberá someterse a una profunda revisión para hacerla más estricta y así proteger en mayor medida la salud de los ciudadanos de

CONTAMINANTE (Partículas en suspensión)	PROMEDIO	NIVEL
PM _{2,5}	Media anual (promediada sobre tres años)	12,0 µg/m ³
	Media diaria percentil 98 (promediada sobre tres años)	35 µg/m ³
PM ₁₀	Media diaria. No más de una superación al año en un período de tres años	150 µg/m ³

Figura 3

Estándares de material particulado de US-EPA.

Estándares primarios: para la protección de la salud, incluyendo población sensible tales como asmáticos, niños y ancianos.

Estándares secundarios: para protección del bienestar de la población y animales, cultivos, vegetación y edificaciones.

Fuente: US-EPA-Particulate Matter (PM) Standards.

la Unión Europea. Habrá de evaluarse tanto si la métrica actual es la más adecuada, si es necesario analizar nuevos componentes del PM_{2,5} –como carbono negro, o BC–, así como los resultados de la aplicación del criterio de exposición –indicador y objetivo de reducción aplicado de manera diferenciada en cada EM introducido por la Directiva 2008/50/CE–.

Paralelamente, y dada la complejidad de los procesos atmosféricos a todas las escalas, es necesario profundizar en su conocimiento, para poder definir las mejores estrategias tanto para el diagnóstico como para la búsqueda de medidas efectivas para reducir los niveles de contaminación atmosférica pero también en su relación con el calentamiento global.



Catedrático de Estratigrafía y profesor de Recursos Energéticos y Geología del Petróleo. Miembro de la "Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona". Asesor en materia energética de las administraciones central y autonómica, así como de otras instituciones públicas y privadas.

Mariano Marzo

Departamento de Dinámica de la Tierra y el Océano. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad de Barcelona

Energía y contaminación del aire en el mundo. El papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire

Preguntas clave del artículo

- ¿Cuál es la situación actual en el mundo en lo referente a la relación entre energía y contaminación del aire?
- ¿Qué factores determinan la contaminación del aire en áreas urbanas?
- ¿Cómo se puede hacer frente a la contaminación del aire relacionada con la energía?
- ¿Qué escenarios de futuro globales se contemplan sobre la contaminación del aire relacionada con la energía?
- ¿Cuál ha de ser el papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire?

Apunte inicial

En las áreas urbanas del mundo, más de ocho personas de cada diez viven expuestas a concentraciones de contaminantes del aire – sólidos, líquidos o gases que tienen un impacto negativo sobre las personas y el medio ambiente circundante– que superan las estipuladas como admisibles por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en sus Guías de Calidad del Aire¹¹². El resultado son alrededor de 6,5 millones de muertes prematuras cada año y enormes pérdidas para la economía (4% del PIB¹¹³). De hecho, la contaminación del aire es el cuarto factor de riesgo para la salud humana a nivel mundial, por detrás de la hipertensión arterial, la dieta alimentaria y el tabaquismo¹¹⁴. Entre los principales contaminantes del aire –dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado fino (PM_{2,5}), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y amoníaco (NH₃) (ver figura 1) – el PM_{2,5} es el más peligroso para la salud humana, seguido por el SO₂, los NO_x y el O₃¹¹⁵.

¿Cuál es la situación actual en el mundo en lo referente a la relación entre energía y contaminación del aire?

Entre todas las actividades humanas, el sector energético es, con mucho, la principal fuente de emisiones contaminantes de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Asimismo, la producción y el uso de energía, principalmente la proveniente de combustibles fósiles y biomasa, es también responsable de una gran proporción de las emisiones de tres importantes contaminantes: SO₂, NO_x y PM primario (es decir emitido directamente y no formado en la atmósfera a partir de precursores gaseosos)¹¹⁶. Dichos contaminantes son los que tienen un mayor impacto en la calidad del aire, ya sea directamente o mediante su transformación en otros contaminantes a partir de reacciones químicas en la atmósfera. De manera simplificada podemos considerar que a nivel global las emisiones de SO₂, NO_x

112 OMS, 2006. WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulphur Dioxide - Global Update 2005, WHO, Geneva, 20 pp. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

113 World Bank, 2016. The Cost of Air Pollution: Strengthening the economic case for action, 102 pp <http://documents.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/pdf/108141-REVISED-Cost-of-PollutionWebCORRECTEDfile.pdf>

114 Lim et al., 2012. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. The Lancet Volume 380, No. 9859, 2224–2260, [http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(12\)61766-8/abstract](http://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(12)61766-8/abstract)

115 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, 74 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

116 En consecuencia, dicho sector debe situarse al frente de cualquier estrategia de mejora de la calidad del aire, tal y como lo reconocen las administraciones de muchos países, cada vez más comprometidas con la mitigación del problema. Más concretamente, a la hora de abordar la problemática relacionada con la calidad del aire, las principales actividades y sectores relacionados con la energía son: las plantas de generación de electricidad alimentadas por carbón y fueloil, el transporte (coches, camiones, vehículos de dos ruedas, trenes, aviones y barcos), el uso residencial de biomasa y combustibles fósiles (cocina, calefacción y alumbrado), los procesos industriales y las actividades mineras.

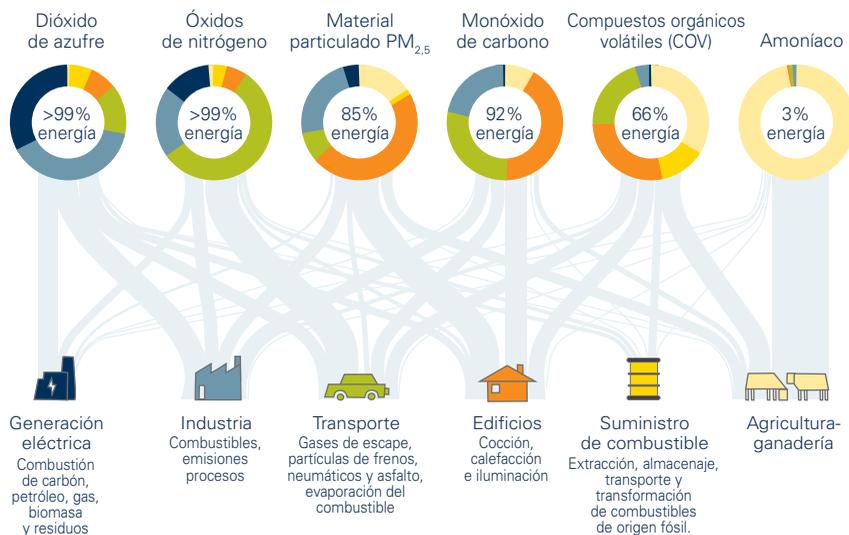


Figura 1

Principales contaminantes primarios del aire y sus fuentes (2015).

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

y PM se relacionan con dos realidades: 1) la pobreza, y 2) un modelo de desarrollo y urbanización fundamentado en el uso intensivo de los combustibles fósiles.

Por lo que respecta al primer punto, cabe recordar que la madera, el carbón y otros combustibles sólidos (residuos animales y agrícolas), utilizados por más de 2.700 millones de personas en todo el mundo para cocinar, junto al queroseno, utilizado para la iluminación (y en algunos países también para cocinar), generan un ambiente interior y exterior muy cargado en humos que se asocia con alrededor de 3,5 millones de muertes prematuras por año. Un efecto particularmente notorio en los países en vías de desarrollo de Asia y del África Subsahariana, donde la combustión

incompleta de la biomasa es la responsable de más del 50% de las emisiones de PM. Es precisamente el PM_{2,5}, inhalado en el interior de los hogares o en el exterior, el que es particularmente perjudicial para la salud por su alta capacidad de penetración en los pulmones.

En lo referente al uso intensivo de los combustibles fósiles, cabe recordar que el carbón y el petróleo han impulsado el crecimiento económico en muchos países, a pesar de que su combustión en las plantas de generación de electricidad, instalaciones industriales y el transporte, es la principal causa de la contaminación al aire libre, lo que comporta un saldo de alrededor de 3 millones de muertes prematuras al año.

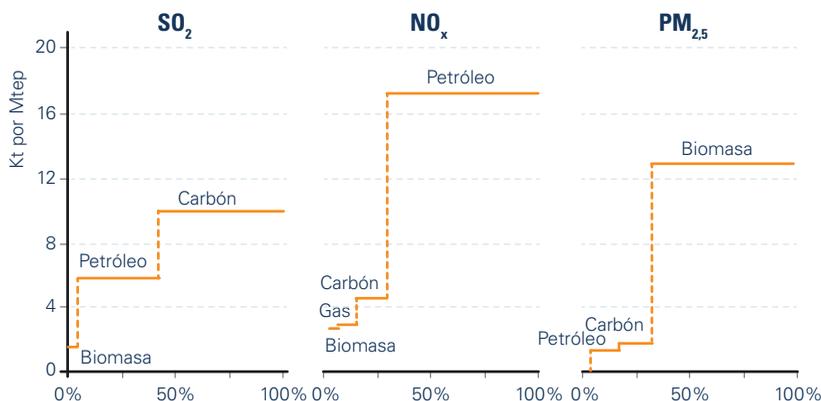


Figura 2

Factores de emisiones medias globales y porcentajes de los principales contaminantes, según el tipo de energía primaria.

Se representan los combustibles más relevantes en términos de factores de emisión; los combustibles no mostrados se consideran insignificantes. Los factores de emisión promedio globales se calculan para todo tipo de actividades sectoriales y todos los tipos de tecnologías.

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

Según la Agencia Internacional de Energía⁶, el carbón es responsable de cerca del 60% de las emisiones globales de SO₂ relacionadas con la combustión, lo que se traduce en enfermedades respiratorias, sin olvidar que el SO₂ es un precursor de la lluvia ácida. Los combustibles utilizados en el transporte, de manera muy especial el diésel, generan más de la mitad de los NO_x emitidos en mundo, unos contaminantes que pueden desencadenar problemas respiratorios y la formación de PM_{2,5} secundario y O₃ troposférico¹¹⁷.

Las ciudades pueden convertirse fácilmente en focos de contaminación, en la medida que concentran población, consumo energético, actividad constructora y tráfico. El impacto

de las emisiones del vehículo urbano se ve amplificado por el hecho de que éstas son liberadas, no desde altas chimeneas, sino directamente al nivel de la calle, incorporándose así al aire que es respirado por los peatones. En los tres apartados siguientes se detallan las relaciones existentes entre las fuentes de energía primaria y los tres tipos de emisiones contaminantes citadas en los párrafos precedentes, así como las existentes entre tales emisiones y los principales sectores económicos relacionados con la transformación de la energía primaria y su uso final (ver figura 2), aportándose asimismo datos sobre la situación en algunos grandes países y regiones (ver figuras 3 a 6) así como en las áreas urbanas (ver figura 7).

117 International Energy Agency, 2016. Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report, IEA Paris., 242 pp. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>

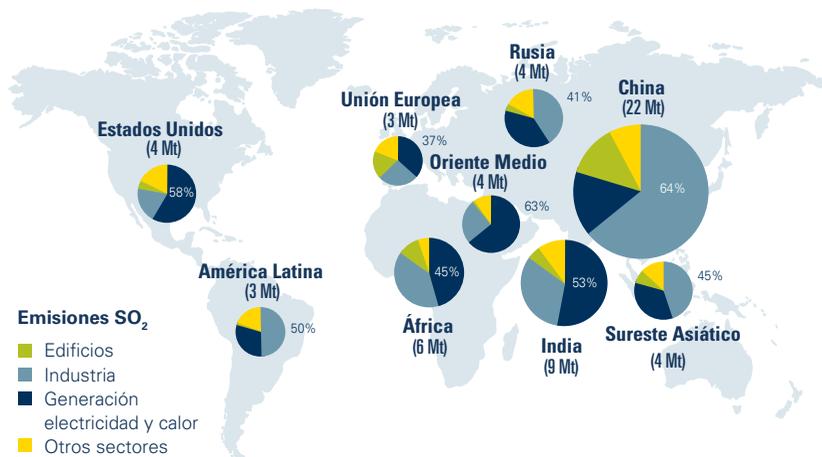


Figura 3

Emisiones de SO₂ relacionadas con la energía, por región y sector económico (2015).

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

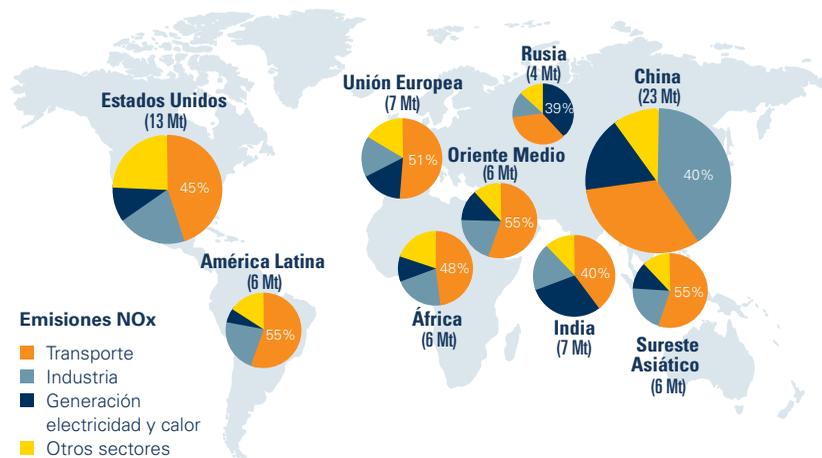


Figura 4

Emisiones de NO_x relacionadas con la energía, por región y sector económico (2015).

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

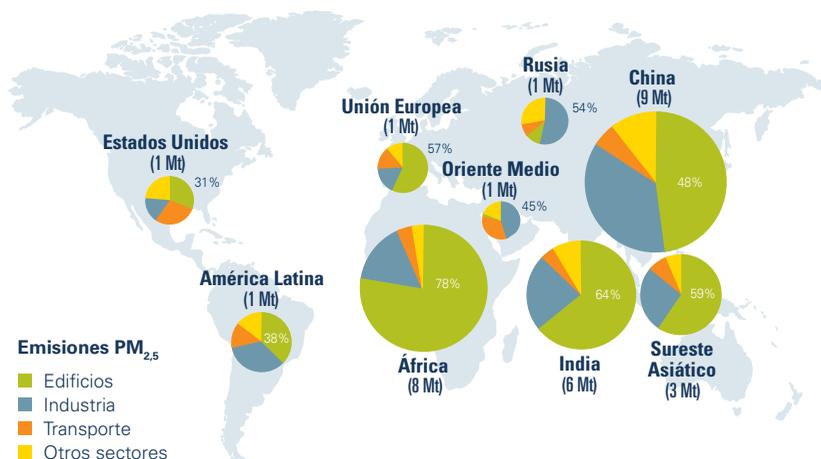


Figura 5

Emisiones de PM relacionadas con la energía, por región y sector económico (2015).

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

Energía primaria y principales contaminantes del aire

A pesar de la creciente atención prestada a las fuentes de energía bajas en carbono, los combustibles fósiles continúan dominando el mix energético global. El porcentaje correspondiente al consumo mundial de carbón, petróleo y gas natural se ha mantenido sorprendentemente estable durante los últimos veinticinco años: estos combustibles representaban en 1989 el 81% del consumo total de energía, un porcentaje prácticamente idéntico al de 2014. Durante dicho periodo, el porcentaje correspondiente al petróleo descendió del 37% al 31%, mientras que el del gas natural aumentó del 19% al 21% y el del carbón del 25% al 28%. Por otra parte, el papel de la biomasa también ha permanecido estable,

cubriendo alrededor del 10% de las necesidades energéticas globales.

Las relaciones entre los combustibles arriba citados, su uso y las emisiones resultantes no son inmediatas. No todos los combustibles emiten todos los tipos de contaminantes y además, para un mismo combustible, la cantidad de estos últimos difiere según las diferentes calidades o grados, así como las condiciones tecnológicas del proceso que los utiliza. Los contaminantes pueden reducirse o incluso eliminarse de los combustibles en varios momentos antes de su combustión (por ejemplo, mediante el lavado del carbón y durante el refinado del petróleo). Asimismo, la naturaleza misma del proceso de combustión (como es el caso de la temperatura alcanzada) puede influir en los niveles de emisión y también pueden utilizarse tecnologías post-

combustión (como, por ejemplo, precipitadores electrostáticos, desulfurizadores y tecnologías De-NO_x) para alterar químicamente o capturar las emisiones perjudiciales. Todo esto significa que no existe un único nivel de emisiones por unidad de combustible empleado, sino más bien un rango de emisiones que depende, entre otras, de las variables citadas. En cualquier caso, lo que sí está claro es que cada uno de los diferentes combustibles (carbón, petróleo, gas natural o biomasa) juega un papel específico en lo que respecta a los principales tipos de emisiones contaminantes del aire, tanto en términos de la cantidad de dichas emisiones por unidad de combustible utilizado, como en términos de su porcentaje sobre el total (ver figura 2).

Los óxidos de azufre (SO_x) y, en particular, el SO₂, provienen del azufre contenido en proporciones variables en el carbón, el petróleo y en mucha menor proporción la biomasa¹¹⁸. (ver figura 3). Si este elemento no es eliminado previamente, la combustión de las fuentes energéticas citadas puede liberar a la atmósfera SO_x (salvo tratamiento o captura de dichas emisiones). El uso del carbón (y en mucha menor medida del petróleo y de la biomasa, por este orden) es el principal responsable de la contaminación por SO₂, emitiendo la máxima cantidad de este compuesto por unidad de energía empleada –10 kilotoneladas (kt) por cada millón de toneladas equivalentes de petróleo o Mtep)– y contabilizando más del 50% de la

emisiones de SO₂ relacionadas con la energía. De todas maneras, para contextualizar mejor las cifras mencionadas, resulta oportuno recordar que en el caso de las plantas de generación de electricidad alimentadas por carbón, dependiendo de la calidad de este combustible, la eficiencia de la planta y los mecanismos tecnológicos de control de emisiones, las cantidades medias de SO₂ inyectadas a la atmósfera varían de menos de 1kt/Mtep a más de 30 kt/Mtep.

Los NO_x, particularmente el óxido y el dióxido de nitrógeno (NO y NO₂, respectivamente) son fruto de procesos de combustión a altas temperaturas debido a la oxidación del nitrógeno (N₂) atmosférico cuando se sobrepasa un umbral determinado de temperatura. La combustión de los derivados del petróleo lidera las emisiones de NO_x, representando cerca del 75% del total de las mismas¹¹⁹ (ver figura 4). En todo caso, conviene destacar que el factor de emisiones de NO_x varía ampliamente para cada combustible en los diferentes sectores de uso final de la energía, en función de las opciones tecnológicas y los sistemas post-tratamiento. Así, por ejemplo, un coche de gasolina con catalizador puede emitir 1,4 kt de NO_x por Mtep, mientras que un camión diésel sin sistema catalizador puede emitir más de 50 kt de NO_x por Mtep. El PM es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas en estado sólido o líquido. El tamaño de estas partículas es un factor muy importante a la hora de calibrar su impacto

118 International Energy Agency, 2016. Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report, IEA Paris., 242 pp. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>

119 International Energy Agency, 2016. Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report, IEA Paris., 242 pp. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>

negativo sobre la salud de la población. Las partículas “gruesas” ($PM_{2,5-10}$) con un diámetro de entre 2,5 y 10 micras (μm) suelen tener un impacto menos severo que las más “finas” ($PM_{2,5}$) con un diámetro por debajo de los 2,5 μm . La principal fuente de energía primaria responsable de la emisión de PM es la biomasa, seguida a distancia por el carbón y el petróleo (ver figura 2). Las emisiones de PM por la biomasa promedian 13 kt/Mtep, representando cerca del 65-70% de todas las emisiones de PM relacionadas con la energía.

Debe destacarse que en todos los casos (SO_2 , NO_x y PM) el gas natural presenta unas emisiones de contaminantes del aire mucho más bajas que carbón, petróleo y biomasa, siendo prácticamente nulas en el caso del SO_2 ya que, por razones de seguridad y para evitar la corrosión de los gasoductos durante el transporte, debe procederse a eliminar el azufre lo más pronto posible tras la extracción del gas del yacimiento.

Principales contaminantes del aire relacionados con la energía (según la actividad económica y región en 2015)

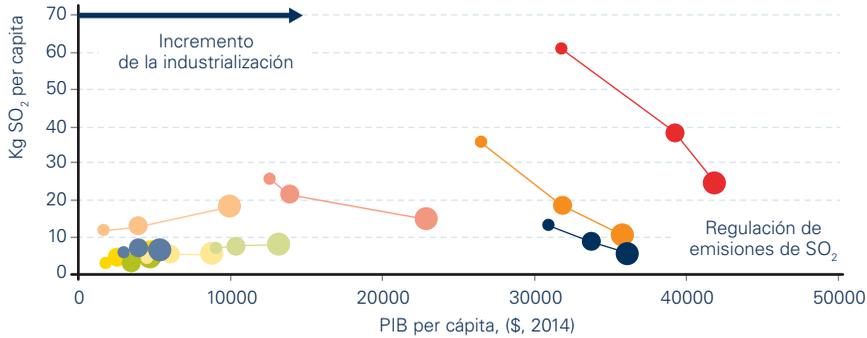
Según estimaciones de la Agencia Internacional de la Energía, en 2015 el sector de la energía fue el responsable de la emisión de cerca de 80 millones de toneladas (Mt) de SO_2 , de las cuales más del 45% correspondieron a la industria y un tercio al sector de la generación de calor y electricidad (ver figura 1), reflejando en ambos casos un uso intensivo del carbón. Por países, (ver figura 3) más de una cuarta parte (22 Mt) de las emisiones de SO_2

relacionadas con la energía provinieron de China, seguida de India (9 Mt).

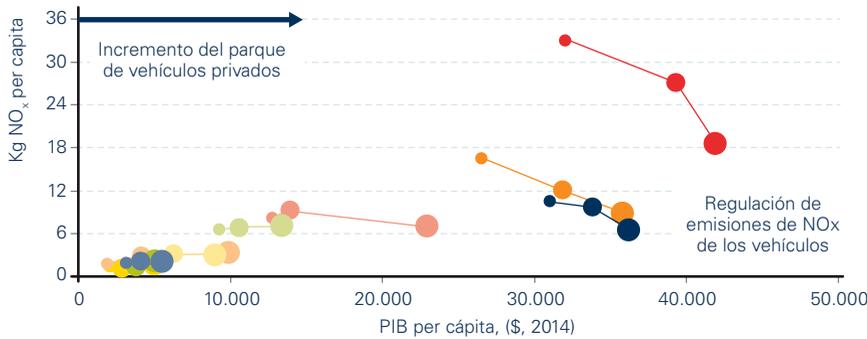
Por lo que respecta a las emisiones de NO_x , a escala global, estas se situaron en torno a los 107 Mt en 2015, con el transporte contabilizando la mayor parte de las mismas (más del 50%) seguido por la industria (26%) y la generación de calor y electricidad (14%). Las emisiones comentadas han aumentado rápidamente en muchos países en vías de desarrollo, superando volumétricamente el descenso registrado en los países desarrollados. China (23 Mt) y EEUU (13 Mt) totalizan cerca de un tercio de las emisiones globales de NO_x . En muchas regiones del mundo, el sector del transporte, impulsado básicamente por derivados del petróleo, constituye la mayor fuente de dichas emisiones, con la notable excepción de China donde la industria es la principal generadora (ver figura 4). En India, las emisiones de NO_x están evolucionando al alza, aunque todavía no han alcanzado un nivel similar al de Europa, a pesar de que la población del país asiático es dos veces mayor.

A nivel global, más de la mitad de las emisiones de PM primario proceden del sector residencial con una importante contribución proveniente asimismo del sector industrial (ver figuras 1 y 5). Por regiones, cerca del 80% de dichas emisiones corresponden a África y Asia (particularmente a China e India). Este tipo de contaminantes derivan esencialmente de la combustión incompleta de diversas fuentes energéticas primarias, muy especialmente de las empleadas en los hogares para cocinar (biomasa), calefacción (biomasa y carbón) e iluminación (lámparas de queroseno). Las emisiones de PM relacionadas con la energía

A) Emisiones de SO₂ de la industria y la generación de electricidad y calor.



B) Emisiones de NOx del transporte.



C) Emisiones de PM_{2.5} del sector residencial.

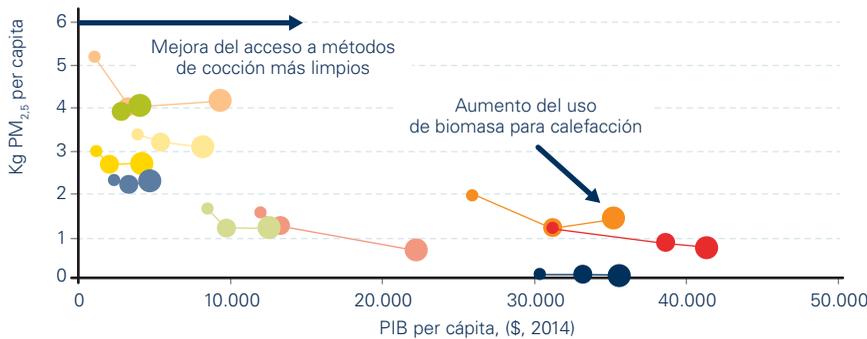
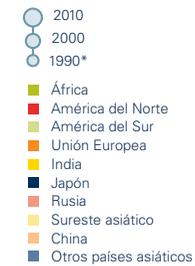


Figura 6

Relación por regiones o países entre la calidad del aire (emisiones contaminantes per cápita) y desarrollo económico (PIB per cápita), diferenciando los principales tipos de contaminantes y los sectores económicos que más contribuyen a su emisión.



*En el caso de Rusia, los datos de 1995 se tuvieron en cuenta como primer punto de la serie.

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

se concentran, en mucha mayor proporción que los otros dos contaminantes previamente comentados (SO_2 y NO_x), en los países en vías de desarrollo y en un solo sector (el residencial). La figura 6 muestra la regionalización de las emisiones normalizada a kg per cápita para los contaminantes, excepto para PM. En ella se observa una distribución espacial radicalmente diferente a la descrita para los valores absolutos, pues los países en desarrollo presentan unas emisiones de SO_2 y NO_x per cápita mucho más bajas que las más desarrolladas dado que el consumo de energía per cápita es menor. Para PM la situación es diferente porque la quema de carbón y biomasa en países en desarrollo es muy alta.

¿Qué factores determinan la contaminación del aire en áreas urbanas?

Los principales factores determinantes de la concentración de contaminantes en un determinado lugar son la escala y composición de la actividad económica local, el tamaño y densidad de la población, el mix energético, el grado de exigencia y cumplimiento de las medidas regulatorias anti-contaminación, y las condiciones geográficas y meteorológicas que afectan a la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

La densidad de población y de uso energético son factores muy importantes que suelen condicionar que la contaminación del aire alcance su máximo en las ciudades y sus alrededores. En la actualidad se estima que más de 3.900 millones de personas (el 54% de la población del planeta) viven en áreas urbanas, las cuales contabilizan cerca del 80% de la actividad económica mundial¹²⁰. A menudo, las ciudades facilitan de forma eficiente el acceso a los servicios energéticos de un gran número de personas, aunque, al mismo tiempo, deben afrontar y superar importantes desafíos, como la congestión del tráfico y la alta concentración de emisiones contaminantes en un área densamente poblada. La tupida red de calles y carreteras y el alto volumen de tráfico, la insuficiente capacidad de transporte público, la alta densidad de edificios y la altura de los mismos, así como una dinámica meteorológica en ocasiones poco favorable, constituyen factores de riesgo para la contaminación atmosférica en las ciudades.

Los objetivos de calidad de aire varían en su cobertura y rigor en los diferentes países, aunque la OMS, en su Guía de Calidad del Aire, aporta los verdaderos umbrales de protección a la salud humana, y los riesgos que supone el superarlos. Los datos muestran que hoy en día las poblaciones de muchas ciudades del mundo viven bajo unos parámetros de calidad de aire que no cumplen los estándares recomendados por el organismo citado para $\text{PM}_{2,5}$ (ver figura 7). Así, según datos del WHO Global Urban Ambient Air Pollution

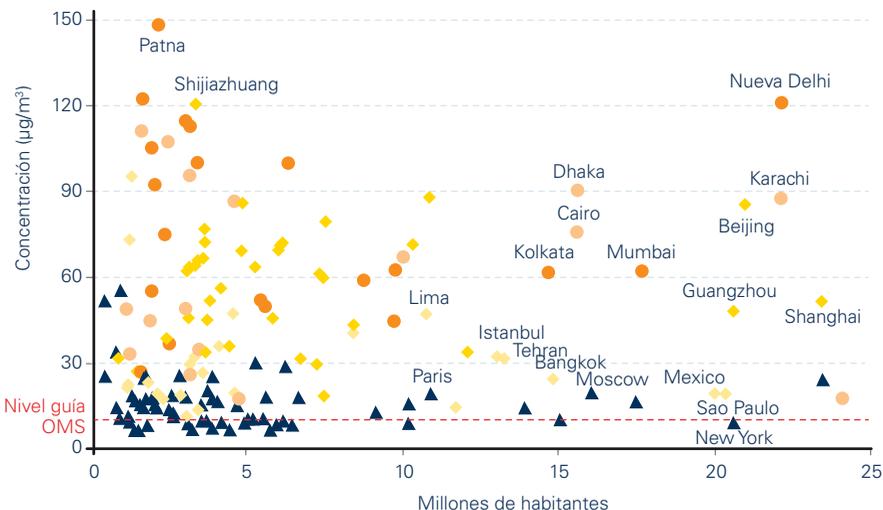


Figura 7

Concentraciones medias anuales de $PM_{2.5}$ en el exterior en diversas áreas urbanas (2015).

- Ingresos medio-bajos**
 - India
 - Otros países
- Ingresos medio-altos**
 - ◆ China
 - ◆ Otros países
- Ingresos altos**
 - ▲ Otros países

Fuente: Agencia Internacional de la Energía (2016)

Database¹²¹, casi el 80% de la población que vive en ciudades que monitorizan los niveles de contaminación respiran un aire que no cumple con las directrices comentadas. Y eso también resulta aplicable a muchas ciudades con un nivel medio de ingresos alto. De esta manera, casi el 90% de los urbanitas europeos están expuestos a unos niveles de contaminación de $PM_{2.5}$ que exceden las directrices de la OMS -aunque, de acuerdo con los estándares de la Unión Europea, menos severos, este porcentaje quedaría rebajado al 10%¹²².

La situación es aún mucho más dramática en muchas áreas urbanas de las economías emergentes, particularmente en China e India (ver figura 7) donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ puede multiplicar hasta por un factor de quince los valores máximos recomendados por la Organización Mundial de la Salud. Estos niveles tan altos son atribuibles a una combinación de contaminantes procedentes de una amplia gama de fuentes emisoras, tales como la industria, el transporte, la construcción (polvo), la combustión de carbón

121 World Health Organization, 2016- Air Pollution Levels Rising in Many of the World's Poorest Cities- Press release, www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-rising/en, Accessed 4th January 2018.

122 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, 74 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

y biomasa en los hogares, la generación de electricidad y la quema de residuos al aire libre.

Las altas concentraciones de NO₂ también afectan a muchas ciudades, tanto en los países en vías de desarrollo como en los industrializados. Desde mediados de la década de los noventa, las observaciones por satélite (OMI-NASA) han puesto de manifiesto un abrupto incremento de las concentraciones de NO₂ en áreas urbanas de China, India y Oriente Medio, atribuible a la expansión del parque automovilístico y al crecimiento de la generación de electricidad y de la actividad industrial¹²³. Durante el mismo periodo, las concentraciones de NO₂ experimentaron una tendencia a la baja en muchas de las ciudades de los países desarrollados, aunque los niveles de contaminación permanecieron altos. De este modo, en 2013, en casi todas las ciudades de la UE con más de 500.000 habitantes se registraron valores de concentración anual de NO₂ superiores a los recomendados por la OMS, que para este contaminante coinciden con los valores límite de la legislación europea (ver capítulo sobre la legislación), excediéndolos

de forma significativa en ciudades como Madrid, Barcelona, Berlín, Londres, Milán y París¹²⁴. Por otra parte, resulta interesante constatar que los niveles de contaminación por NO₂ acostumbran a mostrar importantes variaciones dentro de una misma ciudad, con las vías de tráfico rodado actuando a modo de corredores contaminantes, y pudiéndose apreciar otros puntos calientes en aeropuertos, puertos y zonas industriales (así como las áreas situadas a sotavento de éstas). Como resultado de la implementación de controles eficientes y rigurosos, las concentraciones de SO₂ han disminuido de manera considerable en los países desarrollados, aunque todavía persisten algunas áreas urbanas problemáticas, por ejemplo en zonas de Europa Oriental. Por contra, las ciudades en los países de economía emergente, especialmente aquellas con una importante actividad industrial, pueden sufrir concentraciones de SO₂ muy elevadas. Un dato importante a tener en cuenta es que en zonas costeras, muy particularmente en puertos, las emisiones procedentes del tráfico marítimo pueden elevar notablemente las concentraciones de SO₂¹²⁵.

123 Hilboll A., Richters A, Burrows J., 2013 Long-term Changes of Tropospheric NO₂ over Megacities Derived from Multiple Satellite Instruments. Atmospheric Chemistry and Physics 13, 4145-4169

124 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, 74 pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

125 Merk O., 2014. Shipping Emissions in Ports, International Transportation Forum Working Paper, ITF, Paris

¿Cómo se puede hacer frente a la contaminación del aire relacionada con la energía?

Los niveles de contaminantes en la atmósfera y la manera en que estos afectan a la salud humana, dependen de una amplia gama de factores y actuaciones. Las diversas medidas aplicables en el sector energético para combatir dicha contaminación pueden clasificarse en tres grandes grupos que se detallan a continuación.

Medidas para reducir las emisiones contaminantes

Éstas comprenden el suministro de servicios energéticos de manera más eficiente o de forma que no impliquen la quema de combustibles. Entre otros ejemplos pueden citarse los siguientes:

- Medidas de eficiencia en los sectores residencial, industrial y del transporte, que incluyen actuaciones para lograr unos estándares de funcionamiento bajo condiciones de mínimo gasto energético para la iluminación, ventilación, aparatos de aire acondicionado, calderas industriales, motores eléctricos, coches, camiones, etc. También pueden incluirse en este apartado las medidas que proporcionan mejoras en los procesos o ahorro de materiales en el sector industrial y, en los países en vías de desarrollo, las medidas encaminadas a promover el uso de un determinado tipo de estufas o cocinas de biomasa que permiten reducir la contaminación del aire en los hogares.

- Medidas para promover el uso de fuentes de energía renovables, tales como *feed-in tariffs* o subastas de determinadas tecnologías, que buscan favorecer el despliegue de la generación de electricidad y calor a partir de fuentes solares o eólicas. Esta categoría, incluye asimismo las medidas encaminadas a promover el acceso a un suministro energético basado en renovables, como por ejemplo los programas de acceso a estufas, hornillos y sistemas de iluminación alimentados por energía solar.
- Medidas para la mejora de redes de transporte y de planificación urbana, conducentes a una menor dependencia de los vehículos de uso privado, sea mediante una mejora del servicio de transporte público, la promoción de los desplazamientos a pie o en bicicleta, y la sustitución del transporte de mercancías por carretera por el ferrocarril o el barco.

Medidas para reducir el impacto de la combustión y de otros procesos relacionados con el uso de la energía

Estas comprenden el establecimiento de estándares obligatorios de limitación de las concentraciones de contaminantes específicos en las emisiones efluentes de focos de combustión -potenciando la adopción de tecnologías de control de emisiones- o bien, la aplicación de medidas que suavizan el impacto de dichos contaminantes una vez emitidos, u otras actuaciones que fomenten cambios que impliquen la combustión de fuentes de energía menos contaminantes. En el capítulo de planes y medidas de mejora de la calidad del aire se tratan en detalle algunas de estas medidas, pero aquí entre otros ejemplos podemos citar:

- Fijación de estándares de emisiones para los sectores industrial y de generación de calor y electricidad que limitan la contaminación que un determinado combustible o planta pueden generar durante la combustión o cualquier otro proceso de consumo energético. También quedarían incluidos en este apartado los mandatos de utilización de tecnologías específicas de control.
- Regulaciones sobre la altura de chimeneas o ventilación mejorada, aplicables al sector residencial con el propósito de diluir la concentración de los contaminantes que potencialmente pueden afectar la exposición de la población.
- Fijación de estándares de emisión para vehículos según las diferentes categorías de los mismos (como las normas Euro en Europa).
- Regulaciones sobre la calidad de los combustibles, tales como limitaciones en la cantidad de azufre en los utilizados por el transporte (menos de 10 partes por millón en la mayoría de los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE) o la promulgación de medidas para promover el lavado del carbón.
- Cambios de combustible a favor de los menos contaminantes, particularmente del carbón al gas natural en la generación de calor y electricidad o en la industria, de fueloil pesado a gas natural licuado (GNL) en el transporte marítimo y de biomasa o carbón a gas licuado del petróleo (GLP) para cocinar en los países en desarrollo.
- Regulaciones específicas sobre determinados combustibles o actividades, tales como la prohibición de utilizar carbones de bajo rango en los edificios de muchas ciudades chinas, o el creciente número de “zonas de bajas emisiones” en áreas urbanas, en las que se restringe el acceso del tráfico rodado que no cumple determinadas especificaciones sobre emisiones (ver las medidas sobre el tráfico rodado).
- Supervisión e implementación de programas de puesta al día y readaptación de equipamientos y del parque de vehículos existentes, incorporando una serie de medidas entre las que, por ejemplo, cabe destacar la aplicación de programas de inspección y mantenimiento periódicos, así como de programas que promuevan la readecuación de los sistemas de control de emisiones (*retrofitting*).

Políticas de precios

Los dos grandes grupos de medidas comentadas previamente deberían ir asociados a políticas que persigan la transformación del sector energético en otro más eficiente y menos dependiente de los combustibles fósiles. A largo plazo, la manera más simple de abordar el problema de la contaminación del aire es no generar contaminantes, aunque, con frecuencia, las políticas y medidas conducentes a una reducción de las emisiones y de su impacto se diseñan de manera específica para combatir la contaminación del aire, sin actuar decididamente sobre la raíz del problema, que no es otra que el modelo energético. En cualquier caso, los esfuerzos de las administraciones públicas para evitar o reducir

las emisiones contaminantes están ampliamente generalizados y han demostrado su efectividad en muchos países. Esta efectividad puede reforzarse recurriendo a la introducción de medidas que afectan el precio de los combustibles, con el fin de aportar un incentivo económico para promover el cambio de comportamiento y evitar o reducir la contaminación del aire, ajustándola a los niveles requeridos, o incluso situarla por debajo de estos. Básicamente, este tipo de incentivos buscan impactar de manera significativa sobre los cálculos inversores y las decisiones de los consumidores.

El sector del transporte constituye un buen ejemplo de cómo evitar la contaminación, acompañando las mejoras de las redes de transporte y de la planificación urbana con una política de precios que repercuta sobre las decisiones del consumidor, ya que incluso la mejor red de servicio de transporte público solo resulta eficaz para abordar la contaminación del aire en la medida en que es realmente utilizada por el consumidor.

Algunos ejemplos de estas políticas de precios son:

- Reforma de los subsidios al consumo de combustibles fósiles, como por ejemplo los emprendidos recientemente en India, Indonesia y algunos países de Oriente Medio.
- Impuestos al combustible y tarificación del uso de carreteras, que en muchos países están incorporados a los precios del combustible,

aunque el diésel –que emite mucho más PM (en el caso de vehículos anteriores a 2009) y NO_x que la gasolina– tiene todavía impuestos más bajos en numerosos países¹²⁶.

- Tasas por congestión (como la *London Congestion Charge Zone*) o peajes urbanos que exigen un pago para entrar en determinadas áreas geográficas y que, como contrapartida, ofrecen descuentos a los vehículos de bajas o muy bajas emisiones.

Todas estas medidas pueden ser efectivas como un elemento más de la política de transporte urbano, o como argumentos económicos que apoyen el cambio a vehículos más eficientes o con menos emisiones por parte de la ciudadanía.

¿Qué escenarios de futuro globales se contemplan sobre la contaminación del aire relacionada con la energía?

La efectividad, a nivel global y en el horizonte 2040, de las políticas y medidas comentadas para reducir las emisiones contaminantes del aire relacionadas con la energía ha sido evaluada recientemente por la Agencia Internacional de

126 Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015. Taxing Energy Use 2015: OECD and Selected Partner Economies, OECD Publishing, Paris, DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264232334-en>

la Energía¹²⁷. Y una de las conclusiones más llamativas del estudio de este organismo es que a pesar de que en su escenario de referencia (Escenario de Nuevas Políticas o *New Policies Scenario*) la aplicación de las políticas sectoriales existentes y previstas a nivel internacional conseguirán recortar significativamente las emisiones, el avance logrado no será suficiente para mejorar la calidad del aire a nivel global, por lo que se hace necesario una intervención internacional más drástica y decidida, contemplada en otro escenario alternativo (Escenario de Aire Limpio o *Clean Air Scenario*). En los dos apartados siguientes resumimos las principales conclusiones de ambos escenarios.

Escenario Nuevas Políticas

Teniendo en cuenta, país a país y sector a sector, todas las políticas y medidas relevantes adoptadas o anunciadas como de aplicación inminente a nivel mundial, la Agencia Internacional de la Energía, ha elaborado un escenario, denominado Escenario de Nuevas Políticas en el que se contempla la posible evolución de la contaminación del aire relacionada con la energía en el horizonte 2040. Según este escenario, la creciente preocupación y atención prestada por la comunidad internacional al problema de la calidad del aire, junto a los compromisos adquiridos por dicha comunidad tras la cumbre de París de Diciembre de 2015 (COP21) para acelerar la transición energética hacia un modelo más eficiente y

descarbonizado, se traducirán de aquí al 2040 en un descenso, lento pero continuado, del conjunto de las emisiones globales de los contaminantes del aire analizados en estas páginas (SO₂, NO_x, PM).

El escenario mencionado contempla un aumento de la combustión de carbón, petróleo, gas natural y biomasa, para de este modo ayudar a cubrir un incremento cercano a un tercio de la demanda global de energía. Sin embargo, a pesar de ello, se prevé que en el horizonte 2040 las emisiones globales de PM caigan en un 7%, las de SO₂ en un 20% y las de NO_x en un 10%.

Este desacoplamiento entre ambas tendencias refleja, aproximadamente a partes iguales, la aplicación de tecnologías de control de la contaminación y el tránsito global hacia la adopción de un modelo energético más limpio. Los controles de la contaminación se vienen aplicando cada vez con más rigor en los focos de crecimiento de la demanda de energía, principalmente en Asia, donde la regulación de la calidad del aire ha experimentado considerables avances para adaptarse al rápido ritmo de crecimiento de la actividad industrial y la expansión urbana y demográfica. Al mismo tiempo, la generalizada transformación del sector energético, catalizada por el acuerdo de París sobre cambio climático, podría comportar que más de un tercio del crecimiento previsto en el uso de la energía se consiga a partir de fuentes libres de emisiones contaminantes, tales como la eólica, la solar, la hidráulica y la nuclear. Otro 30% provendría del gas natural,

127 International Energy Agency, 2016. Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report, IEA Paris., 242 pp. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>

cuya combustión emite menos contaminantes que los otros dos combustibles fósiles y la biomasa (ver figura 2).

Con la vista puesta en el horizonte 2040, el Escenario Nuevas Políticas de la Agencia Internacional de la Energía contempla que la reducción continuada de las emisiones contaminantes en el mundo industrializado, y el inicio del descenso de las mismas en China, vayan acompañadas por un modesto crecimiento en India y el Sudeste Asiático, así como por un crecimiento más rápido en algunas partes de África.

Las emisiones de la mayoría de los principales contaminantes del aire ya están disminuyendo en muchos países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y las expectativas son que continúen haciéndolo a medida que descienda la demanda total de energía, se acelere la implementación de fuentes energéticas bajas en carbono y vayan surgiendo efecto las medidas regulatorias que controlan y restringen la combustión.

De manera similar, en China, se espera que los grandes esfuerzos actualmente en marcha para controlar la calidad del aire den sus frutos y que la reciente caída de las emisiones contaminantes se consolide como tendencia a largo plazo. En este país, las previsiones a 2040 son que las emisiones de PM hayan disminuido en un 40%, a medida que se ralentiza el crecimiento del consumo energético, el mix energético se hace mucho menos dependiente del carbón y las medidas de control sobre la calidad del aire se refuerzan y sean más estrictas.

Contrastando con las evoluciones comentadas, en India, las previsiones de la Agencia Internacional de la Energía apuntan a un

empeoramiento de la contaminación del aire de aquí a 2040, básicamente en respuesta a un incremento del 150% de la demanda energética. Pese a ello, debe destacarse que la implantación de rigurosas medidas de control y estándares de emisión más estrictos en los sectores industrial y del transporte, junto a la progresiva sustitución de los combustibles tradicionales empleados para cocinar por GLP, así como la adopción de ambiciosos objetivos de despliegue de las energías solar y eólica, ayudaran a limitar el crecimiento de las emisiones contaminantes que solo aumentarían en un 10%.

Las peores noticias provendrán del África Subsahariana (excluyendo Sudáfrica), donde la combinación de crecimiento económico y la ausencia de una regulación estricta conducirán, con toda probabilidad, a un notable deterioro en la calidad del aire, de modo que en 2040 los indicadores de PIB y de contaminación del aire podrían alcanzar valores similares a los de India en la actualidad, incluso a pesar de que el mix energético proyectado para el África Subsahariana es mucho menos dependiente del carbón que el actual de India.

En conjunto, las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía comentadas representan malas noticias para la salud de millones de personas en el mundo. A pesar de la intensificación de los esfuerzos para mejorar la calidad del aire, las tendencias demográficas al alza, junto a los crecimientos en la urbanización y en el uso de la energía, muy especialmente en los países asiáticos en vías de desarrollo, apuntan a que el número de muertes prematuras atribuibles a la contaminación del aire fuera de los hogares continuará aumentando, pasando de los cerca

de 3 millones de hoy en día a alrededor de 4,5 millones en 2040.

El 90% del aumento comentado tendría lugar en Asia, donde la contaminación del aire en muchas de las ciudades en fase de rápido crecimiento seguirá siendo uno de los riesgos para la salud pública, afectando, sin duda, a un porcentaje cada vez mayor de una población en crecimiento. Por ejemplo, en China, incluso aunque en conjunto las emisiones contaminantes descenderán, el envejecimiento de la población hará a esta más vulnerable a los efectos perjudiciales de la contaminación del aire sobre la salud. Según las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía, en este país, el impacto sobre la salud de la contaminación del aire en el sector residencial disminuirá ligeramente, aunque seguirá siendo severo. De este modo, la instalación de estufas y hornillos de cocina más modernos, en sustitución de los más antiguos alimentados por biomasa, supondrá que el número total de personas sin acceso a instalaciones limpias de este tipo disminuirá en casi 1.000 millones, cayendo a 1.800 millones, lo que comportará que el número anual de muertes prematuras atribuibles a la contaminación en los hogares descenderá de cerca de 3,5 millones de personas en la actualidad a menos de 3 millones en 2040.

Escenario Aire Limpio

Lo expuesto en el apartado anterior viene a demostrar que aunque conocemos las medidas a aplicar para mejorar la calidad

del aire, el problema está lejos de poder ser resuelto de forma satisfactoria a escala global en las próximas dos décadas. Está claro que cualquier progreso significativo requiere de apuestas gubernamentales más decididas, que refuercen y aceleren de manera drástica los actuales compromisos internacionales para el despliegue de nuevas políticas energéticas y de calidad del aire.

Por este motivo, la Agencia Internacional de la Energía ha elaborado un escenario mucho más ambicioso que el previamente comentado, denominado Escenario de Aire Limpio. Este, contempla un amplio abanico de políticas energéticas y de calidad del aire, muy pragmáticas, de eficacia probada y exclusivamente fundamentadas en tecnologías actualmente operativas, cuya implementación aseguraría a los ciudadanos del mundo un aire mucho más limpio y una mejor salud. De esta forma, en el Escenario de Aire Limpio, las muertes prematuras causadas por la contaminación del aire en el exterior de los hogares caerían a 2,8 millones en 2040, mientras que las atribuibles a la contaminación del aire en el interior de las viviendas se situarían en la misma fecha en torno a los 1,3 millones (en el escenario Nuevas Políticas ambas cifras eran de 4,5 y algo menos de 3,0 millones, respectivamente).

Obviamente, las mejoras obtenidas se concentrarían mayormente en los países en desarrollo, de manera que, por ejemplo, el porcentaje de la población de India expuesta a concentraciones de $PM_{2.5}$ por encima del nivel menos exigente establecido por la Organización Mundial de la Salud caería a un

18% en 2040 (frente al 62% actual), mientras que en China se situaría en un 23% (en comparación con el 56% actual) y rondaría el cero en Indonesia y África del Sur.

Lograr los avances previstos en el Escenario Aire Limpio dependería de la implementación global de un abanico de políticas, que entre otras incluirían las siguientes:

- Asegurar el acceso de toda la población a cocinas limpias para así reducir el uso de las cocinas de biomasa ineficientes y sus emisiones de $PM_{2,5}$.
- Elevar la exigencia y hacer cumplir de manera estricta los estándares de emisiones en el transporte rodado, especialmente en las ciudades, con el propósito de reducir la contaminación por NO_x .
- Controlar las emisiones e impulsar el cambio de combustible en el sector de generación de calor y electricidad (poniendo especial atención a la sustitución del carbón por el gas natural) e incrementar la eficiencia en el sector industrial, para de este modo recortar las emisiones de SO_2 .

Según la Agencia Internacional de la Energía, Las inversiones adicionales necesarias para implementar las medidas contempladas en el Escenario Aire Limpio no son insuperables. La inversión acumulada necesaria hasta 2040 sería un 7% (o 4,8 billones de dólares) superior a la prevista en el Escenario Nuevas Políticas, mientras que el valor de los beneficios resultantes sería mucho más alto.

¿Cuál ha de ser el papel del gas natural en la mejora de la calidad del aire?

Como se ha comentado anteriormente (ver también figura 2), un dato particularmente interesante es que el gas natural presenta unas emisiones de los principales gases contaminantes del aire (SO_2 , NO_x y PM) mucho más bajas que carbón, petróleo y biomasa, siendo prácticamente nulas en el caso del SO_2 . Teniendo en cuenta la importancia que los sectores industrial y de generación de electricidad y calor tienen en las emisiones de este último contaminante no cabe duda que en dichos sectores la sustitución por gas natural de otras fuentes energéticas primarias, principalmente carbón y fueloil, constituye una medida de gran potencial positivo. Un razonamiento análogo puede seguirse en el caso de las emisiones contaminantes de NO_x , muy ligadas al sector del transporte y que podrían rebajarse sustancialmente favoreciendo el despliegue, tanto en el caso del tráfico rodado como en el marítimo, de motores de gas natural, en vez de los alimentados por derivados del petróleo abrumadoramente mayoritarios en la actualidad. Y algo similar, ocurre con el PM emitido en gran parte por los sectores residencial e industrial, donde el gas natural podría ser un sustituto ideal para la biomasa y el carbón.

Obviamente, la utilización del gas natural no constituye por sí solo un remedio infalible para combatir el grave problema de la calidad del aire en el mundo. Sin embargo, enmarcado en el conjunto de medidas planteadas en apartados anteriores, sí constituye una parte importante de la solución.

II. Medidas y planes de mejora de la calidad del aire urbano

Alcance y propuestas de actuación de los planes de mejora de la calidad del aire

Xavier Querol (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

Caso 1. La experiencia de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid

Juan Ángel Terrón (Empresa Municipal de Transportes de Madrid S.A.)

Caso 2. Los efectos del uso de vehículos a gas natural en la calidad del aire urbano. Experiencias en Barcelona y Madrid

Jose Maria Baldasano (Universidad Politécnica de Cataluña)

Caso 3. La experiencia de Berlín. Éxitos y oportunidades de veinte años de gestión de la calidad del aire

Martin Lutz (Ayuntamiento de Berlín)

Caso 4. La experiencia de Lombardía

Guido Lanzani (Departamento de Medio Ambiente de la Región de Lombardía)

Caso 5. La experiencia de México

Oscar Peralta, María De La Luz Espinosa, Telma Castro (Universidad Nacional Autónoma de México)

Caso 6. La experiencia de Santiago de Chile

Mauricio Osses (Universidad Técnica Federico Santa María)

Caso 7. La experiencia de Bogotá

Jorge Pachón (Universidad de La Salle)



Profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, experto en geoquímica ambiental, especialmente de contaminación atmosférica. Doctor en Ciencias Geológicas por la Universidad de Barcelona i postdoc en BGS-NEC, Reino Unido. Premio Medio Ambiente de la Generalidad de Cataluña 2009 y Premio Rey Jaume I 2013 en protección del Medio Ambiente.

Xavier Querol

Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA-CSIC

Alcance y propuestas de actuación de los planes de mejora de la calidad del aire

Preguntas clave del artículo

- ¿Qué señala la legislación europea con relación a los planes de mejora de la calidad del aire?
- ¿Cuál es el contenido de los planes estructurales de calidad del aire?
- ¿Cómo obtener un buen diagnóstico de las zonas afectadas y las fuentes responsables?
- ¿Cómo se puede evaluar la reducción de contaminantes asociada a la aplicación de un plan de calidad del aire?
- ¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire en los distintos sectores?

Apunte inicial

El deterioro de la calidad del aire urbano es un problema de salud pública de gran relevancia y, como tal, constituye un tema ambiental de primer orden en la Unión Europea. Como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y de los ecosistemas es muy relevante, por lo que el marco legislativo actual obliga a aplicar planes y estrategias para avanzar en su reducción, en especial cuando se superen los umbrales de concentración de los distintos compuestos contaminantes considerados. Estos umbrales pueden o no coincidir con los que se definen en las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud¹²⁸ (OMS) -principales referentes para la protección de la salud colectiva-, ya que determinados criterios económicos o de otra índole suelen afectar su cumplimiento, y se justifiquen estadios intermedios en una proceso legislativo evolutivo cuyo objetivo final debería ser respetar dichos límites guía.

¿Qué señala la legislación europea con relación a los planes de mejora de la calidad del aire?

En Europa, estos valores límite y objetivo, así como la obligatoriedad de la aplicación de los planes de mejora de calidad de aire cuando éstos se superen, están fijados por las directivas 2008/50/CE¹²⁹ y 2004/107/CE¹³⁰. No solamente se exponen en ellas los niveles de concentración o umbrales a no superar, sino las fechas específicas a partir de las cuales el cumplimiento es obligatorio. También se posibilita en el artículo 22 de la directiva 2008/50/CE la prórroga de los plazos de cumplimiento y exención de la obligación de aplicar ciertos valores límite cuando, en una zona o aglomeración determinada, no puedan respetarse los de contaminantes como el NO₂, el C₆H₆, y las PM₁₀, por diversas causas. Siempre que el Estado miembro demuestre que se han adoptado todas las medidas adecuadas, a escala nacional, regional y local, para respetar los plazos, y que además se asegure que la superación del valor límite de cada contaminante no exceda el margen máximo de tolerancia especificado para cada uno de los contaminantes en el anexo XI de dicha directiva. El artículo 23 de la directiva 2008/50/CE especifica que “*Cuando, en determinadas*

128 OMS, 2006. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005. Summary of risk assessment. WHO Geneva, 22p. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf

129 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:Es:PDF>

130 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:ES:PDF>

zonas o aglomeraciones, los niveles de contaminantes en el aire ambiente superen cualquier valor límite o valor objetivo, así como el margen de tolerancia correspondiente a cada caso, los Estados miembros se asegurarán de que se elaboran planes de calidad del aire para esas zonas y aglomeraciones con el fin de conseguir respetar el valor límite o el valor objetivo correspondiente especificado en los anexos XI y XIV". Se indica también que los planes deberán ser transmitidos a la Comisión Europea sin demora y, en cualquier caso, antes de que transcurran dos años desde el final del año en que se observó la primera superación.

En el artículo 24 de la misma directiva se expone también que *"Cuando, en una zona o una aglomeración determinada, exista el riesgo de que el nivel de contaminantes supere uno o más de los umbrales de alerta especificados en el anexo XII, los Estados miembros elaborarán planes de acción que indicarán las medidas que deben adoptarse a corto plazo para reducir el riesgo de superación o la duración de la misma".*

Estas actuaciones o planes a corto plazo suelen ser aplicados por la administración local y regional para superaciones del valor diario de PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y para las del valor límite horario o el umbral de alerta de NO_2

(200 y $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por ello, ciudades como París¹³¹, Barcelona¹³² y Madrid¹³³ cuentan con protocolos en los que se aplican medidas de corta duración (mientras duren los episodios agudos de contaminación), tales como la reducción o gestión ambiental de la velocidad de circulación, la restricción del aparcamiento en superficie a no residentes, la restricción de circulación a matrículas pares o impares, la gratuidad o reducción del precio del transporte público, o la restricción de los vehículos dependiendo de su grado de contaminación (zonas de baja emisión, ZBE, temporales). Además, se especifica en el mismo artículo 24 que, cuando exista un riesgo de superación del umbral horario de alerta de O_3 ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se podrán elaborar planes de acción a corto plazo si existe una posibilidad significativa de reducción del riesgo o de la duración o gravedad de la situación.

Los planes a corto plazo tienen un efecto muy limitado en la mejora de la calidad del aire y por eso se tratan en este capítulo. Ello se debe a que, por lo general, el efecto de reducción de las emisiones y de la mejora de calidad del aire es reducido; ya sea por el tipo de medida aplicada, por las excepciones a la misma, por la dificultad de informar a la población en un tiempo adecuado y de aplicarse rigurosamente en un plazo corto de tiempo, pero, sobre todo, porque, generalmente, cuando se pone en marcha el

131 Mairie de Paris, 2016. Mesures prises en cas de pic de pollution. <https://www.paris.fr/services-et-infos-pratiques/deplacements-et-stationnement/stationnement/mesures-prises-en-cas-de-pic-de-pollution-2720>

132 Generalitat de Catalunya, 2016. Episodis ambientals de contaminació atmosfèrica. Departament de Territori i Sostenibilitat. Generalitat de Catalunya. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/qualitat-de-laire-a-la-conurbacio-de-barcelona/pla_millora_qua_aire_2011_2015/mesures-del-pamqa/episodis_ambientals/mesures-recomanacions-actuacions-previstes/

133 Ayuntamiento de Madrid, 2016; Generalitat de Catalunya, 2016, Mairie de Paris, 2016

protocolo, ya se ha generado el episodio de contaminación, y los niveles de PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO_2 y O_3 se acumulan y son difíciles de reducir. No obstante, no pretendemos decir que no deban ser aplicados, ya que en ciudades donde se superen los niveles horarios de protección a la salud o de alerta de NO_2 , es necesario implementar medidas a corto plazo para que, a ser posible, se reduzcan los niveles por debajo de los citados umbrales.

Las ciudades escandinavas, alemanas, inglesas, entre otras, articulan sus planes fundamentalmente a través de medidas estructurales y permanentes, y son éstas las que se consideran más efectivas según la comunidad de técnicos e investigadores en materia de calidad del aire ambiente.

Es necesario resaltar también que, si bien muchas ciudades no rebasan los valores límite de PM_{10} , $PM_{2,5}$ y B(a)P, aplican igualmente planes de mejora de calidad del aire para dichos contaminantes, dado que, por un lado, las partículas sólidas son el contaminante con mayor impacto en la salud humana, y por el otro, los valores límite y objetivo legislativos son muy permisivos si los comparamos con los valores guía de la OMS, verdaderos protectores de la salud humana. Por tanto, aunque la normativa obliga a aplicar planes de mejora si se superan los valores límite u objetivo de la legislación, para el caso específico de dichos contaminantes se aconseja desarrollarlos aunque no haya incumplimiento, para aproximarse al máximo a los valores guía de la OMS.

¿Cuál es el contenido de los planes estructurales de calidad del aire?

La directiva 2008/50/CE¹³⁴ especifica muy detalladamente el contenido que deben tener los planes de calidad del aire - tanto locales, regionales como nacionales-, para ser considerados como tal, y para que de ellos se puedan obtener conclusiones sobre su efectividad, sobre todo con fines de su evaluación por la Comisión Europea. Esta información y argumentos que debe contener un plan de calidad se estructura en los siguientes apartados:

- 1.** Ubicación del exceso de contaminación: región, ciudad, zona de la ciudad afectada (mapa), y estación(es) de medición que registra(n) la(s) superación(es) (mapa, coordenadas geográficas).
- 2.** Caracterización de la zona y extensión espacial y temporal de las superaciones, identificando el tipo –urbana, industrial o rural–, estimación de la superficie afectada y población expuesta al exceso de contaminación, además de datos climáticos y topográficos útiles para el diagnóstico.
- 3.** Identificación de las autoridades responsables en materia de calidad del aire, así como del desarrollo de los planes de mejora vigentes y que no han permitido evitar las superaciones de los umbrales de protección a la salud o a los ecosistemas.

4. Diagnóstico experto sobre las causas de las superaciones. Naturaleza y evaluación de la contaminación, indicando las concentraciones observadas en los últimos años y las técnicas de evaluación empleadas.
5. Mejora del conocimiento sobre el origen de la contaminación objeto de reducción, con identificación de las principales fuentes de emisiones responsables –mapa y lista–, cuantificación en toneladas/años de manera individualizada para cada fuente, así como información de posibles aportes de contaminación recibidos en la zona afectada y cuyo origen (natural o antrópico) es externo a la misma – especialmente relevante para PM_{10} , $PM_{2,5}$ y O_3 –.
6. Análisis de la situación en cuanto a contribución de las distintas fuentes a las superaciones, tanto de las primarias locales, como de las externas o de los contaminantes secundarios generados en la atmósfera; acompañado de una revisión de las posibles medidas de mejora de la calidad del aire que pueden contribuir a solucionar el problema.
7. Información detallada de las medidas o proyectos de mejora existentes antes de la entrada en vigor del plan, tanto locales, regionales, nacionales e internacionales, así como los efectos derivados de las mismas.
8. Información detallada sobre las medidas o proyectos de reducción de la contaminación seleccionados y aprobados, y que constituyen el plan. Es importante resaltar que, no solamente se solicita la lista y descripción de todas las medidas recogidas en el proyecto, sino también el calendario de ejecución, y de manera muy importante las “estimaciones acerca de la mejora de la calidad del aire prevista, y del plazo necesario para la consecución de esos objetivos”.
9. Es decir, la demostración mediante modelos de calidad del aire u otras herramientas indicativas de que las medidas propuestas van a conllevar unas reducciones significativas de los contaminantes problemáticos, y que van a ser suficientes para no registrar superaciones una vez el plan sea aplicado. Si bien este punto es clave y se puede identificar como las conclusiones del documento, muchos de los planes de calidad del aire carecen de propuestas de cuantificación de los efectos de las medidas aplicadas. Remarcamos por ello que no es suficiente con cuantificar la reducción de emisiones derivada de la aplicación de las medidas, sino que éstas han de ser suficientes para no superar los valores límite de calidad del aire en el plazo definido. Este apartado es el que va a permitir a la Comisión Europea evaluar si las medidas son o no suficientes para afrontar con éxito el problema planteado.
9. Información sobre las medidas o proyectos planteados o en fase de investigación a largo plazo, y que en un futuro pueden formar parte del plan.
10. Lista de las publicaciones, documentos, actividades, utilizados como complemento de la información aportada en el plan. Es siempre interesante que lagunas de las conclusiones estén avaladas por publicaciones científicas cuya evaluación por pares da más solidez al análisis realizado. Ello es habitual en temas de salud pública, aceptándose habitualmente las conclusiones si éstas están publicadas y evaluadas en revistas de prestigio.

¿Cómo obtener un buen diagnóstico de las zonas afectadas y las fuentes responsables?

Solamente las ciudades grandes poseen una red de control de calidad del aire con diversas estaciones, ya que muchas ciudades con un tamaño cercano a los 200.000 habitantes tan solo poseen una. Estas estaciones controlan el cumplimiento normativo de los parámetros de calidad en zonas representativas de gran parte del territorio urbano, pero para obtener un diagnóstico espacial de los incumplimientos normativos se necesitan herramientas adicionales. La más adecuada es la modelización de la calidad del aire, para la cual se necesitan los siguientes modelos: un topográfico de la ciudad, un modelo de emisiones con resolución espacial, un modelo de dispersión basado en campos meteorológicos de alta resolución (escala urbana) y un modelo químico de reacciones. Estos modelos urbanos han de estar además anidados en otros de escala más regional –con idénticos requisitos que el urbano, pero de escala mayor– para obtener las condiciones de contorno o aportes externos a la ciudad. Esta es sin duda la herramienta más adecuada, ya que no solamente permite un diagnóstico espacial y temporal del problema, sino que es la única útil para evaluar escenarios futuros en el caso de reducir emisiones. Sin embargo, no todas

las ciudades disponen o pueden disponer de tal herramienta por su elevado coste, especialmente las de tamaño medio. En estos casos, por tanto, se pueden utilizar métodos de medida indicativos, como los dosímetros pasivos o tubos de difusión para contaminantes como NO₂, SO₂, O₃, que tienen un coste reducido –pocas decenas de euros, incluido el análisis– y se pueden instalar en muchos puntos de la ciudad. Con ellos se obtiene la concentración temporal integrada para dichos contaminantes –por ejemplo, en una semana o un mes– y un mapa de contaminación de éstos, con el objetivo de identificar los posibles puntos negros de contaminación que van a requerir una mayor atención en el plan (ver figura 1).

En el caso del PM en suspensión, la medida masiva de sus concentraciones en muchas zonas de la ciudad es más compleja, ya que los equipos con coste inferior, y fiables en la medida, exceden los 600-6.000 euros y requieren de alimentación eléctrica, y los sensores de bajo coste tienen aún problemas para medir niveles de PM en ambientes con alta humedad. También es una alternativa el alquiler temporal de equipos de medida o la utilización de unidades móviles que permitan obtener datos de diversos puntos de la ciudad y, junto con los de la(s) estación(es) de medición, generar información suficiente sobre la variación espacial del grado de contaminación. Para conocer la contribución de fuentes de cualquiera de los niveles de contaminantes citados, la modelización supone una vez más una herramienta muy adecuada¹³⁵. Es necesario resaltar que no es suficiente con determinar

135 Véase Borge et al., 2014, a modo de ejemplo. Borge R., de la Paz D., Lumbreras J., Vedrenne M., 2014. Analysis of Contributions to NO₂ Ambient Air Quality Levels in Madrid City (Spain) through Modeling. Implications for the Development of Policies and Air Quality Monitoring. Journal of Geoscience and Environment Protection 2, 1, 6-11.

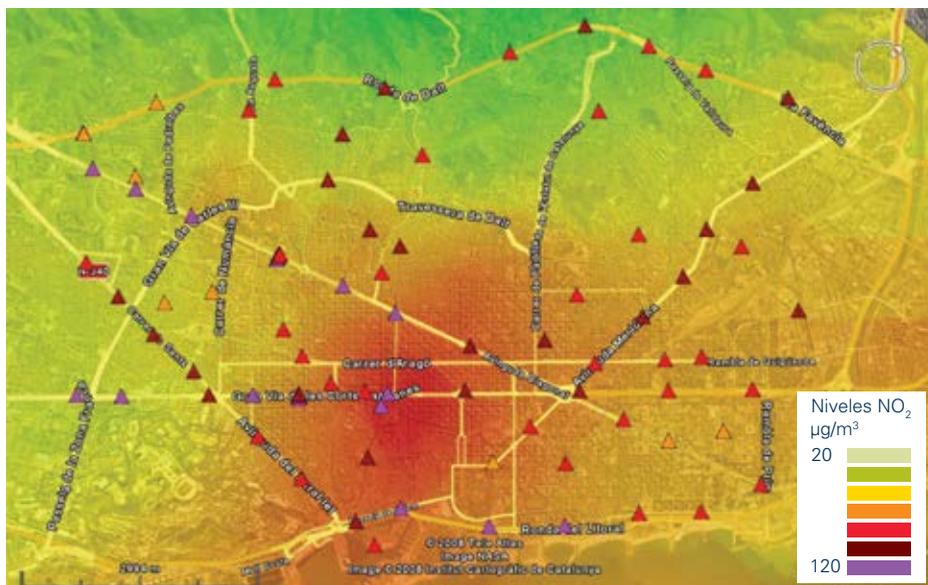


Figura 1

Mapa de concentraciones medias para mayo-junio 2008 obtenido mediante la aplicación de 120 dosímetros pasivos tipo palm (gradko).

Ejemplo de media de NO₂ en 120 puntos de la ciudad de Barcelona (CSIC-MAPAMA, 2012), identificándose claramente las áreas con mayor grado de contaminación.

CSIC-MAPAMA, 2012. Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire. Colección Informes CSIC, n.3, ISBN 978-84-00-09475-1, 349 pp.

a contribución de fuentes al inventario de emisiones local, regional o nacional, sino que el dato clave es la contribución a los niveles en aire ambiente que respiramos los ciudadanos (similar a la contribución al inventario de emisiones, pero incrementada o disminuida respecto a ésta por la proximidad o lejanía de los ciudadanos de la fuente). De no contarse con un modelo urbano de calidad del aire, puede utilizarse la aportación al inventario de emisiones integrando ésta con factores teóricos que permitan obtener estimaciones de su

contribución a los niveles de calidad del aire. Por ejemplo, la modulación será al alza para el tráfico rodado urbano, ya que las emisiones afectan muy directamente a los ciudadanos, mientras que lo será a la baja para la industria o las centrales térmicas, más lejanas. Para las PM, concretamente, se pueden obtener estimaciones muy aproximadas a la realidad mediante modelos receptores basados en el muestreo (al menos durante un año) de PM₁₀ y/o PM_{2,5}, su análisis químico detallado y la aplicación de modelos receptores sencillos

que permiten identificar las fuentes y sus contribuciones en base a firmas químicas composicionales de las PM¹³⁶.

¿Cómo se puede evaluar la reducción de contaminantes asociada al la aplicación de un plan de calidad del aire?

Como se ha comentado en la sección anterior, en ciudades grandes solamente la modelización de la calidad del aire permite realizar estudios de sensibilidad y estimaciones de la reducción de los niveles de contaminantes que una determinada medida del plan puede suponer. Aunque esta herramienta presenta incertidumbres elevadas –la modelización siempre es una aproximación a la realidad, pero además no sabemos de antemano qué grado de aplicación tendrá una medida específica–, es la más adecuada y necesaria para tales fines. En ciudades de menor tamaño, de no poseer esta herramienta se pueden sectorizar espacialmente las emisiones por áreas y calcular las reducciones del inventario de emisiones esperables con la aplicación de la medida, extrapolando un cierto porcentaje de efectividad y asociando dicho descenso con el esperable

en la calidad del aire de cada una. A pesar de su dificultad, ésta es una parte clave del plan, ya que no solamente aporta información de los efectos de las medidas, sino que la suma de las mismas va a permitir demostrar, o no, que el conjunto de actuaciones –y sus respectivas reducciones– son suficientes para no sobrepasar los umbrales de concentración en aire normativos, como exige la directiva 2008/50/CE¹³⁷ cuando se define el contenido que el plan debe tener.

Obviamente, hay medidas de un plan, como la peatonalización de una zona por ejemplo, cuyo cálculo de la eficacia en reducción de contaminantes puede ser relativamente fácil de calcular. Sin embargo, es importante remarcar que para algunas de ellas, un cálculo detallado puede conllevar la necesidad de realizar encuestas a la población. Por ejemplo, si se aplica una prohibición de circulación de vehículos diésel anteriores al 2005, no solamente hemos de conocer qué parte del parque circulante está afectada y cuánto emitía de PM_{2,5} y NO₂, sino también tener en cuenta cual va a ser la reacción de los propietarios de los vehículos –si van a remplazarlo con un vehículo nuevo; si éste será de gasolina o diésel, híbrido o eléctrico; si lo reemplazarán por uno de segunda mano; si no van a remplazarlo...–. Muchas ciudades desarrolladas, precisamente, focalizan una gran parte del estudio en este tipo de cuestionarios, puesto que son clave

136 Véase como ejemplo metodológico Amato et al. (2016) para un estudio realizado simultáneamente en 5 ciudades europeas con patrones climáticos y de emisión diferentes. Amato F, Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F, Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V.L., Colombi C., Alves C., Custódio D., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M.C., Manousakas M.I., Maggos T., Vratolis S., Harrison R.M., Querol X., 2016a. AIRUSE-LIFE+: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3289-3309, doi:10.5194/acp-16-3289-2016.

137 Apartado 8 del anexo XV. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:Es:PDF>

para obtener predicciones certeras. El efecto cuantitativo real en calidad del aire de medidas como la construcción de 10 km de carril bici, o la reducción del coste de aparcamiento para vehículos más ecológicos y el incremento para los más contaminantes, es muy difícil de obtener, por lo que se aconseja separar en el plan las medidas con efecto cuantificable de aquellas complementarias.

¿Qué medidas se pueden aplicar para mejorar la calidad del aire en los distintos sectores?

En esta sección listaremos una serie de estrategias aplicadas en ciudades europeas, y nos centraremos en los sectores de actividad clave en lo que se refiere a la responsabilidad en las superaciones de los umbrales legislativos de la calidad del aire en la Unión Europea de los 28. Éstos son: el tráfico rodado, el sector doméstico y residencial, los procesos industriales y la generación eléctrica, los buques/áreas portuarias, los aeropuertos, la agricultura, y además trataremos brevemente la construcción/demolición.

Medidas sobre el tráfico rodado a motor

El problema es complejo debido a factores como la alta densidad de vehículos en muchas ciudades europeas; la elevada proporción de

turismos diésel en nuestras flotas; el fracaso de la política europea respecto a la reducción de emisiones de NO₂ de los turismos diésel; y el escaso desarrollo de políticas que generen un transporte público metropolitano atractivo –económico, rápido y confortable–, y que desarrollen una logística de reparto de mercancías y de fomento del taxi que incluya seriamente criterios ambientales.

Mientras la legislación común europea en materia de emisiones de PM de los vehículos diésel ha sido muy positiva desde sus inicios, no lo ha sido para el NO₂. Así, un turismo diésel Euro 1 fabricado en 1997 emite las mismas concentraciones de PM que 35 turismos (también diésel) fabricados desde el 2009 al 2018 (Euro 5 y Euro 6). Por lo tanto, si se elimina de la circulación un turismo diésel antiguo el efecto equivale al que se obtendría eliminando decenas de sus equivalentes modernos. En el caso del NO₂, sin embargo, los turismos diésel producidos actualmente (Euro 6) emiten, en condiciones reales de circulación urbana, el equivalente a 6 vehículos con motor de gasolina, y la mitad de un diésel de 1997. Aún más, los turismos relativamente recientes (Euro 5, 2009-2015) emiten las mismas concentraciones de NO₂ que 14 turismos de gasolina y cantidad idéntica a la de un diésel de 1997. Así pues, una vez etiquetados los vehículos con los distintivos E, D, C y B de la Dirección General de Tráfico de España (DGT), si se prohibiera el acceso a determinadas zonas de los turismos sin etiquetar (pre-Euro 4 y pre-Euro 3, diésel y gasolina, respectivamente), se lograría una disminución notable de las emisiones de PM pero no de NO₂. A continuación se expone una estrategia ideal para la reducción de la contaminación del

tráfico rodado basada en aquellas más efectivas aplicadas en diferentes ciudades europeas, y compuesta de los siguientes pilares básicos (ver figura 2):

1. Oferta de un transporte público eficiente, rápido, cómodo, económico y ecológico, que sea capaz de asumir un cambio en el modelo de movilidad –del vehículo privado a otros más sostenibles–, habitual en muchas ciudades pero no tanto en sus áreas metropolitanas.
2. Reducción del número de vehículos circulantes en la ciudad, a lograr mediante peajes urbanos como los de Estocolmo y Milán; aparcamientos disuasorios periféricos y en nodos importantes de transporte público; reducción de plazas de aparcamiento, únicamente para residentes; restricción de la circulación de matrículas pares/impares en las zonas afectadas, únicamente en episodios de contaminación.

Como ya hemos expuesto, los vehículos diésel recientes siguen siendo altamente contaminantes en NO_x , de modo que para no rebasar los umbrales para la protección de la salud humana en NO_2 es absolutamente necesario reducir el número de vehículos. No basta con las medidas de renovación de flota si se renuevan por vehículos diésel actuales, sino que debe disminuir el número total de vehículos. Por otra parte, los ciudadanos que han pagado las tasas ambientales por sus vehículos para el debido control de las emisiones no deberían ser afectados por políticas

de penalización específica. Como tampoco sería conveniente penalizar el turismo diésel futuro si sus fabricantes los llegan a producir con sistemas de postratamiento efectivos de emisiones de NO_x .

Cabe destacar la elevada reducción del tráfico conseguida en Estocolmo mediante la aplicación del peaje urbano en toda la ciudad –3,5 euros por entrada en hora punta y 1 euro fuera de ella–, con la cual se ha alcanzado una reducción mantenida del 30% desde su aplicación (2007), incluso habiéndose incrementado la población en 100.000 habitantes¹³⁸. Esta medida podría ir acompañada de una exención del peaje para incrementar el número de vehículos de alta ocupación.

3. Renovación del parque que tenga que acceder al centro. Las zonas de bajas emisiones (ZBEs), como se ha dicho, son muy eficientes para reducir las emisiones de PM, pero no las de NO_2 . El eco-etiquetado de la DGT o la lectura de matrículas son medidas de gran utilidad para identificar y evitar el acceso de los vehículos más contaminantes en $\text{PM}_{2,5}$ en las ZBEs, pero no en el caso de los NO_x . En Europa se han aplicado alrededor de 280 ZBEs y han sido las de las ciudades alemanas las que han tenido un efecto más notable en la reducción de BC –carbono negro, uno de los componentes más nocivos del $\text{PM}_{2,5}$ –, pero muy poco en la de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} –cuyos niveles están influenciados por muchas otras fuentes–, y nulo en la de NO_2 ¹³⁹. La mayor eficacia de las ZBEs de las ciudades alemanas

138 Johansson C., 2016. The effectiveness of urban air quality actions in Stockholm. AIRUSE Final Conference. Barcelona, 18 - 19 April, 2016. http://airuse.eu/wp-content/uploads/2016/01/13_C-JOHANSSON_Stockholm.pdf

139 Holman C., Harrison R.M., Querol X., 2015, Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European. Atmospheric Environment, 111, 161-169.

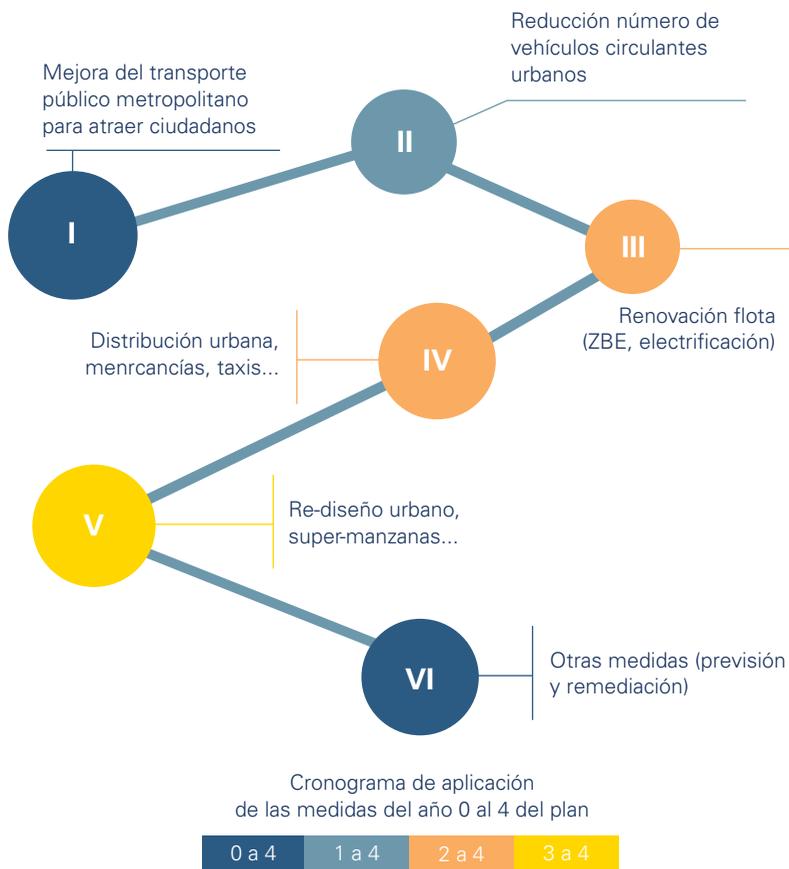


Figura 2

Grupos de medidas sobre el tráfico rodado y cronograma de aplicación en un plan de calidad del aire de 4 años.

se ha atribuido a que afectan a grandes zonas de la ciudad, se aplican a todo tipo de vehículos, excepto motocicletas –mientras que la mayoría de las ZBES lo hacen sobre vehículos pesados o de reparto–, y se aplican de manera muy

estricta¹⁴⁰. La ZBE, por tanto, sigue siendo una medida necesaria para reducir los componentes más tóxicos de las emisiones de combustión procedentes del tráfico (como el BC u hollín, declarado como cancerígeno por la Organización

140 AIRUSE-LIFE, 2016a. Low Emission Zones in North and Central Europe, Report R16_AIRUSE_LIFE 11 ENV/ES/584, 32 pp. http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/R16_AIRUSE-Low-Emission-Zones-CNE.pdf

Mundial de la Salud¹⁴¹, pero para ser también eficaz sobre el NO₂ debe ir acompañada de medidas tales como la electrificación e hibridación del parque urbano circulante. Las ZBEs y la electrificación deberían afectar también a las motocicletas, en especial en ciudades con un elevado porcentaje de estas sobre la flota total urbana, como en el caso de Barcelona, por ejemplo, donde representa un 30%.

4. Aplicación de criterios ambientales en la logística de distribución urbana de mercancías y el taxi, ya que las flotas presentan una elevada dieselización, con los mismos problemas de emisiones de los turismos pero con uno añadido, el elevado kilometraje diario que recorre cada vehículo. En Marsella, por ejemplo, se ha evaluado que este sector aporta alrededor del 50% de las emisiones urbanas de NO_x derivadas del tráfico rodado¹⁴². Además, muchos repartos y carreras se llevan a cabo en hora punta de tráfico (de 7 a 10 horas), lo que se suma a unas condiciones meteorológicas que favorecen más el estancamiento atmosférico y el efecto negativo sobre la calidad del aire con respecto a otros periodos diurnos con mayor convección que dispersa o diluye la contaminación. Se debería, pues, potenciar la electrificación, hibridación y gasificación de los vehículos de reparto y taxis; crear micro-plataformas

logísticas de distribución con vehículos de bajas emisiones; incentivar el reparto nocturno; asegurar que los establecimientos comerciales tengan espacio de almacenaje suficiente para reducir la frecuencia de las recepciones; y evitar la circulación de taxis vacíos.

5. Una vez aplicados los 4 tipos de medidas anteriores, se pueden llevar a cabo también transformaciones urbanísticas para alejar el tráfico a motor de los ciudadanos, disminuyendo de este modo su exposición a la contaminación. Construir carriles-bici seguros y alejados del tráfico, peatonalizar, crear y ampliar las zonas verdes, y reducir el espacio destinado al tráfico a favor de otros usos del territorio, como es el caso de las “supermanzanas” implementadas en Barcelona¹⁴³. Aplicar este tipo de medidas sin haber reducido antes los niveles de tráfico y eliminado los vehículos más contaminantes puede llevar a desplazar o concentrar el problema en otro lugar, en vez de solucionarlo.
6. Otras medidas adicionales de prevención y reducción, menos efectivas en cuanto a la mejora de la calidad del aire pero que pueden contribuir a incrementar la calidad de vida. Las principales medidas preventivas son la implantación masiva de sistemas de transporte activo, como la bicicleta, la regulación de la velocidad de

141 Loomis D., Grosse Y., Lauby-Secretan B., El Ghissassi F., Bouvard V., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Baan R., Mattock H., Straif K., (On behalf of the International Agency for Research on Cancer Monograph), 2013. The carcinogenicity of outdoor air pollution. *The Lancet Oncology*, *The Lancet Oncology* 14, 1262–1263.

142 LET & Aria Technologies, 2000. Balance of Urban Goods Movement in Bordeaux, Marseilles, 70 p. + annexes. 120 pp. Cited in BESTUFSII, 2006. Best Urban Freight Solutions II, Deliverable 5.1. Quantification of effects, EC 6th FP. 72 pp. http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/key_issuesII/BESTUF_Quantification_of_effects.pdf

143 Rueda S., 2017. The Superblock: A new urban cell for the construction of a new functional and urban model of Barcelona. “Jaca landscapecity” Seie Estrategias urbanas y paisajísticas. *Prensas Universidad de Zaragoza, P. de La Cal, J. Monclús (eds.)* (In press, 2017).

circulación para minimizar las retenciones de tráfico en las entradas, o la reducción de la velocidad urbana de 30 a 50 km/h para evitar la resuspensión de polvo de rodadura si hay problemas de PM_{10} –esta medida es perjudicial para el NO_2 ya que en un turismo diésel el incremento de emisiones de NO_x al pasar de 50 a 30 km/h puede ser del 20%–. Entre las medidas correctoras se incluyen el lavado y aspiración del polvo de rodadura de los firmes urbanos –especialmente después de episodios intensos de polvo africano–, la aplicación de supresores de polvo en las obras y parques, o el lavado de accesos y salidas de obra, entre otros¹⁴⁴.

Medidas sobre el sector doméstico y residencial

Como se ha expuesto en el capítulo introductorio, las emisiones domésticas y residenciales (calefacciones) derivadas del uso de combustibles sólidos (carbón y biomasa) ya son la primera fuente de B(a)P, $PM_{2,5}$ y PM_{10} , según la Agencia Europea del Medio Ambiente¹⁴⁵. El uso doméstico de carbón ha sido una de las causas principales de la contaminación atmosférica urbana en muchos países de Europa entre los años 1930 a 1970, y lo sigue siendo aún en algunas zonas del este de Europa y en China, entre otras regiones.

Más recientemente se ha producido un incremento de las emisiones domésticas por el uso creciente de biomasa en calefacciones como respuesta a las políticas de reducción de gases de efecto invernadero, y también en parte por su coste relativamente bajo. Algunos países como Dinamarca, Alemania y Austria han desarrollado una política de certificación de calderas de baja emisión y de las características y origen de los biocombustibles, la cual ha permitido limitar las emisiones del sector, En cambio, en la mayoría de los estados miembros de la Unión Europea se ha impulsado el uso de biomasa residencial sin el despliegue normativo de las certificaciones ni de su obligatoriedad en las instalaciones.

Por otro lado, se ha demostrado¹⁴⁶ que existen en el mercado pellets de madera tratada reciclada con alto contenido en metales, tales como As, Cr, Pb y Cu, y que las emisiones de PM de las calderas incrementaban marcadamente con el contenido en cenizas y humedad de los pellets. Es, por tanto, necesario dicho despliegue normativo, tanto en lo referente a la obligatoriedad de certificación de las calderas de baja emisión, como al origen natural y la humedad y cenizas de los pellets, para reducir las emisiones de este sector. Asimismo, sería muy conveniente no autorizar la instalación de calderas de combustibles sólidos en entornos urbanos con altos niveles de PM.

144 AXA-AIRUSE, 2017. AXA research fund guidebook on AIRUSE LIFE+ measures to improve air quality.185 pp. <http://www.cleanaircities.net/#products>

145 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency,EEA Report No 13/2017, 74pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

146 AIRUSE-LIFE, 2016b. Emission factors for biomass burning, Report R09_AIRUSE_LIFE 11 ENV/ES/584, 26 pp. http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/R09_AIRUSE-Emission-factors-for-biomass-burning.pdf

Además de estas medidas sobre las emisiones domésticas y residenciales, las relativas a la climatización de edificios y viviendas son también fundamentales para reducir las emisiones de NO_x , procedentes de las calefacciones en invierno y del consumo eléctrico de aires acondicionados en verano.

A resaltar también, finalmente, que estudios relativamente recientes¹⁴⁷ han demostrado que en entornos urbanos densos, las emisiones de las cocinas suponen aproximadamente un 15% de la materia orgánica que contiene el PM. Al ir disminuyendo las emisiones de otras fuentes, es posible que en un futuro no muy lejano estos focos de emisión deban ser tenidos en cuenta a la hora de aplicar medidas de mejora de calidad del aire.

Medidas sobre el sector industrial y de generación eléctrica

Las grandes instalaciones de estos sectores tienen normativas específicas que regulan sus emisiones de contaminantes atmosféricos, entre las cuales destacan la directiva de

emisiones industriales (1996/61/EC, 2008/1/EC, 2010/75/EC), la de grandes instalaciones de combustión (2001/80/CE) y la de instalaciones de combustión de tamaño medio (EU 2015/2193). No obstante, se han puesto de manifiesto una serie de necesidades con respecto a los planes de mejora sobre el sector industrial¹⁴⁸⁻¹⁴⁹, de las que destacamos las siguientes:

La contribución del sector industrial a los niveles en aire ambiente de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ alcanzan en muchos entornos urbanos el 20%, en gran parte debido a los aportes de PM secundario, generado en la atmósfera a partir de gases precursores. Por tanto, se requieren medidas que afecten no solamente a las emisiones de PM primario, sino también a gases reactivos (SO_2 , NO_x , NH_3 y COVs).

Las emisiones fugitivas (aquellas no canalizadas, sino producidas por resuspensión, manipulación de materiales pulverulentos, desmoldes, entre otros) pueden ser muy relevantes en el sur de Europa, por el ambiente predominantemente seco que favorece estas emisiones. Además, generalmente éstas no se tienen en cuenta en los inventarios. AIRUSE-LIFE¹⁵⁰ ofrece métodos

147 Mohr C., Decarlo F., Heringa M.F., Chirico R., Slowik J.G., Richter R., Reche R., Alastuey A., Querol X., Seco R., Peñuelas J., Jiménez J.L., Crippa M., Zimmermann R., Baltensperger U., Prévôt A.S.H., 2012. Identification and quantification of organic aerosol from cooking and other sources in Barcelona using aerosol mass spectrometer data. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 1649-1665.

Mohr C., Decarlo P., Maarten H., Chirico R., Richter R., Crippa M., Querol X., Baltensperger U., Prevot A.S.H., 2015. Spatial Variation of Aerosol Chemical Composition and Organic Components Identified by Positive Matrix Factorization in the Barcelona Region. *Environmental Science and Technology*. 49. 17, 10421-10430.

148 AIRUSE-LIFE, 2016c. Technical Guide for Industrial Emissions reduction. R26_AIRUSE_LIFE 11 ENV/ES/584, 34 pp. http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/R26_AIRUSE-TechGuide-industrial-emissions-reduction.pdf

149 AXA-AIRUSE, 2017. AXA research fund guidebook on AIRUSE LIFE+ measures to improve air quality.185 pp. <http://www.cleanaircities.net/#products>

150 AIRUSE-LIFE, 2016b. Emission factors for biomass burning, Report R09_AIRUSE_LIFE 11 ENV/ES/584, 26 pp. http://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/R09_AIRUSE-Emission-factors-for-biomass-burning.pdf

para el cálculo de sus emisiones así como las mejores técnicas disponibles (MTDs) para reducirlas.

Se requiere en la mayor parte de las ciudades una mejora de los inventarios de emisión industriales. Generalmente, se requieren actualizaciones de las actividades afectadas y controladas por la directiva relativa a esta cuestión, pero sobre todo aquellas que, por su tamaño reducido (pero generalmente numerosas), no están afectadas por ella, y con una evaluación control de sus emisiones muy reducidas.

Es fundamental remarcar la gran importancia de las instalaciones de pequeño tamaño, tanto de generación eléctrica como industriales, cuyo permiso de actividades reside en la administración local, la cual en muchos casos no tiene posibilidades de realizar controles de emisiones o de imponer requisitos clave para la reducción del impacto ambiental. En numerosos entornos urbanos, estos focos no están incluidos en los inventarios de emisión y no tienen un control adecuado de instalación de MTDs (Mejoras Técnicas Disponibles) para la reducción de emisiones. Por ello, se deben realizar esfuerzos importantes que corrijan esta situación. También es necesario resaltar la necesidad de un control adecuado de las actividades y MTDs del sector construcción en obra pública y privada. Como prueba de la gran relevancia

que pueden tener estas emisiones, cabe decir que los niveles más altos de contaminación por PM₁₀ registrados en Barcelona y su área metropolitana ocurrieron en 2008 como consecuencia de las obras públicas del metro y AVE (ver figura 3). Por este motivo, es importante aplicar estrictamente las ordenanzas municipales que afectan a la ambientalización de las obras de construcción públicas y privadas, así como realizar seguimientos y controles de su impacto en la calidad del aire. Querol et al.¹⁵¹, AXA-AIRUSE¹⁵² y AMB¹⁵³ proponen una serie de actuaciones y controles en obras que afectan tanto al transporte y manipulación de materiales, demoliciones, resuspensión y almacenamiento de material pulverulento, como al tráfico pesado asociado, con el fin de reducir su impacto en la calidad del aire.

Medidas en puertos y aeropuertos

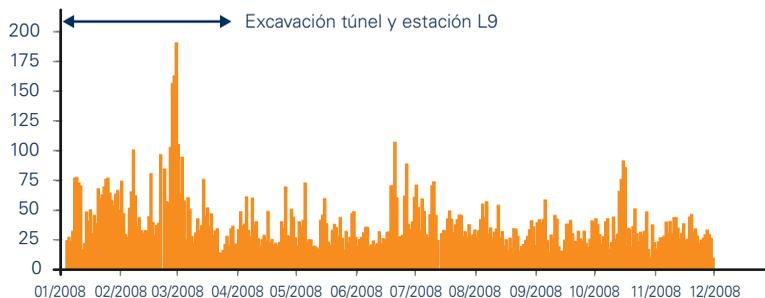
Dada la proximidad de puertos y aeropuertos a los núcleos urbanos, en muchas ocasiones sus emisiones atmosféricas de contaminantes afectan la calidad del aire de muchas ciudades. En el caso concreto de los puertos debemos considerar los siguientes focos de emisión de contaminantes con posible impacto en calidad del aire:

151 Querol X., Viana M., Moreno T., Alastuey A., Pey J., Amato F., Pandolfi M., Minguillón M.C., Reche C., Pérez, N., González A., Pallarés M., Moral A., Monfort E., Escrig A., Cristóbal A., Hernández I., Miró J.V., Jiménez S., Reina F., Jabato R., Ballester F., Boldo E., Bellido J., 2012. Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire. Colección Informes CSIC, n.3, ISBN 978-84-00-09475-1, 349 pp.

152 AXA-AIRUSE, 2017. AXA research fund guidebook on AIRUSE LIFE+ measures to improve air quality.185 pp. <http://www.cleanaircities.net/#products>

153 AMB, 2016. Guia de bones pràctiques per prevenir la contaminació causada per les obres públiques i privades. Àrea Metropolitana de Barcelona, 22 pp. <http://www.amb.cat/documents/11818/276916/Guia+contaminacio+obres.pdf/08708fea-67cf-4a07-bba7-920705628a66>

PM₁₀ (µg/m³) Diario en 2008 Zona Universitaria Barcelona



PM₁₀ (µg/m³) Anual El Prat de Llobregat



Figura 3

Ejemplo de impacto de las emisiones atmosféricas de PM₁₀ de obra pública en la calidad del aire en Barcelona y El Prat de Llobregat.

- Las emisiones de los motores de los buques, durante la espera, la aproximación y el amarre. Tanto las características de dichos motores como el tipo de combustible que utilizan generan emisiones elevadas y detectables dentro de las ciudades portuarias, sobre todo de PM, SO₂ y NO_x. La obligación del uso de combustibles con bajos contenidos en azufre y alto poder calorífico, la utilización de equipos de tratamiento de gases de combustión, la gasificación de buques y la electrificación de puertos para suministrar energía a los buques amarrados, son las principales medidas ambientales utilizadas en puertos europeos avanzados.
- En puertos graneleros, como los Tarragona, Castelló o A Coruña, un foco importante de emisión es la carga, descarga y manipulación de productos a granel, como carbón, cereales, minerales, cemento, chatarra, entre otros. Existen una serie de MTDs al respecto para reducir dichas emisiones, tales como tolvas anti-polvo, carga y descarga en lecho fluido, pantallas cortavientos, o construcción de recintos cerrados para la manipulación, como la Medusa del puerto de A Coruña. Además de la disposición portuaria de dichas medidas, es necesaria una correcta aplicación de las mismas, dado que unas prácticas de descarga inadecuadas, el almacenamiento de

parvas en intemperie o un transporte inadecuado puede eliminar el efecto del uso de las MTDs.

- La maquinaria pesada de carga y descarga, los generadores eléctricos y los vehículos portuarios son focos importantes de emisión de contaminantes atmosféricos y deben tenerse en cuenta para los planes de mejora de la calidad del aire. La electrificación y gasificación de los vehículos, la aplicación de filtros de PM y catalizadores para NO_x en la maquinaria pesada, y la exigencia de Euro 5 y 6 para camiones, son medidas relevantes en este sector.
- El tráfico de vehículos asociados a los ferris y cruceros (taxi, autobuses, vehículos de entrega de mercancías y recogida de residuos, entre otros) es muy denso en áreas portuarias, por lo que debe tenerse en cuenta en los inventarios de emisión y aplicarse las medidas de prevención y correctoras adecuadas.

El tema de las emisiones de contaminantes atmosféricos de los aeropuertos es también complejo, ya que presentan focos muy diversos de contaminación. Además del intenso tráfico rodado asociado y de los vehículos y maquinaria aeroportuaria (asimilable a las emisiones de los apartados 3 y 4 de los puertos) las aeronaves son focos importantes de NO y

partículas ultrafinas (UFP). En el primer caso, sus emisiones pueden tener relevancia en la contribución a emitir precursores de O₃; en el segundo, en incrementar UFP de ciudades con aeropuertos próximos, como Ámsterdam y Brisbane. Se ha demostrado que en estas dos ciudades se registran niveles elevados de UFP cuando las masas de aire procedían de sus respectivos aeropuertos¹⁵⁴⁻¹⁵⁵.

La reducción de emisiones de las aeronaves, sin embargo, está limitada por problemas de seguridad y no ha habido avances relevantes en las últimas décadas. El resto de las emisiones (maquinaria, vehículos aeroportuarios y gráfico rodado asociado) pueden tratarse de manera similar a la descrita para los puertos.

Medidas en el sector agrícola

Aunque las emisiones agrícolas pueden producirse a distancia de entornos urbanos, pueden afectar en gran medida la calidad del aire de los mismos. A modo de ejemplo, una de las vías más eficientes de disminuir la exposición humana a los niveles de PM_{2,5} es la reducción de las emisiones de NH₃ agrícola¹⁵⁶. Este gas es emitido a la atmósfera europea en un 94% por el sector agrícola y ganadero, según la Agencia Europea del Medio Ambiente¹⁵⁷,

154 Keuken M.P., Moerman M., Zandveld P., Henzing J.S., Hoek G., 2015. Total and size-resolved particle number and black carbon concentrations in urban areas near Schiphol airport (the Netherlands). *Atmospheric Environment* 104, 132-142.

155 Cheung, H.C., Morawska L., Ristovski Z.D., 2011. Observation of new particle formation in subtropical urban environment. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 3823-3833.

156 Lelieveld J., Evans J. S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A., 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371.

157 EEA, 2017. Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency, EEA Report No 13/2017, 74pp. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

fundamentalmente por la generación y utilización de fertilizantes orgánicos. Su carácter alcalino hace que la interacción con el SO_2 y el NO_2 , o sus ácidos derivados (H_2SO_4 y HNO_3), sea muy rápida y se generen sulfato y nitrato amónico, componentes mayoritarios del $\text{PM}_{2,5}$. Además de estas emisiones, el sector agrícola contribuye a contaminar el aire mediante la combustión de residuos agrícolas. Un ejemplo muy evidente es la quema de la paja de los arrozales que anualmente se realiza en el

entorno de Valencia capital, y que perjudica significativamente la calidad de su aire. Además de estos casos muy evidentes, la quema de rastrojos y residuos de poda puede contribuir asimismo a incrementar mucho los niveles de PM y B(a)P.

La resuspensión de partículas del suelo durante prácticas agrícolas puede tener también un efecto negativo en la calidad del aire, pero dado el tamaño generalmente grueso de dichas partículas su efecto es muy local¹⁵⁸.

158 Querol X., Viana M., Moreno T., Alastuey A., Pey J., Amato F., Pandolfi M., Minguillón M.C., Reche C., Pérez, N., González A., Pallarés M., Moral A., Monfort E., Escrig A., Cristóbal A., Hernández I., Miró J.V., Jiménez S., Reina F., Jabato R., Ballester F., Boldo E., Bellido J., 2012. Bases científico-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire. Colección Informes CSIC, n.3, ISBN 978-84-00-09475-1, 349 pp.
Revisión detallada de las emisiones atmosféricas del sector agrícola y de las MTDs para reducir las. Básicamente centradas en la tecnología de dosificación de fertilizantes orgánicos en cultivos y en evitar la quema agrícola incontrolada.

Plaza de Castilla

Andén 1



1 Pinar de Chamartín
Valdecarros →

9 Mirasierra
Arganda del Rey →

Salida →

Terminal de Autobuses
Acceso



Dr. Ingeniero Industrial por la UPM. Ha trabajado durante varias décadas en la EMT de Madrid en las áreas de Mantenimiento e Ingeniería, compatibilizando estas tareas con la docencia en varias universidades españolas y con el ejercicio libre de la profesión, siendo miembro de varias asociaciones de Transporte Nacionales e Internacionales.

Juan Ángel Terrón

Director Adjunto. Empresa Municipal de Transportes de Madrid, S.A.

Caso 1. La experiencia de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid

Preguntas clave del artículo

- ¿Qué responsabilidad tiene el transporte público colectivo en la generación de emisiones contaminantes?
- ¿En qué ámbitos se puede actuar para mejorar la calidad del aire urbana?
- ¿Qué medidas aplica la EMT de Madrid para reducir las emisiones de su flota?
- ¿Cuáles son los retos de futuro que se plantea la EMT de Madrid?

Apunte inicial

Algunas de las principales preocupaciones de los madrileños, según la Encuesta de Calidad de Vida del Observatorio de la Ciudad¹⁵⁹, son el tráfico y la contaminación del aire que respiramos. Ambas cuestiones están relacionadas con la Movilidad Urbana Sostenible, que es aquella capaz de satisfacer las necesidades de la sociedad de moverse libremente, con acceso para todos, comunicarse, comerciar o establecer relaciones, sin sacrificar valores humanos o ecológicos básicos actuales o del futuro. Y uno de esos valores es la calidad del aire urbano.

¿Qué responsabilidad tiene el transporte público colectivo en la generación de emisiones contaminantes?

En las áreas relacionadas con el transporte urbano en autobús, la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT), consciente de la importancia del transporte público en la ciudad, ha estado desde hace muchos años comprometida con la mejora de la calidad local del aire, llevando a cabo proyectos de innovación, pioneros en cada momento, y siendo un factor esencial en las políticas municipales para avanzar hacia un transporte urbano verdaderamente sostenible.

Los principales contaminantes que dan lugar a episodios graves de contaminación y que obligan a tomar medidas sobre el tráfico rodado son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas (PM). Y estos son, precisamente, los contaminantes que el transporte público puede contribuir a reducir. Toda la estrategia de EMT de innovación en combustibles, energías alternativas, sistemas de propulsión y eficiencia energética, se enmarca en su compromiso medioambiental con la ciudad intentando, con sus acciones, reducir la emisión de dichos compuestos.

No obstante, hay que hacer notar que, en los grandes núcleos urbanos como Madrid, la contaminación de NO_x, la más grave para la salud de las personas, está producida en un

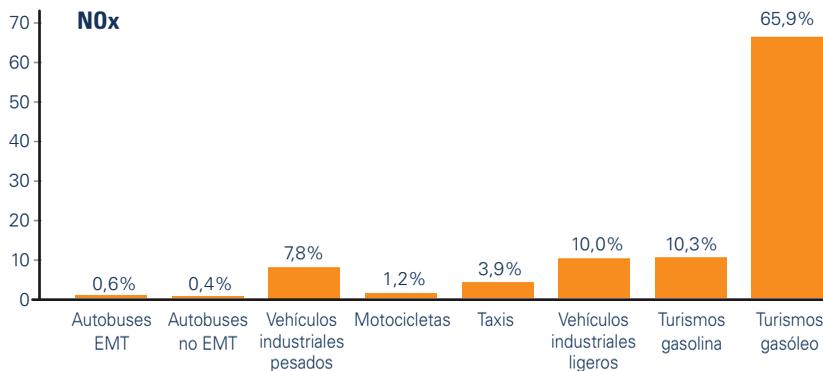


Figura 1

Contaminación de NOx en Madrid producida por el tráfico rodado, teniendo en cuenta los índices de ocupación.

66% por el tráfico rodado. De este porcentaje, el generado por los autobuses representa sólo el 7,5%, siendo los turismos privados los responsables del 64,8% de dicha contaminación. Si se tienen en cuenta los índices de ocupación, los autobuses urbanos solo provocan el 0,6% de la contaminación, mientras que los turismos privados que consumen gasóleo lo hacen en un 65,9% (ver figura 1).

Esta distribución pone de relieve que, en la lucha contra la contaminación en las ciudades, juega un papel muy importante la concienciación de los ciudadanos, ya que la mejora de la calidad del aire pasa, inevitablemente, por un cambio en los hábitos de la movilidad, dando una mayor importancia al uso del transporte público frente al vehículo privado.

Si se cuantifican las cantidades de NO_x y PM emitidas según se realice un viaje urbano en vehículo privado o en transporte público, los datos son muy reveladores. Por cada persona que realiza un viaje urbano de duración media en un vehículo de turismo diésel que cumpla la normativa actual menos contaminante, con el

grado de ocupación habitual en Madrid, se emiten a la atmósfera 47 mg de NO_x y 29 mg de PM. Si esta misma persona realizara ese mismo viaje en un autobús que cumpliera la misma normativa de emisiones, y cuya ocupación fuese tal que sólo llevará ocupadas las plazas sentadas, se emitiría, en el caso de que fuese un autobús de gasóleo, 43 mg de NO_x y 8 mg de PM. Si fuese, en cambio, un autobús de gas natural, se emitirían 25 mg de NO_x y 2 mg de PM; es decir, en este caso se reduciría un 47% los NO_x y un 93% de PM.

¿En qué ámbitos se puede actuar para mejorar la calidad del aire urbana?

La EMT, es una es una sociedad anónima propiedad del Ayuntamiento de Madrid que se ocupa de gestionar el transporte urbano en autobús en la capital. Tiene asimismo

Figura 2

Flota Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT).

Año (31-12)	Gasóleo/Biodiesel			GNC		Dual-Fuel	Etanol	Electricidad	Hidrógeno	Flota
	Convencional	Transmisión eléctrica	Híbrido	Convencional	Híbrido					
2006	1.793	20		201			5		3	2022
2007	1.647	20		251			5	10		2033
2008	1.634	20		381			5	20		2060
2009	1.650	6		411			5	20		2092
2010	1.569	2	1	503			5	20		2100
2011	1.415		4	651			5	20		2095
2012	1.217		4	736	23			20		2000
2013	1.186		4	767	23			20		2000
2016	892		34	937	23	3		18		1907
2017	777		34	1.170	18	3		38		2040

encomendada la gestión de otras tareas relacionadas con la movilidad en la ciudad, como la gestión de la grúa municipal, de una parte de los aparcamientos públicos existentes y del sistema de bicicleta pública, contando además con un área de consultoría internacional.

La empresa fue fundada en 1947 para atender la demanda de transportes de Madrid. Actualmente, es una de las empresas de transporte urbano más importantes de Europa por tamaño de flota, número de viajeros transportados o innovación tecnológica empleada. Se transportan anualmente más de 410 millones de viajeros y se recorren 95 millones de kilómetros en sus 213 líneas regulares, de las cuales 26 prestan servicio nocturno. Cuenta con una plantilla de más de 9.300 trabajadores y gestiona las 88 grúas

municipales, sus 6 bases de vehículos retirados por la misma y dieciocho de los aparcamientos municipales públicos. Asimismo, cuenta con cinco Centros de Operaciones desde donde se abastece y mantiene la flota (ver figura 2), más de la mitad de ella propulsada por gas natural comprimido (GNC), y con más del 60% de autobuses de bajas emisiones.

Desde siempre, EMT ha estado preocupada y ocupada en contribuir a la mejora de la calidad del aire urbano, desarrollando y utilizando las tecnologías más innovadoras en combustibles y fuentes de energía alternativas. En los últimos años, la evolución de la flota ha avanzado hacia tecnologías menos contaminantes incluyendo, por ejemplo, autobuses de pila de combustible (ver figura 2).



Figura 3

Zona de Bajas Emisiones de Madrid.

Sin embargo, los ámbitos de actuación para contribuir a mejorar la calidad del aire local no deben circunscribirse, únicamente, a los vehículos empleados en el transporte urbano, sino que, también que el radio de acción debe abarcar también todas las actividades que tengan que ver con la movilidad, actuando sobre los vehículos, las instalaciones relacionadas con éstos y las personas que los manejan y mantienen. Esta forma amplia de actuar, innovando con nuevas fuentes de energía, diferentes combustibles, diferentes tecnologías de propulsión, y formando a los conductores, se completa con el diseño y construcción, teniendo en cuenta la sostenibilidad, de los nuevos Centros de Operaciones donde dichos vehículos pernoctan y son mantenidos. Sólo con esta

visión transversal, actuando simultáneamente en todos los campos relacionados con el transporte urbano, se conseguirán frutos para mejorar la calidad del aire de la ciudad. En las zonas centrales de las grandes concentraciones urbanas es donde, generalmente, el aire tiene concentraciones de contaminantes más elevadas debido a la mayor densidad de población y de vehículos, y con mayores problemas de congestión y polución. Por este motivo, en diversas ciudades, Madrid entre ellas, se han definido zonas de especial protección medioambiental; las denominadas zonas de bajas emisiones (ZBE, ver figura 3). Las actuaciones sobre los vehículos que se comentarán seguidamente, implantadas en dichas zonas, permiten transformar los centros

de las ciudades en espacios mucho más saludables y sostenibles.

Se pretende así que, la zona más interior de la ciudad, con mayor grado de posibilidad de contaminación, se vea más protegida mediante el uso de tecnologías más limpias en los autobuses. Es en estas zonas donde las acciones que se acometan tienen una mayor rentabilidad social.

¿Qué medidas aplica la EMT de Madrid para reducir las emisiones de su flota?

Las actuaciones que ha llevado a cabo la EMT, para contribuir a los objetivos globales de la calidad del aire de Madrid, se explican someramente a continuación.

Sobre las operaciones

Rediseño de líneas de autobuses

EMT realiza continuamente un estudio de las líneas de autobuses en servicio, fundamentalmente desde el punto de vista del servicio público y la demanda de trayectos. Pero también se esfuerza en optimizar los modelos de autobús de cada línea según las condiciones medioambientales de la zona por la que transcurre la misma o rediseñándolas para que, garantizando el mismo servicio, condiciones de velocidad, paradas, etc., se produzca la menor contaminación posible.

Implantación de carriles bus y control de los mismos

Otra medida orientada tanto a la mejora de las condiciones de servicio como a la minimización de la contaminación es la creación de carriles bus de uso exclusivo para el transporte público. Estos carriles, controlados a su vez por EMT con vehículos eléctricos exentos de contaminación, aumentan la velocidad comercial de las líneas, consumiendo menos combustible y emitiendo una cantidad significativamente menor de emisiones de gases de escape.

Sobre el material móvil

Establecimiento de criterios de adquisición de vehículos

En los pliegos de condiciones para la adquisición de autobuses, se encuentran definidas las condiciones que han de cumplir los mismos a fin de minimizar los consumos energéticos de los vehículos y los niveles de emisiones máximos. Pero, además, los criterios de adquisición están orientados al empleo de energías limpias y contemplan la cuantificación y valoración de las emisiones durante toda la vida útil del vehículo. Esta inclusión en los pliegos de EMT se hizo mucho antes de que lo indicase la legislación europea, no teniendo únicamente en cuenta el coste de adquisición.

Autobuses de gas natural comprimido (GNC)

EMT ha sido una de las primeras empresas en Europa en el uso de GNC como combustible para autobuses urbanos, recibiendo en 1998

el Premio Nacional de Medio Ambiente. En el año 1994, inicia su experiencia en la utilización de GNC como combustible participando en el Proyecto Ecobus de la Unión Europea, al amparo de su programa THERMIE¹⁶⁰. Tras haber resultado positiva la experiencia del Ecobus, por ser uno de los combustibles más limpios que existen, ser compatible con la tecnología diésel, estar asegurado su suministro regular, tener un precio estable y ser una alternativa al petróleo, EMT de Madrid decide, a partir de 1995, introducir en su flota la utilización del GNC como nuevo combustible. En ese año se realiza la primera instalación de compresión de gas natural, con capacidad para 20 autobuses, cargándose en unas 3 horas. Desde entonces se ha aumentado paulatinamente el número de autobuses de la flota impulsados con GNC y, en consecuencia, el tamaño de las instalaciones de carga, que han crecido en potencia, eficiencia y rapidez de carga. A día de hoy, el repostado se realiza mediante estaciones de carga a través de potentes compresores que abastecen puestos de llenado rápido en 3 minutos.

Por ser actualmente la mejor alternativa al gasóleo desde los puntos de vista medioambiental y económico, EMT, a partir del año 2010, tomó la decisión de adoptar el GNC como combustible básico de su flota, de modo que todos los autobuses que se adquiriesen deberían emplear energías alternativas al gasóleo, y ser de GNC, híbridos o eléctricos. A finales de 2017 casi un 60% de la flota de EMT era de GNC, disponiéndose de surtidores de suministro en todos sus Centros de

Operaciones, y habiéndose construido uno nuevo diseñado íntegramente para autobuses de GNC.

La utilización por EMT de este tipo de autobuses ha supuesto una reducción del 75% de las emisiones de NO_x y del 95% de PM mientras que el avance de la tecnología diésel ha permitido, en el mismo plazo, una reducción media del 55% de las emisiones de NO_x y del 80% de las de PM.

Tratamiento de gases de escape.

Para reducir la contribución del transporte urbano a la contaminación por NO_x, además de emplear combustibles que lo produzcan en menor cantidad, es necesario implantar sistemas de tratamiento de los gases de escape en autobuses ya en servicio, empleando catalizadores de oxidación y reducción para eliminar tanto las partículas como los NO_x. Entre los años 2012 y 2014, se han instalado 510 catalizadores en otros tantos autobuses de gasóleo para mejorar su nivel de emisiones. Estos elementos hacen que autobuses que originalmente estaban homologados según la normativa Euro III de emisiones de gases de escape, pasen a emitirlos con niveles inferiores a los contemplados en la Norma Euro V, con lo cual la ZBE de Madrid quedó atendida totalmente por autobuses poco contaminantes.

Sistema *start-stop*

Los sistemas *start-stop* consiguen un ahorro en el consumo de combustible y una reducción

160 http://cordis.europa.eu/news/rcn/10653_es.html

de emisiones contaminantes, parando el motor de combustión cuando se encuentra a ralentí debido a una detención del vehículo. El sistema se activa tanto en los semáforos como en las paradas de viajeros, así como en otras condiciones de tráfico que impliquen detener el vehículo durante un determinado tiempo. Permiten, por tanto, emplear el “sentido común” y tener encendido el motor térmico sólo cuando el autobús está en movimiento. Un autobús, circulando en Madrid, recorre una media de 200 km al día, realiza unas 50 paradas –de más de 5 segundos– a la hora, estando parado en cada una de ellas unos 28 segundos durante las 15 h diarias de trabajo, lo que supone casi el 40% del tiempo total de trabajo. Dado que el consumo de combustible al ralentí es 0,5 g/s, se alcanza un ahorro de combustible de 10,5 kg de gasóleo al día; es decir, un 8% de disminución, valor similar al de reducción de las emisiones de contaminantes.

Proyecto dual-fuel

Como se ha dicho, el gas natural comprimido (GNC) arroja ventajas económicas y medioambientales frente al gasóleo. Por ello, EMT se ha interesado por la tecnología dual-fuel, que permite utilizar el gas natural simultáneamente con el gasóleo como combustible, en autobuses diésel. La tecnología dual-fuel, o de combustión compartida, se puede definir como la combustión simultánea de dos combustibles; en este caso, el gas natural se utiliza en combinación con el gasóleo

para hacer funcionar el motor diésel. En transporte urbano pueden llegarse a porcentajes del 50% de gasóleo y del 50% de GNC. Una vez realizada la modificación, el motor puede funcionar en modo dual-fuel o exclusivamente con gasóleo, pero en ningún caso con gas natural exclusivamente.

El empleo de la mezcla de gas natural y gasóleo reduce de forma importante las emisiones de gases contaminantes, que dependen de las condiciones de operación del motor y de los niveles de sustitución del gasóleo que se alcancen. Asumiendo niveles típicos de sustitución del 50%, las reducciones de CO₂ se sitúan entre el 10% y el 15%, las de PM pueden alcanzar el 50%, y las de NO_x entre un 35% y un 65%¹⁶¹.

Además, por la sustitución de una parte de gasóleo por GNC, que es más barato, se produce un beneficio económico que permite el retorno de la inversión y hace viable el proyecto.

Transmisión eléctrica

En el año 2000 se puso en servicio una flota de 20 vehículos de transmisión eléctrica para circular por el centro de la ciudad. Se trataba de un vehículo de longitud media (9 m) que contaba con una transmisión eléctrica constituida por un generador, una electrónica de potencia y un motor eléctrico, además de los elementos auxiliares que ello comporta, en lugar de la cadena cinemática mecánica tradicional (embrague y caja de cambios). No obstante, la energía sigue siendo suministrada por un motor

térmico de gasóleo, no lleva acumulación de energía y no recupera energía de frenado. El rendimiento de la cadena cinemática eléctrica es superior al de la cadena mecánica, por lo que se obtiene un ahorro de combustible y de emisiones de un 10% en comparación con un vehículo convencional del mismo tamaño que realice el mismo tipo de servicio. Asimismo, el confort de los pasajeros mejora al aumentar la suavidad de la marcha que proporciona el motor eléctrico.

Pila de combustible

EMT participó durante el período 2003-2005 en los proyectos CUTE/ECTOS¹⁶² y CITYCELL¹⁶³, consistentes en la puesta en explotación de autobuses eléctricos dotados de pila de combustible. Este tipo de autobuses utilizan hidrógeno como vector energético primario, generando la energía eléctrica necesaria para la tracción y produciendo como único subproducto vapor de agua.

Al participar en los dos proyectos, EMT de Madrid fue la única empresa que llegó a tener, simultáneamente, 4 autobuses de pila de combustible en servicio.

- **Proyecto Cute.** Se trataba de 3 autobuses Mercedes Benz con pila de combustible de 205 kW trabajando en la modalidad full power, es decir, produciendo la electricidad en el momento en que se requería su empleo, sin acumulación y trabajando en régimen transitorio.

- **Proyecto Citycell.** Se trataba de 1 autobús IVECO, con pila de combustible de 62 kW, funcionando como vehículo híbrido, con baterías de almacenamiento y trabajando en régimen estacionario.

Se demostró que la tecnología de pila de combustible es viable en transporte urbano, con cero emisiones de gases de escape y muy baja contaminación acústica, pero evidenciando también que es necesario incrementar la autonomía y fiabilidad de los vehículos y de las estaciones de carga, así como crear una red de distribución del hidrógeno.

Autobuses híbridos

La necesidad de un transporte sostenible en la sociedad actual está fuera de todo duda, así como que la electricidad será la energía de tracción del futuro. Pero, con el estado actual de la técnica de acumulación de energía, los autobuses tienen problemas de autonomía para efectuar el servicio diario habitual si se emplea propulsión eléctrica pura, teniendo que recurrir a recargas intermedias en su jornada de trabajo. Debido a ello, el empleo de autobuses con propulsión híbrida, mediante el empleo de motores térmicos y eléctricos, y con sistemas de acumulación de energía, se han generalizado y serán imprescindibles durante el periodo de transición desde los autobuses con motores térmicos actuales hasta los autobuses puramente eléctricos del futuro.

162 http://cordis.europa.eu/pub/sustdev/docs/energy/sustdev_h2_sessionb_schuckert.pdf

163 <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/7538/Anexo%20I%202020EI%20hidrogeno.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Con la propulsión híbrida se consigue que, durante un cierto tiempo, se pueda circular con tracción eléctrica con energía procedente de la energía acumulada, recargándose estos acumuladores cuando sea necesario mediante el motor térmico, lográndose así la autonomía requerida, un ahorro de combustible y una reducción de las emisiones contaminantes. En el transporte urbano, según la estrategia de control que se utilice, se puede utilizar la hibridación como herramienta para mejorar la calidad del aire en la ciudad, haciendo que el operador pueda decidir cuándo funciona el autobús en modo eléctrico puro (p. ej. en las ZBE), contribuyendo así a la reducción local de las emisiones.

- **Híbridos de gasóleo.** En el año 2016, EMT adquirió 30 autobuses híbridos de gasóleo, 17 de la marca MAN, equipados con ultracondensadores, y 13 de la marca IVECO, dotados de baterías, ambos no enchufables. Estos vehículos están destinados a circular en unas líneas concretas en el este de la capital y se engloban dentro del proyecto europeo ECCENTRIC¹⁶⁴, que pretende implantar sistemas de movilidad sostenible integrados con la planificación urbanística. Los ahorros de combustible y, en consecuencia, de emisiones y CO₂, se sitúan entre el 30% y el 35% respecto a un vehículo de propulsión convencional.
- **Híbridos de gas natural comprimido (GNC).** EMT solicitó a los fabricantes de autobuses Castrosua y Tata Hispano que desarrollasen un autobús híbrido propulsado a gas natural. Así

surgieron dos modelos de autobuses híbridos de GNC de los cuales EMT ha adquirido 23 unidades, 10 de la marca Tata Hispano y 13 de la marca Castrosua, siendo de los primeros autobuses híbridos de GNC que se comercializan en Europa. El consumo y las emisiones de CO₂ se han reducido entre un 28% y un 35%, en comparación con los valores de un autobús de GNC y hasta un 70% las emisiones de NO_x y PM con respecto a un vehículo de gasóleo.

- **Autobuses reconvertidos.** EMT de Madrid participó, junto con TMB de Barcelona y EMT de Valencia, en el Proyecto Electrobus, con financiación del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE), consistente en la reconversión de autobuses diésel en servicio en autobuses híbridos diésel-eléctricos (ver figura 4). En 2011 se llevó a cabo una reconversión de 4 autobuses diésel Iveco Cityclass Euro III en autobuses híbridos diésel eléctricos, configuración serie, los cuales han disminuido su consumo de gasóleo y sus emisiones en un 18% con respecto a los vehículos de propulsión convencional. La transformación ha consistido en la eliminación de la caja de cambios, la instalación de un generador eléctrico de 180 kW arrastrado por el motor térmico original, la incorporación de dos motores eléctricos de tracción en tándem, de 67,5 kW de potencia cada uno, y la incorporación de elementos de control y auxiliares tales como inversores, radiadores o bomba de dirección. Como elementos almacenadores de energía se instalan, en serie, 6 unidades de supercondensadores, con una tensión total de

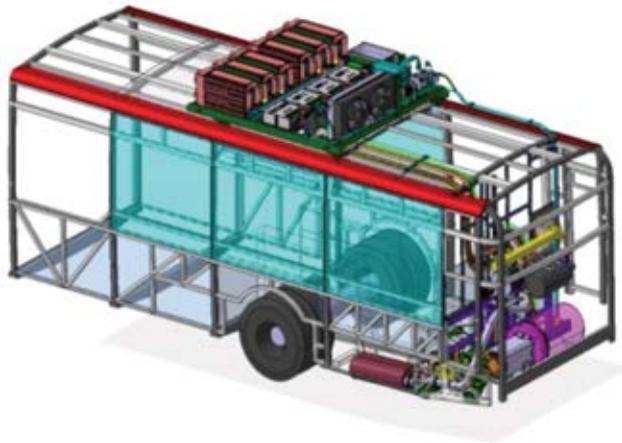


Figura 4

Vista general de la instalación de conversión a vehículo híbrido.

750 voltios y una capacidad de 10 faradios que se ubican en la zona del techo.

Minibuses eléctricos

EMT dispone desde el año 2007 de 20 minibuses eléctricos marca Tecnobus, modelo Gulliver, que prestan servicio en dos líneas que discurren por las estrechas calles del casco histórico de Madrid, dentro de la ZBE (ver figura 5). En su recorrido no se ven alteradas las condiciones medioambientales al no emitir ningún gas contaminante y producirse únicamente el sordo ruido de rodadura de los neumáticos sobre el asfalto. Estos pequeños vehículos, de 5,5 m de longitud, funcionan con la energía almacenada en dos módulos de acumuladores de Ni/NaCl, 72 kWh a 85 V de tensión. El peso de cada módulo es de casi 300 kg y van situados en la parte trasera del vehículo.

El motor eléctrico que mueve el autobús, de tracción delantera, tiene una potencia máxima de 27,2 kW, alcanzando una velocidad máxima de 32 km/h. Se consigue así una velocidad comercial de 6 km/h, cifra satisfactoria dadas las características de las calles por las que se circula. Ello ha permitido ahorrar unos 6.000 litros de gasóleo por minibús y año, que se habrían consumido en caso de realizar este transporte con vehículos convencionales, con la consiguiente reducción también de contaminantes reglados y gases de efecto invernadero. También se cuenta con otro minibús eléctrico, marca Bredamenarinibus, modelo ZEUS, para transportes internos e institucionales.

Vehículos de servicio

Por otro lado, para el servicio interno de la empresa, se dispone de una flota de vehículos auxiliares de turismo dentro de la cual, desde



Figura 5

Minibús eléctrico.

2015, existen 5 turismos eléctricos marca Renault modelo ZOE equipados con baterías ión-litio de 22 kWh y un motor eléctrico de 65 kW, con lo que disponen de una autonomía próxima a los 150 km y una velocidad máxima de 135 km/h.

Recarga de oportunidad

Ya que actualmente los autobuses eléctricos existentes en el mercado no poseen la autonomía requerida, se hace necesario sustituirlos a mitad de su jornada de trabajo por otros ya recargados, o bien emplear sistemas de recarga intermedia durante su servicio denominados sistemas de recarga de oportunidad. Éstos consisten en recargar el vehículo parcialmente, en la propia línea, generalmente en sus cabeceras. De este modo, mediante sucesivas recargas durante su jornada de trabajo, se incrementa su autonomía de forma indefinida.

La recarga de oportunidad puede llevarse a cabo mediante recarga conductiva, por contacto, generalmente con un pantógrafo instalado en una estructura más o menos visible; o bien con el sistema más novedoso y menos visible de recarga por inducción electromagnética, sin contacto físico entre el vehículo y la terminal de carga, efectuándose mediante una bobina primaria instalada en los bajos del autobús y una bobina secundaria instalada bajo el pavimento de la calzada. Durante el tiempo en que el vehículo permanece en cabecera en cada uno de los viajes, las baterías se cargan sin otra intervención humana que no sea la de colocar el vehículo sobre la zona de carga. Ello permite un sistema rápido seguro, eliminando contaminación visual en la ciudad y ampliando indefinidamente la autonomía del autobús. Es un sistema muy interesante para líneas concretas que entren en determinadas zonas sensibles de la ciudad, ya que permite la

circulación eléctrica del autobús sin problemas de autonomía.

EMT ha implantado recientemente, en octubre de 2017, una línea de autobuses eléctricos con recarga de oportunidad por inducción.

Experiencias previas permiten asegurar una eficiencia del sistema del 95%, permitiendo un ahorro que será superior al 15%, puesto que no se producirán viajes en vacío por falta de autonomía de los vehículos. Además, debido a las recargas de oportunidad, la cantidad de baterías instaladas a bordo de los autobuses puede ser menor, con consumos unitarios también inferiores.

Sobre la formación de conductores

Formación con simuladores de conducción

Al objeto de reducir el número de horas de prácticas de conducción en calle, contribuyendo al ahorro energético y reduciendo a cero la emisión de gases y ruido durante el proceso de formación, EMT de Madrid dispone de cuatro simuladores de conducción que reproducen los principales modelos de autobuses actualmente en explotación y las diferentes situaciones de tráfico que pueden producirse en la ciudad.

Conducción eficiente

Con el objetivo de mejorar la eficiencia en la conducción de los autobuses, EMT desarrolla un proyecto para conseguir una reducción del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes, así como una cierta mejora en el

mantenimiento del vehículo, lo que finalmente impacta en la imagen social corporativa de la compañía.

La solución tecnológica consiste en implantar un módulo embarcado que almacene y procese información relevante (por ejemplo, aceleración/frenado brusco, velocidad, etc.; ver figura 6) informando al conductor, en tiempo real, de su grado de eficiencia en la conducción, y enviando al centro de control los datos para su posterior análisis que, mediante diferentes indicadores de eficiencia de conducción, permitan reducir el gasto de combustible e incrementar la comodidad de los pasajeros.

Por otro lado, a través del módulo procesador se pueden controlar el encendido y apagado de sistemas propios del autobús, en función de variables y parámetros preconfigurados, como luminarias, climatización, sistemas de billeteo, paneles, etc., lo que permite también una reducción del consumo de energía del conjunto. La incorporación de estos sistemas, junto a una política de formación y evaluación continua de los conductores en conducción eficiente, permite conseguir reducciones de hasta un 11% a corto plazo –un 3% de forma mantenida en el tiempo–, tanto del consumo de combustible y de las emisiones de cada vehículo, como de los costes de mantenimiento.

Diariamente se obtienen datos sobre aceleraciones, velocidades, etc. que son analizados por los conductores y por formadores para detectar posibles mejoras en la conducción, relacionándolos con puntos concretos de las líneas urbanas y consiguiendo así un cambio estable y duradero de los hábitos de conducción.

Figura 6

Aceleración longitudinal en función del tiempo.



Sobre el diseño de instalaciones

En las instalaciones fijas y edificaciones debe tenerse en cuenta desde las etapas de diseño del proyecto constructivo; siempre que sea posible, que éstas sean eficientes energéticamente, empleen energías renovables y poco contaminantes, y utilicen sistemas de reciclaje para reducir la cantidad de residuos. Con este concepto surgen los centros de operaciones de Carabanchel, para vehículos de gasóleo, y Sanchinarro, construido para vehículos de GNC, tras la decisión de EMT en 2010 de que los nuevos autobuses fuesen mayoritariamente de este combustible. El Centro de Sanchinarro ha sido diseñado para emplear técnicas constructivas poco agresivas para el medio ambiente, generar pocos residuos y reciclar todo aquello que sea posible (ver figura 7).

Ahorro energético

El ahorro energético de los centros repercute directamente en el consumo de gas y electricidad, así como en el nivel de emisiones contaminantes. Por ello, se realiza un control exhaustivo del correcto funcionamiento de las instalaciones para tratar de conseguir una eficiencia energética continua.

La planta de cubiertas de este Centro está dotada también de paneles solares, térmicos y fotovoltaicos, para reducir el consumo de energía de origen fósil y, en consecuencia, los contaminantes emitidos a la atmósfera, contribuyendo así a mejorar la calidad del aire de la ciudad.

El respeto al medio ambiente ha sido de máximo interés en el diseño de los edificios, como lo demuestra el hecho de emplear gas natural como combustible de toda la maquinaria del Centro, de filtrar el aire de ventilación, que



Figura 7

Cubiertas vegetadas en el Centro de Operaciones de Sanchinarro.

se devuelve al exterior tras recuperar gran parte de la energía utilizada, de recoger el agua de lavado de los autobuses para su posterior reciclado y reutilización, y de incrementar las zonas verdes, disponiendo de una parte ajardinada de la cubierta y de jardines verticales.

Puntos de acceso público para recarga de vehículos eléctricos

Asimismo, compatible con esta estrategia de movilidad eléctrica global en Madrid, EMT está innovando los sistemas de recarga existentes en las instalaciones que gestiona en la ciudad –aparcamientos, centros de operaciones, etc.–, instalando puntos de recarga rápida para uso público, como es el caso de los implantados durante 2017 en varios aparcamientos, incluido el de Colón, con la participación del Ayuntamiento de Madrid, que cuenta con

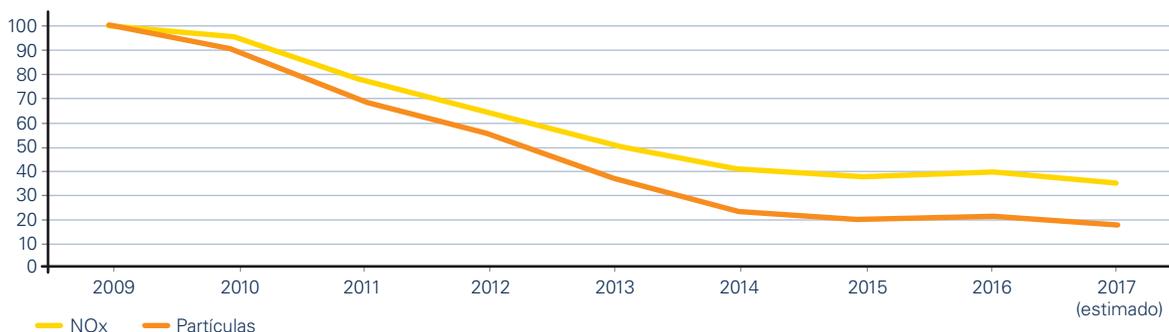
una dársena para carga rápida simultánea de cuatro vehículos. En este momento ya existen 75 puntos de carga lenta y otros 12 de carga rápida.

¿Cuáles son los retos de futuro que se plantea la EMT de Madrid?

Todas las actuaciones anteriormente referidas han contribuido a que las emisiones de NO_x y PM de la flota de EMT se hayan reducido drásticamente en la última década (ver figura 8). El reto de la empresa y de la ciudad es continuar con la tendencia de disminución conseguida.

Figura 8

Evolución relativa anual de emisiones de NO_x y PM en EMT de Madrid (respecto 2009).



Flota autobuses eléctricos

EMT considera que el futuro del transporte urbano, a largo plazo, pasa por la movilidad eléctrica, que será la única capaz de hacer las ciudades medioambientalmente sostenibles. Para alcanzar la electrificación y descarbonización del transporte urbano en una década es necesario comenzar, desde hoy mismo, a implantar esa movilidad.

Las ventajas que reporta la utilización del vehículo eléctrico pueden agruparse, de forma simplista, en tres áreas: eficiencia energética, mediante una utilización más racional de la energía consumida; medio ambiente, con una mejora sustancial de la contaminación global emitida “del pozo a la rueda” y una eliminación total de la contaminación local; y gestión de la demanda, a través de una mayor eficiencia del sistema eléctrico, reduciendo la dependencia energética de energías fósiles y utilizando las horas valle para la recarga.

Sin embargo, el estado actual de la técnica en cuanto a autonomía de los autobuses, la carga de las baterías y el estado de las redes de distribución eléctrica, además del coste de vehículos e instalaciones, son barreras que hacen que el camino no sea fácil ni rápido. EMT está iniciando este camino de la electromovilidad de su flota con el proyecto de recarga por oportunidad antes mencionado, y con el inicio de la implantación de autobuses eléctricos de 12 m, con una estrategia de crecimiento de la flota eléctrica en Madrid que contempla actuaciones en un plazo de unos seis años, de modo que para 2020 existan unos 80 autobuses eléctricos, cifra que aumentará hasta los 250 al final de dicho período.

En cuanto a autobuses estándar de 12 m de longitud, eléctricos, EMT ha llevado a cabo ensayos con los principales modelos de autobuses de esas características que se están

comercializando en Europa. Dichos vehículos son de las marcas IRIZAR, BYD, FOTON, EURABUS, EVOPRO, SOLARIS E IVECO, todos de piso bajo. Con excepción del IRIZAR, cuyas baterías son de sales fundidas, el resto están equipados con baterías de ión-litio. Aunque cada uno tiene una capacidad de almacenamiento diferente, todos superan los 200 kWh de energía almacenada, si bien el modelo IRIZAR alcanza los 376 kWh.

De los ensayos realizados se desprende que los autobuses eléctricos actuales tienen un consumo energético de entre 1,5 y 1,7 kWh/km por lo que, con el estado actual de la técnica aún no pueden competir, en autonomía, con otro tipo de combustibles, aunque cada vez se aproximan a éstos a mayor velocidad.

EMT ha adquirido 15 autobuses eléctricos del modelo IRIZAR que servirán como flota piloto inicial, para ir aumentando paulatinamente el número de autobuses “cero emisiones” que circulen por Madrid.

Flota de gas natural comprimido (GNC)

Pero mientras se llevan a cabo estos planes y se avanza en esa electromovilidad, el gas natural comprimido es la única alternativa real a los combustibles fósiles tradicionales, en cuestiones económicas y medioambientales. Por ello, se continuará con la generalización de uso de los autobuses de GNC en la flota de modo que, alrededor del año 2021 la totalidad de los autobuses urbanos de la capital se muevan propulsados con GNC, con excepción de aquellos que ya sean eléctricos, dejando el gasóleo como un combustible del pasado.

Nuevo Centro de Operaciones para autobuses eléctricos

El plan de actuación para implantar autobuses eléctricos lleva a otra de las acciones innovadoras de EMT: el diseño y construcción de un Centro de Operaciones diseñado específicamente para autobuses eléctricos con capacidad para 300 autobuses.

La principal innovación del Centro será el sistema inteligente de recarga para autobuses, que contemplará la posibilidad de realizar cargas rápidas o lentas de las baterías mientras los autobuses se encuentren en el área de aparcamiento, permitiendo compatibilizar de este modo las labores de mantenimiento y las de recarga. La recarga se hará por pantógrafos instalados en la zona de estacionamiento y controlados desde un puesto centralizado. Otras importantes innovaciones del Centro de Operaciones serán la instalación de paneles fotovoltaicos en el tejado de la zona de aparcamiento para el autoabastecimiento de energía y la recarga de los autobuses, y también la instalación de una electrolinera pública que podrá ser utilizada por cualquier usuario, dotada de sistemas de recarga rápida, principalmente para turismos. Con ello, EMT facilita y contribuye a la promoción del vehículo eléctrico para su uso en la ciudad.

Con la aplicación de todas estas medidas, nuestros clientes pueden disfrutar de la oferta de movilidad de la EMT y desplazarse por la capital empleando la menor cantidad de energía necesaria para su transporte, utilizando las técnicas y tecnologías menos contaminantes y disponiendo de una empresa que es referencia europea en el sector del transporte urbano. Con

dichas actuaciones, EMT de Madrid ha dejado también de emitir a la atmósfera, en los últimos 9 años, un total de casi 4.000 toneladas de NO_x y casi 100 toneladas de partículas.

El futuro pasa inexorablemente por la electromovilidad en el transporte urbano, donde EMT ha iniciado la electrificación de una parte de su flota y está planificando el diseño de una cochera para autobuses eléctricos como parte de su estrategia.

La contaminación del aire en las ciudades es uno de los principales problemas de la civilización actual. Luchar contra esto es cosa de todos. Por ello se debe actuar en todos los campos y el transporte urbano es uno de ellos. El empleo de combustibles más limpios es una necesidad en tanto se consiguen

los avances técnicos necesarios para que la movilidad eléctrica se implante definitivamente como el modo de transporte motorizado en los conglomerados urbanos.

Es deber de las grandes empresas de transporte urbano, promover la movilidad sostenible con actuaciones de todo tipo dirigidas a la mejora de la calidad del aire local, no solo actuando sobre la flota sino también formando a su personal y diseñando instalaciones que consuman poca energía y que sea de origen renovable. También es su deber y el de los municipios dirigir las acciones hacia la descarbonización del transporte urbano comenzando por la modificación de los hábitos de transporte en la ciudad, disminuyendo la dependencia en vehículo privado y promocionando el uso del transporte público.



Catedrático de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña y miembro del Barcelona Supercomputing Center. Su actividad en I+D es la modelización de la calidad del aire, el cambio climático y los estudios de impacto ambiental. Es experto del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), con Diploma por la contribución al Nobel Peace Prize 2007 y Premio "Rey Jaime I" de Protección del Medio Ambiente 1997. Es consultor y asesor de un centenar de empresas y administraciones.

José María Baldasano

Laboratorio de Modelización Ambiental, Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS). Departamento de Ciencias de la Tierra.

Caso 2. Los efectos del uso de vehículos a gas natural en la calidad del aire urbano. Experiencias en Barcelona y Madrid

Preguntas clave del artículo

- ¿En qué consiste el estudio y qué metodología se ha aplicado?
- ¿Qué escenarios se han planteado para analizar la variación de las emisiones?
- ¿Cuáles son los resultados de la simulación para el escenario base?
- ¿Qué efectos tienen los distintos escenarios sobre la calidad del aire?
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer del estudio?

Apunte inicial

La contaminación del aire es uno de los mayores riesgos ambientales para la salud. Solo una persona de cada diez vive en una ciudad que cumple con los valores guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS)¹⁶⁵. La contaminación atmosférica sigue aumentando a un ritmo importante, especialmente debido al crecimiento urbano de las ciudades y al transporte vehicular, y afecta a la calidad de vida y a la economía de las personas.

El costo de la contaminación atmosférica, recientemente valorado por el Banco Mundial en términos de pérdidas de bienestar total para España en 2013, se estima en 49.331 millones de dólares, lo que representa el 3,39% del Producto Interior Bruto¹⁶⁶. La contaminación del aire es una cuestión de creciente preocupación tanto para las administraciones públicas como para los ciudadanos.

¿En qué consiste el estudio y qué metodología se ha aplicado?

El transporte representa alrededor de un tercio de todo el consumo final de energía en los países miembros de la Unión Europea, y más de un quinto de las emisiones de gases de efecto invernadero. También es responsable de una gran parte de la contaminación del aire urbano; así como, de las molestias causadas por el ruido.

La mitigación de los efectos de la contaminación del aire urbano es actualmente uno de los principales desafíos ambientales mundiales, siendo el tráfico la principal fuente que contribuye a la emisión de contaminantes en las zonas urbanas, especialmente de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}).

Desde los inicios del tráfico rodado, han sido la gasolina y el gasóleo los combustibles utilizados como carburantes para mover los vehículos.

En este momento, se está en un momento donde los vehículos movidos por gas natural (VGN) pueden jugar un papel significativo, como transición a una movilidad basada en vehículos eléctricos.

Actualmente, ya están implementadas o implementándose en muchas ciudades del mundo, y particularmente en Europa existen

165 OMS, (2016) Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization. 121 pp <http://who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>

166 Banco Mundial, 2016. The cost of air pollution. World Bank. 122 pp <http://documents.worldbank.org/curated/en/781521473177013155/pdf/108141-REVISED-Cost-of-PollutionWebCORRECTEDfile.pdf>

diferentes estrategias de limitación y reducción de este tipo de emisiones para mejorar la calidad del aire urbano. Es fundamental evaluar las estrategias más adecuadas para reducir la contribución de las emisiones debidas al tráfico. Estas estrategias se dirigen principalmente, por un lado, a la reducción de los kilómetros recorridos (minimización del número de vehículos y/o la distancia recorrida por vehículo), y por el otro, de las emisiones unitarias por vehículo.

Existen muchos trabajos que han estudiado las emisiones debidas al uso de gas natural (GN) como combustible para una tipología de vehículo específica, pero relativamente pocos trabajos que valoren el efecto integrado de reducción de la contaminación del aire en un medio urbano mediante su uso¹⁶⁷.

En el presente trabajo se estudian varios escenarios factibles con respecto a la introducción de VGN en las dos principales ciudades de España: Barcelona y Madrid. Se pretende establecer cómo el uso de VGN puede ser útil para mejorar la contaminación

atmosférica en un entorno urbano y conocer su impacto en la calidad del aire.

La metodología de análisis utilizada ha sido la modelización de la calidad del aire, usando el sistema de modelos: WRF-ARW/HERMES/CMAQ¹⁶⁸. Lo que implica el uso integrado de un modelo de pronóstico meteorológico (NWP), de un modelo de emisiones (EM), y de un modelo de transporte químico (CTM).

Las zonas de estudio se centran en las dos ciudades más grandes y pobladas de España: Barcelona y Madrid, y sus respectivas áreas metropolitanas, con un dominio que abarca 130 km² y 373 km², respectivamente, donde los problemas relacionados con la mala calidad del aire y las emisiones derivadas del tráfico son motivo de especial preocupación (ver figura 1). Se trata de dos áreas geográficas con una orografía y características urbanas complejas y distintas, y con patrones de dispersión bien diferenciados: de costa vs continental¹⁶⁹; lo que obliga a emplear una resolución espacial de análisis elevada de 1 km².

167 Schifter I., Diaz L., López-Salinas E., Avalos S., 2000. Potential Impacts of Compressed Natural Gas in the Vehicular Fleet of Mexico City. *Environ. Sci. Technol.* 34, 11, 2100–2104 doi: 10.1021/es9909125

Bandela N. N., Tare D. G., 2008, Reducing Air Pollution by Using CNG as a Vehicle Fuel: A Study from Mumbai. *Environmental Quality Management* 18, 2, 67-70 doi: 10.1002/tqem.20206

Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P, López E., Baldasano J.M., 2009a. High resolution modeling of the effects of alternative fuels use on urban air quality: Introduction of natural gas vehicles in Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain). *The Science of the Total Environment* 407, 776-790 doi:10.1016/j.scitotenv.2008.10.017

168 Skamarock WC, Klemp JB., 2008. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics* 227, 3465-3485. doi: 10.1016/j.jcp.2007.01.037

Baldasano J.M., Güereca L.P., López E., Gassó S., Jiménez-Guerrero P, 2008. Development of a high resolution (1 km x 1 km, 1 h) emission model for Spain: the High-Effective Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment* 42, 7215-7233 doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.026

Byun D.W., Schere K.L., 2006. Review of the governing equations, computational algorithms and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *Applied Mechanics Reviews* 59, 51-77. doi: 10.1115/1.2128636.

169 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P, Baldasano J.M., 2009b. Contribution of atmospheric processes affecting the dynamics of air pollution in south-western Europe during a typical summertime photochemical episode. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 849-864 www.atmos-chem-phys.net/9/849/2009

Se han seleccionado los días 17 y 18 de junio de 2004 en base a dos criterios:

- Un episodio de contaminación del aire simultáneo en ambas ciudades, catalogado como “día de peor escenario” (referido a la calidad del aire) debido a un patrón meteorológico con alta frecuencia.
- Un día de circulación de tráfico normal, con el objetivo de obtener resultados representativos. Los contaminantes considerados han sido: en fase gas NO_x , monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COVs), dióxido de azufre (SO_2), amoníaco (NH_3), y de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$.

¿Qué escenarios se han planteado para analizar la variación de las emisiones?

Las emisiones representan el factor causal principal, por lo que es básico su conocimiento, para definir correctamente el diagnóstico y determinar el alcance de las soluciones. El modelo de emisiones HERMES permite estimar la cantidad emitida a la atmósfera de cada contaminante por unidad de superficie (1 km^2) y unidad de tiempo (1 h). Considera tanto fuentes de emisión antropogénicas como biogénicas, que incluyen el transporte terrestre, marítimo y aéreo, la generación de electricidad, las

industrias, el consumo doméstico y comercial, etc. Se centra principalmente en la estimación de los contaminantes en fase gas y material particulado, incluyendo los precursores de ozono (O_3) troposférico; y usa la información relativa a los distintos usos del suelo –zona industrial, verde, urbanizada, etc.–, densidad de población, la red de carreteras, actividad industrial, etc. El parque de vehículos se clasifica en 72 categorías, y diferencia los vehículos en función del tipo de combustible, de la cilindrada del motor, de su antigüedad y su peso. El parque matriculado se ha ajustado al parque circulante de acuerdo a las distintas vías de circulación y a las distintas zonas de circulación, 5 en Barcelona y 4 en Madrid. Cada categoría, lleva asociado un factor de emisión específico para cada tipo de contaminante, que es función de la velocidad de circulación (g contaminante/km recorrido), y que se han obtenido de la guía de emisiones EMEP/EEA¹⁷⁰. Ello permite disponer de una distribución específica de la emisión del parque vehicular para las ciudades de Barcelona y Madrid. Los mapas de tráfico distinguen calles, rondas, carreteras, autopistas y autovías. A cada tramo de vía se le asocian una serie de atributos, éstos son los principales:

- Velocidad Media de Circulación (VMC) específica para el tipo de vía.
- Intensidad Media Diaria (IMD): número de vehículos/día.
- Perfil de desagregación temporal: ciclos horarios, laborable-festivo y mensuales.
- Longitud del tramo.

170 EMEP, 2006. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook <https://www.eea.europa.eu/themes/air/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook>

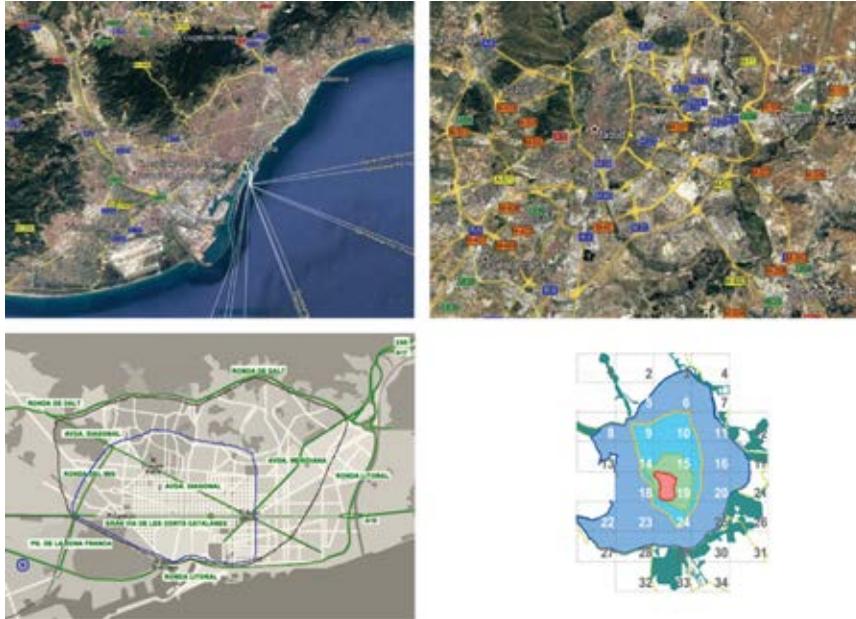


Figura 1

Distribución de las zonas de circulación en las ciudades de Barcelona y Madrid.

- Tipo de vía: urbana, carretera, autopista.
- Zona urbana de circulación a la que pertenece el tramo.

Para estimar las emisiones procedentes de VGN se realizó una revisión y análisis comparativo de los factores de emisión más adecuados. Para lograr los objetivos de este trabajo se requieren factores de emisión dependientes de la velocidad, y factores de emisión para las normas europeas. De esta revisión se puede

deducir que el uso principal se centra en zonas urbanas¹⁷¹. Los VGN presentan una reducción de emisión específica entre un 80-90% para los NO_x y casi del 100% para el material particulado con respecto al uso de diésel como combustible.

Para las zonas de estudio: Barcelona y Madrid –con 2.700 y 3.900 puntos de información de tráfico respectivamente con datos de IMD y VMC de las principales vías urbanas e interurbanas– se configuró el correspondiente

171 Gonçalves M., Jiménez-Guerrero P, López E., Baldasano J.M., 2009c. Emissions variation in urban areas from the introduction of natural gas vehicles: application to Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain). The Science of the Total Environment 407, 3269-3281 doi:10.1016/j.scitotenv.2009.01.039

Figura 2

Número de vehículos y porcentaje de cambio asumido en los distintos escenarios.

ESCENARIOS		BARCELONA		MADRID	
		Vehículos a GN	% Total del parque	Vehículos a GN	% Total del parque
E1	100% Autobuses urbanos	1.006	0,1	2.005	0,1
E2	50% Taxis	5.186	0,6	7.823	0,5
E3	50% Autobuses interurbanos	535	0,1	1.866	0,1
E4	50% Vehículos ligeros	37.261	4,0	75.278	4,5
E5	10% Turismos	59.731	6,5	136.819	8,1
E6	100% Vehículos pesados	287	0,03	553	0,03
ES	Escenario suma	104.005	11,2	224.344	13,4

inventario de emisiones que representa el Escenario base (EB) de referencia. La principal fuente de emisión de NO_x en ambas áreas metropolitanas son debidas al tráfico vehicular: en Barcelona con un 59%, complementado con un 16% por el puerto y un 7% por el aeropuerto; y en Madrid un 65%, complementado con un 18% por el aeropuerto; mientras que tanto para PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ en ambas áreas se sitúa en un promedio del 85-86%.

Sobre el Escenario base, se diseñaron siete escenarios centrados en sectores de flotas específicas de vehículos: transporte urbano, mercancías, taxis, etc. (ver figura 2). Del análisis de las emisiones que se producen en cada uno de los escenarios considerados con

la introducción de VNG (ver figuras 3 y 4). El que supone, lógicamente, una mayor variación de emisiones es el Escenario suma (ES), que implica una disminución de las emisiones de precursores de O_3 (NO_x , COVs) y otros contaminantes (CO , SO_2 , NH_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$) para el área de Barcelona de 38 t/día y para el área de Madrid de 99 t/día de contaminantes, o lo que es lo mismo, si este día se repitiese durante todo un año, se dejarían de emitir 13.800 t/año en Barcelona y 35.800 t/año en Madrid. Y afectan a más de 104.000 coches en Barcelona y a más de 224.000 en Madrid, 11,2% y 13,4% respectivamente del parque de vehículos matriculado. Son del orden del doble para Madrid que, para Barcelona, esta relación que varía según el contaminante considerado,

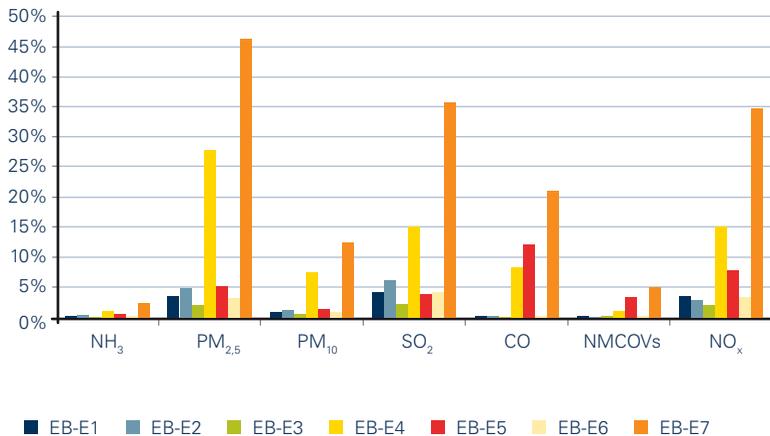


Figura 3

Porcentaje de diferencia en las emisiones para los distintos escenarios respecto del escenario base para la ciudad de Barcelona (kg/día, día 18/06/2004).

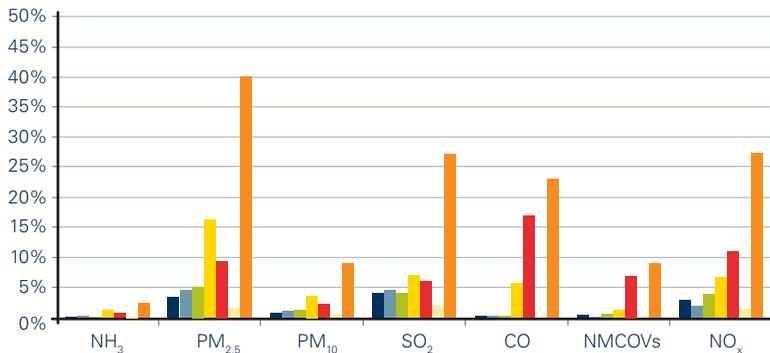


Figura 4

Porcentaje de diferencia en las emisiones para los distintos escenarios respecto del escenario base para la ciudad de Madrid (kg/día, día 18/06/2004).

se debe a que el parque vehicular en Madrid es aproximadamente el doble que el de Barcelona. El orden correspondiente de magnitud asumido, viene condicionado por el número de vehículos existentes en cada una de las categorías (taxis, autobuses, etc.).

El escenario más efectivo de reducción de emisiones en Barcelona es el cambio del 50% de vehículos de reparto de mercancías (E4),

mientras que en Madrid es la transformación del 10% de turismos (E5). Ello se debe a la distinta composición del parque vehicular en ambas ciudades. La mayor disminución de COVs NMs (COVs no metánicos) se produce en el E5, mientras que el E4 es más efectivo a la hora de reducir las emisiones de SO₂ y PM, por el mayor peso que tiene el gasóleo en esta sustitución.

¿Cuáles son los resultados de la simulación para el escenario base?

De acuerdo a la metodología de trabajo, los resultados obtenidos mediante modelización se han validado con observaciones de las estaciones de medida de la calidad del aire. Todos los estadísticos considerados –bias medio normalizado: MNBE, error medio normalizado: MNGE, y exactitud en la predicción del pico: UPA– se encuentran dentro del rango de los criterios establecidos por la directiva europea 2008/50/CE¹⁷² y las guías de la US-EPA americana¹⁷³ para considerar como válidos los resultados de una simulación de estas características.

El episodio considerado “día de peor escenario”: días 17 y 18 de junio de 2004, corresponde a una situación típica de verano con una calidad del aire deficiente. Un bajo gradiente de presiones domina la península Ibérica y el Mediterráneo, con fuerte insolación y baja nubosidad, que provoca el desarrollo de fenómenos de origen térmico, como son los vientos de montaña, las brisas de mar-tierra en la costa Mediterránea o el desarrollo de la Baja Térmica Ibérica en el centro de la península. Los

vientos superficiales presentan una intensidad de moderada a débil. Estas condiciones meteorológicas favorecen la formación de O₃ troposférico. Según una metodología de análisis clúster de patrones meteorológicos, en un ciclo anual esta situación se presenta el 44% de los días en la costa Mediterránea y en el 37% en el centro de la Península Ibérica¹⁷⁴.

Las concentraciones máximas de NO₂ se alcanzan tanto en Barcelona como en Madrid a primera hora de la mañana, entre 7:00 y 8:00 hora local, debido principalmente al tráfico y a que el desarrollo de la capa de mezcla es todavía limitado. Ambos factores junto a la baja actividad fotoquímica a esas horas, contribuyen a la acumulación de NO_x. En el atardecer se produce un nuevo máximo en la concentración de NO₂, debido a la ausencia de radiación solar y al hundimiento de la capa de mezcla. Durante el día el desarrollo de las brisas de mar intensifica los flujos hacia el interior en el litoral. En las horas nocturnas, la formación de brisas de tierra en las zonas costeras, de menor intensidad que las brisas marinas diurnas, arrastra los contaminantes desde el interior hacia la ciudad de Barcelona a través de las canalizaciones de los ríos Besós y Llobregat. En Madrid, los vientos durante la parte central del día presentan intensidades muy débiles y la situación de calma atmosférica nocturna

172 2008/50/CE. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Diario Oficial de la Unión Europea L 152/1 de 11.6.2008

173 US EPA, 1991. Guideline for Regulatory Application of the Urban Airshed Model. US EPA Report No. EPA-450/4-91-013. Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards, Technical Support Division. Research Triangle Park, North Carolina, US. 82 pp.
US EPA, 2005. Guidance on the use of models and other analyses in attainment demonstrations for the 8-hour ozone NAAQS. US EPA Report No. EPA-454/R-05-002. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina, US. 128 pp.

174 Jorba O., Pérez C., Rocadenbosch F., Baldasano J.M., 2004. Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002. Journal of Applied Meteorology 43, 6, 887-901 doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0887:CAODBT>2.0.CO;2

favorecen la acumulación de los contaminantes primarios.

En el caso del O_3 los resultados muestran que las concentraciones máximas se dan en las zonas a sotavento de las ciudades de Barcelona y Madrid. Estos máximos se alcanzan tras las horas de mayor actividad fotoquímica. A lo largo de la mañana la radiación solar activa una serie de reacciones fotoquímicas que dan lugar a la formación de O_3 . Con el avance del día y el incremento de la irradiación solar, las temperaturas ascienden notablemente hasta 30-35°C en ambos dominios, que favorece la formación de altos niveles de O_3 troposférico superando el umbral de información a la población ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos máximos, debido al penacho urbano de contaminación que generan ambas ciudades, afectan en Cataluña, al área de la Plana de Vic y al norte de la comunidad catalana; y, en la Comunidad de Madrid, a las zonas del sureste madrileño y al corredor del Henares.

Con respecto a los niveles de la concentración de PM_{10} causada por el tráfico vehicular en el caso de la ciudad de Barcelona; en Madrid, además del tráfico, la industria cerámica del valle del Tajo es el principal emisor de material particulado. En ambas ciudades, la concentración de partículas es máxima alrededor a primera hora de la mañana (8:00 hora local) y a última hora del día (en torno a las 23:00 hora local). En ambas ciudades: Barcelona y Madrid, se estima que los máximos horarios se encuentran por encima de los límites establecidos para la media horaria de O_3 en Madrid y de NO_2 y PM_{10} en Barcelona. Por el contrario, no se detectan superaciones de los umbrales de SO_2 en las dos áreas metropolitanas.

Un punto importante a señalar para entender la distinta respuesta de ambas zonas es la diferencia en la capacidad dispersiva de las dos ciudades, mientras que en Barcelona el máximo de la capa de mezcla se sitúa alrededor de los 800 m, en el caso de Madrid alcanza una altura de 3.000 m.

¿Qué efectos tienen los distintos escenarios sobre la calidad del aire?

Como resultado del análisis de los diferentes escenarios mediante un cambio del parque vehicular con la introducción de vehículos que usan gas natural como carburante. Sobre las áreas de Barcelona y Madrid se observa una disminución de la concentración de NO_2 , SO_2 y PM_{10} en todos los escenarios implementados. Esta mejora de la calidad del aire, al margen del Escenario suma, es más acentuada en los E4 y E5, es decir, al transformar a gas natural el 50% de los vehículos de reparto de mercancías y el 10% de los turismos respectivamente. En el caso del NO_2 , en la ciudad de Barcelona, las mayores reducciones se obtienen al transformar el 50% de los vehículos de reparto de mercancías (E4) y el 10% de los turismos particulares (E5). Además, en el Escenario suma se registran mejoras con una disminución del 6,7% de la concentración máxima de NO_2 y del 14,2% en la concentración media diaria. En la ciudad de Madrid, las mejoras representan reducciones que pueden llegar a alcanzar un

10,3% de la concentración máxima horaria y un 17,9% de la media diaria en el Escenario suma. El E5 provoca una mejora de los niveles de NO_2 con reducciones del 3,4% en el máximo horario y el E4 del 7,5% para la media diaria. Los E1, E2, E3 y E6 tienen reducciones inferiores al 1% para la concentración máxima y entre el 1-2% para la concentración media diaria en ambas ciudades.

Para el PM_{10} , la medida más efectiva de mejora de la concentración máxima horaria y media diaria, es la transformación del 50% de la flota de vehículos ligeros de reparto de mercancías (E4). En la ciudad de Barcelona, estas mejoras pueden llegar a tener una reducción del 13,9% para el valor máximo horario y del 9,9% para la media diaria. La concentración de inmisión mejoraría en un 21,6% y un 17,2%, respectivamente, para las concentraciones horarias y media diaria en el Escenario suma (ES). Para Madrid, estas reducciones pueden incrementarse hasta el 42,8% (máximo horario) y el 9,8% (concentración media en 24 horas) en el ES. Los E1, E2, E3 y E6 tienen reducciones entre el 1-2% para la concentración media diaria en Barcelona, y entre 2-6% para la concentración máxima y entre el 1-2% para la concentración media diaria en el caso de Madrid.

Las concentraciones máximas y promedio octohorario de O_3 permanecen prácticamente invariables en las dos áreas metropolitanas, registrándose ligeros incrementos en el Escenario suma que no exceden el 10% para las ciudades de Barcelona y Madrid. La disminución de las emisiones de NO_x , como la que se produce al introducir VGN, puede comportar incrementos de concentración de

O_3 debido al comportamiento no lineal en la química del O_3 troposférico y su distinta respuesta en relación al ratio: NO_x/COVNM s. En el caso de Madrid, únicamente en el escenario de modificación del 10% de la flota de turismos (E5), se reduce muy ligeramente, un 1% las concentraciones de ozono máximas.

¿Qué conclusiones se pueden extraer del estudio?

En el presente trabajo se ha empleado una metodología de modelización de la calidad del aire, se ha utilizado el sistema WRF-ARW/HERMES/CMAQ, con el fin de evaluar las variaciones en la calidad del aire que se producirían en las dos principales ciudades de España: Barcelona y Madrid, analizando los efectos de introducir vehículos propulsados a gas natural en la calidad del aire, en sustitución de aquellos ya existentes, que utilizan gasolina, y especialmente gasóleo.

Se ha considerado un total de siete escenarios de modificación del parque vehicular, basados en criterios que impliquen cambios realistas y realizables. Cada escenario afecta a un tipo de vehículo específico –taxis, autobuses urbanos o interurbanos, furgonetas de reparto, turismos, etc.–.

El gas natural como carburante constituye una alternativa disponible para la reducción de las emisiones contaminantes debidas al tráfico rodado. Se estima que con la introducción del ES, que implica un cambio del parque circulante

de vehículos de un 11,2% en Barcelona y un 13,4% en Madrid, se pueden reducir las emisiones de precursores de O_3 (NO_x , COVsNMs) y otros contaminantes primarios (CO , SO_2 , NH_3 , PM) hasta en 38 t/día en el área de Barcelona y hasta en 99 t/día en el caso de Madrid (ver figuras 5 y 6). La medida individual más efectiva para reducir las emisiones sería, tanto en Barcelona como en Madrid, la introducción de un 50% de vehículos de reparto de mercancías a gas natural (E4).

La mayor reducción de los niveles de contaminantes se produce en el Escenario suma (o combinación de todos los escenarios), en el que se alcanzan reducciones de la concentración media diaria de NO_2 entre un 14-18%, y de PM_{10} del 17% en las zonas centrales de las ciudades de Barcelona y Madrid (ver figuras 5 y 6).

Los escenarios que se destacan, es la sustitución del 50% de los vehículos de reparto de mercancías (de menos de 7,5 t), por vehículos a gas natural, que produce una reducción importante de los niveles de NO_2 y PM_{10} . También la transformación del 10% de los turismos implica mejoras en la calidad del aire,

más en Madrid que en Barcelona, debido a la composición del parque vehicular.

Los resultados obtenidos en los escenarios que suponen la modificación de los autobuses urbanos e interurbanos y de los vehículos pesados de transporte de mercancías son menos relevantes. La variación de la flota realizada en estos escenarios es menor del 3% del total del parque vehicular. Son destacables las reducciones de emisiones de SO_2 y partículas en estos escenarios, debido a la gran influencia que tienen los vehículos pesados diésel en el total de emisiones de estos dos contaminantes.

La reducción de las emisiones se traduce en una mejora de la calidad del aire en términos de concentración de NO_2 y PM_{10} especialmente, y ayuda al cumplimiento de la legislación establecida en las directivas europeas. En conclusión, la transformación a gas natural de ciertas flotas de vehículos diésel o gasolina se presenta como una opción factible para la reducción de las concentraciones de NO_2 y especialmente de material particulado en las grandes ciudades, que implica una mejora de la calidad del aire.

Figura 5

Barcelona: cambios en la concentración horaria máxima y media diaria según los escenarios.

O₃ concentración máxima horaria				O₃ promedio octohorario		
	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación
Escenario base	73,5	-	-	58,9	-	-
Escenario 1	74,1	0,6	0,78%	59,5	0,6	0,93%
Escenario 2	73,7	0,2	0,28%	59,1	0,2	0,32%
Escenario 3	73,8	0,3	0,44%	59,2	0,3	0,52%
Escenario 4	76,2	2,7	3,71%	61,1	2,1	3,62%
Escenario 5	74,6	1,1	1,55%	60,1	1,1	1,93%
Escenario 6	74,1	0,6	0,86%	59,5	0,6	1,04%
Escenarios uma	79,3	5,8	7,83%	64,6	5,7	9,67%

NO₂ concentración máxima horaria				NO₂ concentración media diaria		
	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación
Escenario base	143,0	-	-	89,2	-	-
Escenario 1	142,2	-0,8	-0,53%	87,8	-1,3	-1,48%
Escenario 2	142,7	-0,3	-0,20%	88,3	-0,8	-0,93%
Escenario 3	142,6	-0,4	-0,30%	88,4	-0,7	-0,82%
Escenario 4	139,0	-4,0	-2,77%	84,0	-5,2	-5,79%
Escenario 5	140,6	-2,4	-1,67%	86,6	-2,6	-2,91%
Escenario 6	142,2	-0,8	-0,58%	87,9	-1,3	-1,42%
Escenario suma	133,4	-9,6	-6,71%	76,5	-12,7	-14,24%

PM₁₀ concentración máxima horaria				PM₁₀ concentración media diaria		
	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación	Conc. (µg/m³)	ΔConc. (µg/m³)	Variación
Escenario base	59,5	-	-	17,8	-	-
Escenario 1	58,6	-0,9	-1,50%	17,5	-0,3	-1,44%
Escenario 2	58,8	-0,7	-1,24%	17,5	-0,3	-1,75%
Escenario 3	59,0	-0,5	-0,90%	17,6	-0,2	-0,86%
Escenario 4	51,3	-8,3	-13,86%	16,0	-1,8	-9,94%
Escenario 5	58,1	-1,4	-2,43%	17,4	-0,3	-1,85%
Escenario 6	58,5	-1,0	-1,61%	17,5	-0,2	-1,32%
Escenario suma	46,7	-12,8	-21,55%	14,7	-3,1	-17,19%

Figura 6

Madrid: cambios en la concentración horaria máxima y media diaria según los escenarios.

	O ₃ concentración máxima horaria			O ₃ promedio octohorario		
	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación
Escenario base	131,6	-	-	97,2	-	-
Escenario 1	132,2	0,6	0,45%	97,7	0,5	0,64%
Escenario 2	132,1	0,5	0,37%	97,6	0,2	0,31%
Escenario 3	132,5	0,9	0,65%	97,9	0,3	0,37%
Escenario 4	132,4	0,7	0,56%	98,1	2,5	3,51%
Escenario 5	130,3	-1,3	-1,00%	97,5	1,3	1,74%
Escenario 6	131,9	0,3	0,21%	97,4	0,5	0,63%
Escenarios una	132,6	1,0	0,75%	100,5	5,2	7,28%
	NO ₂ concentración máxima horaria			NO ₂ concentración media diaria		
	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación
Escenario base	129,3	-	-	56,5	-	-
Escenario 1	128,4	-1,0	-0,75%	55,3	-1,5	-1,79%
Escenario 2	128,5	-0,8	-0,65%	55,5	-1,0	-1,18%
Escenario 3	127,9	-1,4	-1,10%	54,8	-0,9	-1,01%
Escenario 4	127,2	-2,2	-1,68%	53,8	-6,3	-7,46%
Escenario 5	125,0	-4,4	-3,36%	51,6	-3,3	-3,85%
Escenario 6	128,9	-0,4	-0,33%	55,9	-1,3	-1,55%
Escenario suma	116,1	-13,3	-10,26%	43,9	-15,2	-17,94%
	PM ₁₀ concentración máxima horaria			PM ₁₀ concentración media diaria		
	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación	Conc. (µg/m ³)	ΔConc. (µg/m ³)	Variación
Escenario base	33,7	-	-	7,0	-	-
Escenario 1	32,3	-1,4	-4,14%	6,7	-0,3	-1,44%
Escenario 2	31,7	-2,1	-6,08%	6,6	-0,3	-1,75%
Escenario 3	31,7	-2,1	-6,12%	6,6	-0,2	-0,86%
Escenario 4	28,8	-4,9	-14,64%	6,2	-1,8	-9,94%
Escenario 5	30,3	-3,5	-10,24%	6,3	-0,3	-1,85%
Escenario 6	33,2	-0,5	-1,53%	6,9	-0,2	-1,32%
Escenario suma	19,3	-14,4	-42,80%	4,6	-3,1	-17,19%



Meteorólogo y químico del aire. Director del sector Gestión de la calidad del aire en el Departamento de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Senado de Berlín, donde también está a cargo de la implementación práctica de las medidas. En el marco de proyectos de desarrollo y asistencia, asesora a las agencias ambientales locales de Europa del Este, el sur y el este de Asia sobre la calidad del aire urbano.

Martin Lutz

Senate Department for Environment, Transport and Climate Protection. Berlin, Germany

Caso 3. La experiencia de Berlín. Éxitos y oportunidades de veinte años de gestión de la calidad del aire

Preguntas clave del artículo

- ¿Cuál era la situación en Berlín en los años ochenta? Una ciudad dividida con problemas de calidad del aire comunes.
- ¿Y en los años noventa? Una ciudad unida, también para la calidad del aire.
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer de esta evolución histórica?
- ¿Qué está causando actualmente los problemas de calidad del aire en Berlín?
- ¿Qué medidas han tenido éxito y cuáles han fracasado?
- ¿Qué es necesario hacer en el futuro?

Apunte inicial

Hace más de 30 años, la entonces llamada República Democrática Alemana (RDA), fue identificada en un informe de las Naciones Unidas sobre contaminación transfronteriza del aire¹⁷⁵ como el país con los niveles más altos de la contaminación por dióxido de azufre (SO₂) en Europa. Uno de los principales factores que condujo a esta asombrosa evaluación fue el uso a gran escala del lignito cargado de azufre autóctono como principal combustible en el sector de la energía y en la calefacción residencial. Debido a la falta de tecnologías de control de dichas emisiones, los niveles de azufre de Alemania del Este llegaron a ser tres veces más elevadas que las de Alemania Occidental¹⁷⁶, de mayor tamaño. Como consecuencia, la ciudad de Berlín, ubicada justo en el centro del país y aún dividida en su parte oriental –así como la aislada Berlín Occidental–, era probablemente uno de las ciudades más contaminadas de Europa, sino del mundo.

¿Cuál era la situación en Berlín en los años ochenta? Una ciudad dividida con problemas de calidad del aire comunes

Si bien el gobierno de Alemania Oriental prometió en 1984 reducir las emisiones de azufre en un 30% durante la década siguiente, no se pudo constatar un progreso sustancial por los escasos datos de emisiones y contaminación de que se disponía, ya que éstos eran tratados como secretos de estado, y solo pudieron ser evaluados y publicados después de que el Telón de Acero y el Muro de Berlín fueran desmantelados a finales de 1989. Los niveles de contaminación ambiental medidos en el centro de la ciudad de Berlín Oriental durante el semestre de invierno – octubre a marzo– oscilaron entre 107-184 µg/m³ para el SO₂ y 73-120 µg/m³ para las partículas totales en suspensión (TSP), una unidad de medida comúnmente utilizada para el material particulado, que constituía aproximadamente un 80% del PM₁₀. No sorprende, por tanto, que se pudiera encontrar una relación significativa entre los datos de mortalidad y las concentraciones de SO₂ y TSP en Berlín Este¹⁷⁷, que excedían los respectivos umbrales de las directrices de la

175 UN-ECE, 1984: Airborne Sulphur Pollution. Series: Air Pollution Studies. United Nations Publications, 6 Jan. 1984

176 Pond E., 1984. East Germany disputes its status as the most polluted country in Europe. The Christian Science Monitor, Edition of October 5th, 1984, Boston, U.S.A. <https://www.csmonitor.com/1984/1005/100538.html>

177 Rahlenbeck, S., Kahl, H. 1996. Air Pollution and Mortality in East Berlin during the Winters of 1981-1989. International Journal of Epidemiology, 25, 6, 1220–1226, <https://doi.org/10.1093/ije/25.6.1220>

Organización Mundial de la Salud (OMS) en un factor de 5 a 10^{178} .

A diferencia del muro que había a ras de suelo, en el aire no existían barreras entre oriente y occidente, por lo que la calidad del aire en Berlín Occidental era igualmente mala, como se puede ver en las mediciones de TSP en ambos lados de dicho muro (ver figura 1).

En Berlín Occidental, esta alarmante situación provocó una creciente presión para controlar las emisiones mediante el marco regulador de Alemania Occidental sobre gestión de la calidad del aire¹⁷⁹, que se aplicaba plenamente en la esa parte de la ciudad. Basándose en dicha legislación, el Senado, el gobierno de Berlín Occidental, adoptó una regulación contra el smog en 1977 para aplicar medidas a corto plazo cuando se producían picos elevados de SO_2 superiores a $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante tres horas. Más tarde, se añadieron también umbrales de activación para las concentraciones de PM y de dióxido de nitrógeno (NO_2). Hasta 1994, cuando finalmente se suspendió la regulación del smog, las alertas se anunciaron más de 17 veces debido a concentraciones extremadamente altas, superiores a los $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de SO_2 y TSP¹⁸⁰. Durante los períodos de alerta, que duraban desde unas pocas horas hasta cuatro días, y que iban acompañados de episodios meteorológicos estancados, se prohibían las

actividades no esenciales, lo que daba como resultado una substancial mejora de los niveles de emisión de estos contaminantes. Sucedió lo mismo cuando determinadas industrias que utilizaban combustibles sucios –como el fuel pesado– realizaban el mantenimiento de sus plantas de combustión, ya que cambiaban temporalmente a petróleo o gas con bajo contenido de azufre (S) para no suspender sus operaciones. La temperatura interior en los edificios públicos se mantenía también a menos de 20°C para reducir la combustión de combustible y, por tanto, las emisiones de SO_2 . En una ocasión, incluso se prohibió el tráfico de automóviles sin convertidor catalítico. Asimismo, y para frenar las emisiones de fuentes industriales, se exigió que las centrales eléctricas pasaran del carbón con alto contenido de azufre al petróleo bajo en S, a menos que tuvieran implantado un proceso de desulfuración de gas (FGD).

A raíz de esta situación y de la regulación alemana que controlaba la emisión de grandes plantas de combustión –en particular, las instrucciones técnicas sobre control de calidad del aire¹⁸¹–, en todas las grandes plantas de energía e instalaciones industriales se implantaron las mejores y más eficientes tecnologías disponibles, como FGD y filtros de polvo electrostáticos, con el fin de reducir las

178 OMS, 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. This http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

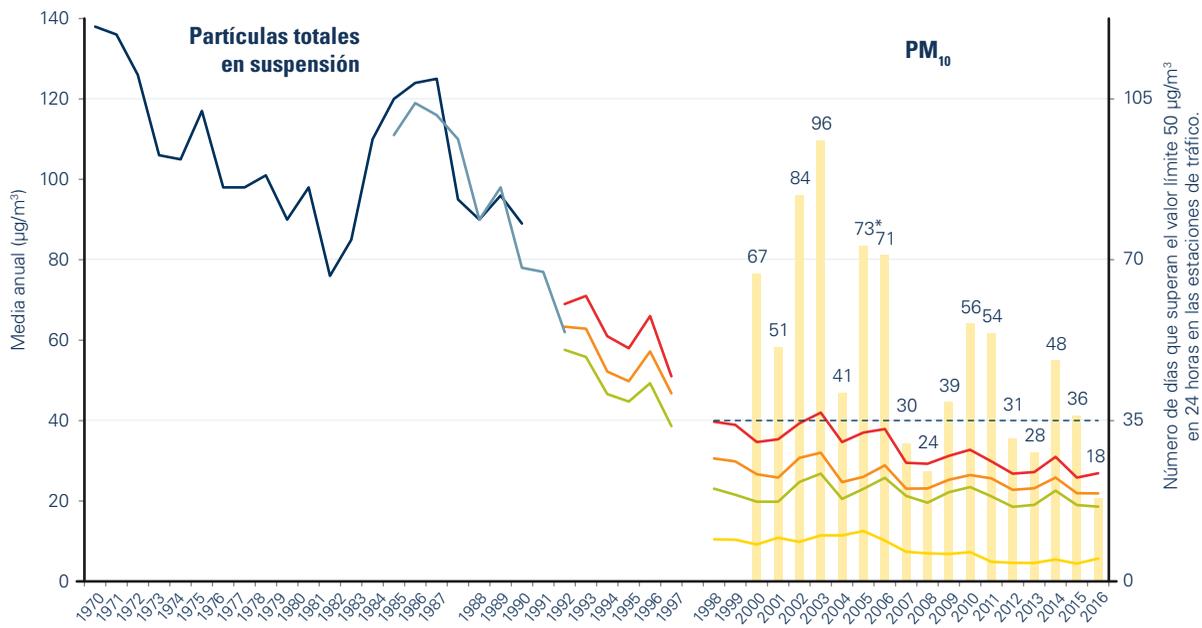
179 Currie D. P., 1982. Air Pollution Control in West Germany. 49 University of Chicago Law Review 355. https://chicagounbound.uchicago.edu/journal_articles/3389/

180 SenStadtUmTech, 1998. Air Quality Management in Berlin 1997. Ministry for Urban Development, Environmental Protection and Technology of Berlin. Berlin, May 1998.

181 TA Luft, 1964. Technical Instruction on Air Quality Control. First General Administrative Instruction to the Federal Pollution Control Act. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft_engl.pdf (current Version of 2002).

Figura 1

Tendencia a largo plazo de las concentraciones medias anuales de material particulado (PM₁₀) en Berlín.



* 73 días que superan los niveles debido a obras de construcción de infraestructuras viarias en un punto.

- Número máximo días superaciones en estaciones de tráfico.
- Estaciones de tráfico (5 puntos, Este+Oeste)
- Núcleo urbano (3 puntos, Este+Oeste)
- Periferia (3 puntos, Este+Oeste)
- Berlín Este (media de 11 puntos)
- Berlín Oeste (media de 5 puntos)
- Contribución del tráfico local
- Valores límite de PM₁₀ (media anual de 40 µg/m³ y 35 días de superación de la media en 24 horas de 50 µg/m³)

Medido en las estaciones de calidad del aire de tráfico (5 puntos), estaciones de fondo urbano en áreas residenciales (3 puntos) y en la periferia de la ciudad (3 puntos). Hasta 1997 como partículas suspendidas totales, desde 1997 como PM₁₀.

emisiones de SO₂ y PM en la medida en que el estado del arte lo permitía. Esto se hizo a pesar de que la mayoría de la contaminación en realidad provenía de fuentes de Berlín Este y la RDA¹⁸². Además, las emisiones de la calefacción doméstica en Berlín Occidental, donde más de un tercio de todas las viviendas aún se calentaban con calderas de carbón, podían verse drásticamente limitadas, en gran parte debido a una regulación local que prohibía el uso de carbón con contenido en S superior al 1%. Asimismo, hubo una tendencia general a alejarse de las estufas individuales, y del manejo engorroso con carbón sucio y madera, para utilizar sistemas de calefacción central más cómodos basados en gas natural, petróleo o calor, este último procedente de la creciente red de calefacción urbana suministrada por instalaciones con sistemas combinados de generación de calor y energía eléctrica. Como resultado, las emisiones de SO₂ de fuentes estacionarias en Berlín Occidental disminuyeron drásticamente en más del 70% entre 1982 y 1989, y las emisiones de TSP de las plantas más grandes y de calefacciones domésticas lo hicieron en más de 60% y 30%, respectivamente¹⁸³. Desafortunadamente Berlín Este y Alemania Oriental siguieron una tendencia opuesta dado que el costoso petróleo de importación fue reemplazado gradualmente por lignito local

relativamente barato con un alto contenido de S, de hasta el 5%. En ausencia de una tecnología de desulfuración eficiente, esto condujo incluso a un aumento de las emisiones de SO₂ y PM con efectos perjudiciales sobre la calidad del aire. Tras haber disminuido durante los años setenta las concentraciones ambientales de SO₂ y PM, éstas volvieron a aumentar fuertemente hasta mediados de los ochenta (ver figura 1). De este modo, la calidad del aire en Berlín Occidental empeoró igualmente, a pesar del progreso tangible en el control de emisiones mencionado anteriormente. En 1989, antes de la caída del muro, las emisiones de SO₂ y PM de fuentes estacionarias en Berlín Este eran entre 2 y 3,5 veces más altas que en Berlín Occidental, con un 25% más de población. Curiosamente, la situación era más compleja con respecto a las emisiones del tráfico rodado: la flota de vehículos de Berlín Occidental era mucho mayor que la de la contraparte Oriental, menos adinerada. Sin embargo, en comparación con las ciudades de Alemania Occidental, la tasa de motorización en Berlín Occidental era relativamente baja, con solo 310 automóviles por cada 1.000 habitantes, ya que no era esencial tener un automóvil dada la densa red de transporte público y los estrictos controles fronterizos y regulaciones de visas que dificultaban la movilidad y el acceso al Berlín Oriental y a la RDA circundante en coche.

182 Wilcke F, Ossing F.J., 1985. Analysis of Episodes with High Pollutant Concentrations in Berlin (West) Using Backward Trajectories. In: De Wispelaere C. (eds) Air Pollution Modeling and Its Application IV. Nato — Challenges of Modern Society (Energy Engineering and Advanced Power Systems), vol 7. Springer, Boston, MA

183 SenUVK, 1993. Dusts - Emissions and Pollutions. Environmental Atlas of Berlin, (Edition 1993), Section 3.04. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ei304.htm>
SenUVK, 1994. Sulfur Dioxide - Emissions and Pollutions. Environmental Atlas of Berlin, (Edition 1994), Section 3.01. Senate Department for Environment, Transport and Climate Protection. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed301_02.htm

Sin embargo, las emisiones de hidrocarburos (HC), en particular de benceno (C_6H_6) cancerígeno, eran mucho más bajas en la parte occidental de Berlín, debido a la mayor presencia de automóviles de gasolina más limpios con convertidor catalítico, ya que Alemania Oriental la flota estaba dominada en gran medida por motores de gasolina de dos tiempos sin ningún tratamiento de gases de escape. El hecho de que los automóviles con dicho convertidor estuvieran exentos de una posible prohibición de tráfico en Berlín Occidental, era un incentivo bastante fuerte para su compra. En ese momento, los automóviles diésel se consideraban relativamente limpios y no se veían afectados por las restricciones de alerta de smog debido a sus bajas emisiones de C_6H_6 y monóxido de carbono (CO), ya que tampoco se tenían todavía evidencias sobre la toxicidad de las emisiones de hollín. Como resultado, los autos diésel se volvieron cada vez más populares en la parte occidental de la ciudad, pero dado que ninguno contaban con filtro de partículas, las emisiones de hollín y las concentraciones de carbono negro (BC) también aumentaron¹⁸⁴. Como se verá más adelante, esta primera y aún moderada tendencia hacia la dieselización de la flota de automóviles a finales de los ochenta en Berlín Oeste y Alemania Occidental, hizo aún

más difícil cumplir con los estándares de calidad del aire europeos actuales y más estrictos para el material particulado (PM_{10})¹⁸⁵.

¿Y en los años noventa? Una ciudad unida, también para la calidad del aire.

Justo después de la unificación de las dos partes de la ciudad en 1990, el marco regulatorio de Alemania Occidental se extendió rápidamente a todo Berlín y a la antigua Alemania Oriental. Como los límites de emisión para varias instalaciones industriales y plantas de combustión debían cumplirse en 1994¹⁸⁶, alrededor del 90% de las aproximadamente 600 antiguas y muy contaminantes instalaciones de combustión de lignito de Berlín Oriental fueron cerradas y se sustituyeron en parte por plantas modernas, energéticamente más eficientes y que producían simultáneamente energía y calor. La mayoría funcionaban con gas natural, y algunas plantas de energía más grandes con carbón duro equipadas con sistemas de desulfurización de gases de combustión y sistemas selectivos de reducción catalítica para filtrar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x).

184 SenStadtUmTech, 1998. Air Quality Management in Berlin 1997. Ministry for Urban Development, Environmental Protection and Technology of Berlin. Berlin, May 1998.

185 2008/51/EC. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union L 152, 11.6.2008, p. 1–44.

186 TA Luft, 1964. Technical Instruction on Air Quality Control. First General Administrative Instruction to the Federal Pollution Control Act. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft_engl.pdf

En los últimos años, como estipula también el Programa de Energía y Protección del Clima de Berlín¹⁸⁷, la mejora tecnológica y las iniciativas gubernamentales apuntan a extender aún más la generación de calor y electricidad combinados, especialmente con unidades combinadas calor y energía (CHP) pequeñas descentralizadas, cada vez más conectadas con energía solar fotovoltaica o solar térmica. En este momento, Berlín tiene la red de calefacción urbana más grande de Europa Occidental, con más de 1.500 km de longitud, que suministra calor y agua caliente a 1,2 de cada 2 millones de viviendas. Desde hace más de una década, el carbón ha sido eliminado casi por completo como combustible de calefacción doméstica. Uno de los principales impulsores de esa conversión fue el primer plan urbanístico elaborado para la ciudad unificada en 1994. Dicho plan exigía en toda el área central de la ciudad que las emisiones de los nuevos sistemas de calefacción pequeños y medianos no excedieran las emisiones de los quemadores de aceite modernos. Esto ha permitido la prohibición gradual del carbón y la madera como combustibles de calefacción doméstica. Sin embargo, los sistemas de calefacción secundarios no están cubiertos por dicha regulación, por lo que las chimeneas abiertas que se construyen con mayor frecuencia en residencias de clase alta todavía pueden usar madera, combustible renovable pero con

elevadas emisiones de PM. Dado el riesgo persistente de superar el valor límite de la Unión Europea (UE) para PM₁₀, esto sigue siendo motivo de preocupación en Berlín, como se analiza más adelante con más detalle. Gracias a las medidas aplicadas en el sector del transporte por carretera, las Pb y C₆H₆ disminuyeron durante la década de los noventa, en gran medida debido a regulaciones nacionales más estrictas y, más tarde, a directivas europeas que limitan los contenidos de C₆H₆ y Pb en la gasolina. El combustible sin Pb se comercializó en Alemania a partir de 1985, en paralelo con la introducción del convertidor catalítico en los turismos, que necesitaban combustible sin plomo. En ese momento en Europa, estos automóviles todavía tenían que estar homologados con referencia a los estándares más estrictos de emisión de los EE.UU., donde los nuevos automóviles de gasolina ya necesitaban un convertidor catalítico regulado de ciclo cerrado desde mediados de los años ochenta. En la UE no existió requisito alguno para esta tecnología de tratamiento de gases de escape hasta 1993, cuando entró en vigor la primera norma Euro para las emisiones contaminantes de los vehículos, y los nuevos coches de gasolina estuvieron obligados a reducir las emisiones de NO_x, HC y, específicamente los de gases como C₆H₆. Esto fue bienvenido en Berlín porque en 1996 Alemania aprobó una ley¹⁸⁸ con los valores de concentración

187 SenUVK, 2017. Berlin Energy and Climate Protection Programme. Senate Department for Environment, Transport and Climate Protection. http://www.berlin.de/senuvk/klimaschutz/politik/index_en.shtml

188 23. BImSchV, 1996. 23. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes über die Festlegung von Konzentrationswerten. (23rd ordinance to the Federal Pollution Control Act on the setting up of concentration values.). <https://umwelt-online.de/recht/luft/bimSchg/vo/23bv.htm>

permitidos para NO₂, C₆H₆ y BC en el aire ambiente¹⁸⁹. Aunque estos umbrales no eran estrictamente vinculantes, la presión sobre Berlín aumentaba por los controles más estrictos de estos contaminantes, ya que los valores de C₆H₆ y BC excedían ampliamente en el área central, en vías principales con mucho tráfico. La regulación de smog había perdido rápidamente su impacto estimulante en los propietarios de automóviles para comprar vehículos más limpios ya que, debido a las medidas de control en fuentes estacionarias, las concentraciones de SO₂ habían caído rápidamente, y no existía el riesgo de prohibiciones temporales de tráfico para automóviles contaminantes. Con el fin de acelerar la expansión de vehículos de gasolina más limpios, el gobierno de la ciudad planteó a comienzos de los años noventa la posibilidad de restringir gradualmente el acceso a los vehículos contaminantes sin convertidor catalítico. En este sentido, los ciudadanos del Berlín Oriental, que después de la caída del muro estaban reemplazando sus viejos automóviles de la Alemania Oriental por nuevas marcas de la Occidental, fueron incentivados a elegir un vehículo limpio ya equipado con un convertidor catalítico.

La medida, adoptada inicialmente en 1994, preveía la prohibición del tráfico en toda la zona central de la ciudad delimitada por la línea circular del tren ligero, donde vivía alrededor de un tercio de la población, es decir, más de un millón de personas. Después de un período de transición de cuatro años, los automóviles privados que circulaban hacia el centro de Berlín debían

cumplir con el estándar de emisiones Euro 1 o el de los EE.UU. Medio año más tarde, las medidas también se aplicarían a los vehículos comerciales ligeros, seguidos de los vehículos pesados, que necesitarían cumplir con el estándar de emisión de Euro II para principios de 2000. Como los vehículos de gasolina, necesitarían un convertidor catalítico eficiente de circuito cerrado. Con ello, se esperaba que las emisiones de NO_x e HC cayeran drásticamente. Se estimó que el impacto en las emisiones de los vehículos diésel era mucho menos pronunciado porque las normas de emisión entonces no eran lo suficientemente estrictas como para requerir ya un filtro de partículas.

Dado que Berlín fue la primera ciudad de Alemania que planteó un esquema de restricción de acceso duradero para toda la zona central, la resistencia inicial fue sustancial, especialmente de los operadores de vehículos comerciales afectados. Tras intensas discusiones con los residentes, las asociaciones comerciales, la industria automotriz y las instituciones de investigación, se consideró necesario un período de transición –de más de cuatro años– para permitir que los residentes y las empresas afectadas ajustaran sus vehículos a los requisitos planteados. Al final, el comité de transporte de la cámara de industria y comercio de Berlín apoyó la propuesta al pedir a sus miembros que renovaran más rápidamente sus flotas de vehículos. Estimulado por incentivos fiscales nacionales para vehículos más limpios –incluidos aquellos equipados con convertidor catalítico de ciclo cerrado–, y por un diferencial impositivo

entre combustible con plomo y sin plomo que encareció la conducción de vehículos más viejos, el número de automóviles menos contaminantes creció más rápido de lo esperado inicialmente. Un año antes de la aplicación planificada de la primera etapa del plan de restricción de acceso, más del 90% de la flota de automóviles de Berlín ya cumplía con los requisitos, lo que resultó en una mejora considerable de las concentraciones de C_6H_6 y NO_2 .

Al contrario que los actuales valores límite europeos de calidad del aire, los valores de concentración de la regulación alemana no eran entonces jurídicamente vinculantes, en el sentido de que debieran cumplirse estrictamente dentro del período marcado. Por ello, y dado la reducción progresiva de los valores de C_6H_6 y NO_2 , el gobierno de la ciudad decidió suspender la prohibición de tráfico prevista, si bien las emisiones de hollín no disminuyeron debido al aumento de la flota de automóviles diésel y el progreso marginal en los estándares de emisión para los nuevos vehículos.

¿Qué conclusiones se pueden extraer de esta evolución histórica?

Impulsar la aplicación de las mejores tecnologías disponibles para el control de emisiones, el uso de combustibles más limpios mediante regulaciones y restricciones ambiciosas para las actividades contaminantes, y la introducción de incentivos económicos para fomentar estos

cambios, condujo a una mejora tangible de la calidad del aire en Berlín hace más de una década. Los valores límite de la UE para el SO_2 , el CO y los metales pesados incluyendo el Pb, el benzo(a)pireno (B(a)P) y el C_6H_6 , se están cumpliendo en todas partes, la mayoría por un margen significativo. Después del año 2000: nuevos desafíos con los nuevos estándares de calidad del aire de la UE (ver figura 2).

Estos avances también se han conseguido en el caso del ozono y el $PM_{2,5}$. Con respecto al O_3 cabe señalar, sin embargo, que el objetivo a largo plazo de la UE aún supera los niveles, incluso en el ámbito central de la ciudad, donde vive la mayoría de personas. Dada la naturaleza a gran escala y no lineal de la formación del O_3 , la reducción de la contaminación fotoquímica requiere un esfuerzo coordinado, tanto a escala nacional como europea, para frenar las emisiones de los precursores de NO_x y de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) de una manera equilibrada y rentable. Los compromisos de reducción de emisiones de la Directiva de Techos Nacionales de Emisión (NECD, 2016/2284/CE), y el programa nacional de control de la contaminación, en el que los Estados miembros deben establecer medidas concretas para cumplir estos compromisos, son las herramientas adecuadas para reducir los niveles de O_3 de modo efectivo. Por lo tanto, la reducción de ozono no forma parte de los esfuerzos de planificación de la calidad del aire local de Berlín.

Con respecto a la contaminación por PM, puede parecer sorprendente que aún se produzcan superaciones del valor límite de PM_{10} diario (ver figura 1), y persistan ciertos

riesgos de incumplimiento, ya que el valor límite de la UE para $PM_{2,5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nunca se ha excedido, ni siquiera en una estación de tráfico con los niveles más altos, que están por debajo de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La OMS estableció un valor orientativo para $PM_{2,5}$ bastante bajo, de solo el 50% de la concentración de la guía de PM_{10} , porque considera el $PM_{2,5}$ como más perjudicial¹⁹⁰. Por lo tanto, dada la participación típica del 70% de $PM_{2,5}$ contenida en PM_{10} en las estaciones de tráfico de Berlín, el riesgo de incumplimiento de las normas $PM_{2,5}$ es mayor que para el PM_{10} . Esta evidente incoherencia entre los estándares europeos de calidad del aire para PM_{10} y $PM_{2,5}$, en términos de su relevancia para la salud, debería eliminarse al revisar la Directiva europea sobre calidad del aire. Por el momento, hay buenas razones para continuar aplicando nuevas medidas en Berlín de control de las emisiones de partículas finas, e incluso ultrafinas (UFP), dado que los niveles de $PM_{2,5}$ son todavía considerablemente más altos que los niveles medios anuales de concentración de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS.

También es necesario aplicar medidas adicionales para abordar el grave problema de las concentraciones notoriamente altas de NO_2 (ver figura 2). Mientras que el valor límite horario se ha cumplido en Berlín desde 2007, las concentraciones todavía están muy por encima

del valor límite anual, que debería haberse alcanzado en 2010. Se observa poca o ninguna tendencia a la baja en la contaminación por NO_2 a largo plazo según los datos recogidos; una característica que también se observa en los registros de datos de calidad del aire de muchas otras ciudades europeas.

¿Qué está causando actualmente los problemas de calidad del aire en Berlín?

El material particulado (PM_{10})

Dada la presión de las nuevas medidas para abordar la contaminación por NO_2 y eliminar el riesgo permanente de superar el valor límite de PM_{10} , el plan actual de calidad del aire para Berlín¹⁹¹, y su cartera de medidas, debe actualizarse. Como paso inicial y fundamental, recientemente se realizó un análisis de la contribución de regiones y sectores fuente al PM_{10} y a la contaminación por NO_2 utilizando modelos de dispersión¹⁹² para el modelado de receptores PM_{10} , basado en muestreo adicional durante la el invierno de 2016/17. La

190 WHO, 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. This http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

191 LRP-Berlin, 2011. Air quality plan for Berlin 2011-17. Senate Department for Urban Development and Environment. Berlin. http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/lrp_150310_en.pdf

192 SenUVK, 2018. Modellrechnungen für den Berliner Luftreinhalteplan 2018-25. (Model calculations underpinning the air quality plan for Berlin 2018-25). IVU Umwelt GmbH on behalf of the Senate Department for Environment, Transport and Climate protection, 2017, in preparation.

CONTAMINANTE	FUENTE PRINCIPAL	ESTADO, MOTIVO, TENDENCIA
SO ₂	Generación eléctrica, industrias, calefacción doméstica	☺ Problema resuelto hace 20 años ☞ Cambio a una tecnología de control y un combustible limpio
CO, metales pesados	Tráfico, industrias pesadas	☺ Nunca ha sido un problema
C ₆ H ₆	Tráfico	☺ Problema resuelto hace 15 años ☞ Cambio a una tecnología de control y un combustible limpio
B(a)P	Tráfico, calefacción doméstica	☺ Problema resuelto hace 5-10 años ☞ Cambio a una tecnología de control y un combustible limpio
O ₃	Transporte aéreo de largo recorrido y nacional	☞ Problema resuelto, pero a largo plazo el objetivo continuará superándose; es necesario abordarlo a escala nacional y europea
PM _{2,5}	Transporte aéreo de largo recorrido y nacional, calefacción residencial	☹ Problema resuelto formalmente, pero el valor límite es poco estricto en lo que se refiere al PM ₁₀
PM ₁₀	Transporte aéreo de largo recorrido y nacional, calefacción residencial, tráfico	☹ Problema casi resuelto mediante la reducción de la contribución local ☞ Cambio a una tecnología de control y un combustible limpio
NO ₂	Tráfico rodado (diésel)	☹ Problema serio; infracción iniciada por la UE

Figura 2

Nivel de calidad del aire en Berlín con respecto a los estándares de la Unión Europea (Directiva 2008/50/EC).

composición de PM₁₀ se analizó posteriormente en 10 lugares seleccionados de Berlín y tres estados federales, situados en estaciones de calidad del aire de tráfico, fondo urbano y rurales remotas¹⁹³.

Los resultados confirman hallazgos previos¹⁹⁴ de que solo un tercio de la contaminación

proviene de fuentes del interior de la ciudad, mientras que el resto proviene de emisiones exteriores (ver figura 3a, que muestra resultados contribución de fuentes con modelos receptores). Aplicando la técnica de factorización de matriz positiva (PMF) en una serie de datos promedios diarios tomados

193 Van Pinxteren D., Mothes F., Spindler G., Fomba K. W. and Herrmann H., 2017. Auswertung der gravimetrischen PM₁₀-Messungen in Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Berlin zur Identifikation des Anteils verschiedener Quellen an der Feinstaubbelastung anhand der Inhaltsstoffe und anhand von Rezeptormodellierungen (PM OST), (Evaluation of gravimetric PM₁₀ measurements in Saxony, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern and Berlin to identify the share of different sources of the PM10 pollution based on the composition and on receptor modelling). On behalf of the Senate Department for Environment, Transport and Climate protection. Berlin, in press.

194 LRP-Berlin, 2011. Air quality plan for Berlin 2011-17. Senate Department for Urban Development and Environment. Berlin. http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/lrp_150310_en.pdf

durante 80 días con concentraciones elevadas en tres puntos –al borde de una carretera en el centro de Berlín, en un lugar situado en una zona residencial central sin tráfico (“fondo urbano”) y en una ubicación rural a 40 km de Berlín (“entorno regional”)–, se descubrió que durante esas situaciones meteorológicas episódicas se evidenciaban los siguientes patrones comunes:

- La responsabilidad del transporte regional es incluso más alta, con una participación de hasta el 70% del PM_{10} total en el punto de acceso urbano al borde de la carretera.
- El PM_{10} consiste principalmente en partículas secundarias, como nitrato de amonio (AN), sulfato de amonio (AS) y compuestos orgánicos (OCs), con concentraciones absolutas casi iguales en cada uno de los tres puntos de muestreo.
- Las contribuciones directas de PM_{10} de las emisiones procedentes de la combustión de fuentes estacionarias locales son casi insignificantes.
- Hay una contribución evidente de la combustión de leña (biomasa), derivada de las mediciones del compuesto trazador levoglucosan, que se produce en los tres puntos en cantidades casi iguales. Aparece en un 10 a 15% en los datos de modelado del receptor (ver figura 3a), mucho más

pronunciado que en los resultados del modelo de dispersión (ver figura 3b), donde la quema de madera aparece en la “categoría de otras fuentes” con un porcentaje de tan solo el 4%. Esto no es sorprendente, ya que el primero se limita a la temporada de calefacción, mientras que el segundo refleja un promedio durante todo el año. Asimismo, un componente de la combustión de la madera también se incluye en la parte de fondo regional (ver figura 2b), si bien no se resuelve mediante el cálculo de la dispersión.

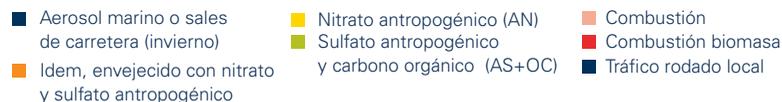
Independientemente, de los episodios de PM_{10} , existe una importante contribución del tráfico urbano. Los cálculos del modelo de dispersión, promediados durante todo el año, muestran que el 21% del PM_{10} está relacionado con el tráfico local en un street canyon. Otro 5% proviene del tráfico en otras partes de la zona urbana. La mayor parte de las emisiones del tráfico se generan por resuspensión y abrasión de la superficie de la carretera, de los neumáticos y del material de rotura. Solo una cuarta parte de las emisiones, aproximadamente, se producen en el tubo de escape de los vehículos¹⁹⁵, principalmente como partículas ultrafinas (UFP) procedentes de motores diésel y de motores Otto de inyección directa. Esta fracción particularmente tóxica de las emisiones del tráfico vial era mucho más

195 Van Pinxteren D., Mothes F., Spindler G., Fomba K. W. and Herrmann H., 2017. Auswertung der gravimetrischen PM_{10} -Messungen in Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Berlin zur Identifikation des Anteils verschiedener Quellen an der Feinstaubbelastung anhand der Inhaltsstoffe und anhand von Rezeptormodellierungen (PM OST), (Evaluation of gravimetric PM_{10} measurements in Saxony, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern and Berlin to identify the share of different sources of the PM10 pollution based on the composition and on receptor modelling). On behalf of the Senate Department for Environment, Transport and Climate protection. Berlin, in press.

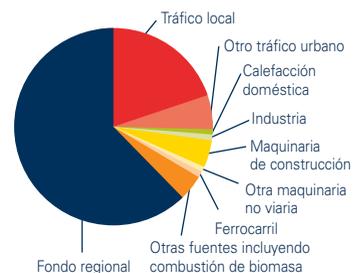
A) PM₁₀ en diferentes puntos de monitoreo, basado en modelo de receptores.



Categorías de fuentes



B) Contribución por fuentes de las emisiones de PM₁₀ en estaciones de tráfico.



C) Contribución por fuentes de las emisiones de NO₂ en estaciones de tráfico.

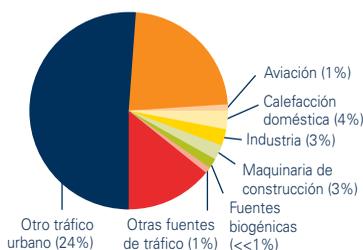


Figura 3

Contribución de las fuentes de emisión en Berlín.

A) a PM₁₀ en diferentes puntos de monitoreo basados en modelo de receptores,

B) a PM₁₀ en las estaciones de tráfico de control de calidad del aire de Berlín, basado en modelo de dispersión multiescala,

C) a NO₂ en las estaciones de tráfico de control de calidad del aire de Berlín, basado en modelo de dispersión multiescala.

dominante en el pasado¹⁹⁶, siendo igual de alta que las emisiones del tráfico no atribuibles al motor (abrasión frenos y ruedas) hace 15 años, antes de que entrara la zona de bajas emisiones (ZBE, ver el siguiente apartado).

Si bien la importancia de las emisiones de partículas de escape del tráfico rodado ha disminuido, ha aumentado el hollín del diésel procedente de la maquinaria de construcción. Entre las propias fuentes de Berlín, ésta se

196 LRP-Berlin, 2005. Clean air and action plan for Berlin 2005-10. Senate Department for Urban Development and Environment. Berlin. http://www.berlin.de/senvvk/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/2005/Clean_Air_Plan.pdf
 Lenschow P, Abraham H.-J., Kutzne, K., Lutz M., Preuss J.-D., Reichenbächer, W., 2001. Some ideas about the sources of PM₁₀. Atmos. Environ. 35 Suppl. 1, 23–33.

ha convertido en la segunda mayor, con una participación del 5% en la contaminación total de PM_{10} (ver figura 3b), alcanzando una magnitud similar a las emisiones del tubo de escape de los vehículos a motor. Con respecto al origen de la contaminación de PM_{10} de Berlín, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

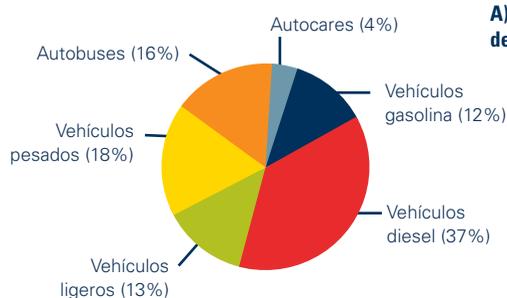
- Aproximadamente dos tercios provienen del exterior, incluso de fuentes extranjeras, que no pueden ser reducidos por la gestión local.
- Entre las fuentes de Berlín, el tráfico rodado sigue siendo predominante, en su mayoría por resuspensión y abrasión, que es difícil de controlar por medios técnicos.
- La combustión de biomasa para calefacción doméstica es una fuente ubicua, visible dentro y fuera de Berlín, con una contribución del 10 al 15% de PM_{10} total durante la temporada de calefacción.
- Se debería actuar frente a las emisiones de los tubos de escape de las máquinas de construcción, no solo por su toxicidad, sino también porque pueden controlarse de manera efectiva con filtros de partículas diésel (FPD). Como las regulaciones de emisiones de la UE aún no requieren FPD para maquinaria móvil fuera de la carretera, existe un potencial significativo para frenar las partículas tóxicas emitidas por dichas máquinas.

Dióxido de nitrógeno

El tráfico rodado es la fuente predominante de NO_2 . Casi la mitad de la contaminación en un típico street canyon con mucho tráfico proviene de los vehículos que circulan por ella. Otro 24% proviene del tráfico de otras partes de la ciudad. Los vehículos diésel generan más del 80% de las emisiones totales de NO_x , 50% de las cuales proceden de turismos diésel y vehículos ligeros (LGV) (ver figura 3a). Lo que es peor, las emisiones directas de NO_2 han crecido del 18% en 2009¹⁹⁷ a una cuota del 30%, llegando a ser incluso más importante que el NO_2 procedente del monóxido de nitrógeno (NO) liberado por los motores diésel y, en cantidades menores, por los vehículos de gasolina (ver figura 4). En relación con el transporte, existen otras fuentes pero son de menor relevancia, incluidas las ubicadas fuera de Berlín. Por lo tanto, para abordar el problema del NO_2 se necesitan medidas centradas en el sector del transporte rodado, especialmente en los vehículos diésel.

¿Qué medidas han tenido éxito y cuáles han fracasado?

Las emisiones de los vehículos de transporte y diésel han sido una prioridad estratégica durante bastante tiempo en Berlín para intentar alcanzar los valores límite de PM_{10} y NO_2 , que debían cumplirse



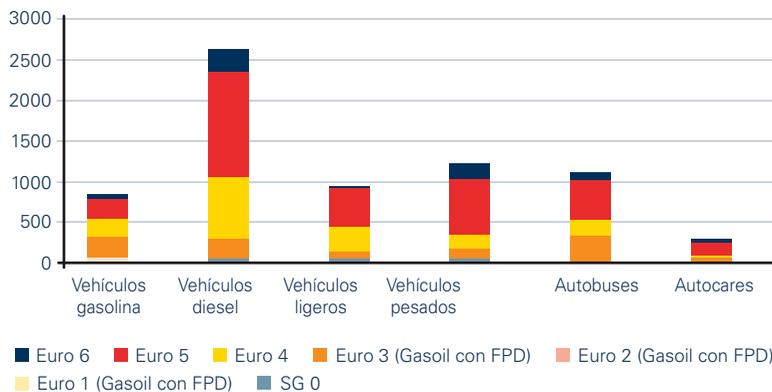
A) Reparto sobre el volumen total de emisiones del tráfico.

Figura 4

Contribución relativa del tráfico rodado al volumen de emisiones en Berlín.

SG 0: Vehículos sin etiqueta.

B) Emisiones de NO_x de diferentes tipos de vehículos según la composición de la flota en 2015, calculada con factores de emisión HBEFa 3.3 en el modo de conducción urbana.



en 2005 y 2010, respectivamente. A partir de la última década, en 2002, quedó claro que esto sería todo un desafío, porque los modelos mostraban que en street canyons el valor límite de PM₁₀ se superaba, y ello suponía un incumplimiento en más de 450 km de la red principal de carreteras, donde vivían casi 200.000 personas; es decir, el 8% de la población de Berlín. Las superaciones de NO₂, aunque no tan drásticas como las del PM₁₀, también fueron un problema.

Para abordar ambas cuestiones, Berlín presentó una serie de medidas destinadas a mejorar las flotas cautivas de vehículos. De este modo, ya en 1999, la flota de autobuses públicos, de más de 1.300 vehículos, fue gradualmente adaptada con FPD. Asimismo, en el plan de transporte público se establecieron las bases para avanzar hacia una flota de vehículos más limpios, requiriéndose que el operador público de autobuses de Berlín reemplazara

gradualmente los autobuses viejos por nuevos, equipados con un FPD eficiente y que cumplieran además con los objetivos Euro V y/o con el Enhanced Environmentally Friendly (EEV), estándar europeo de emisiones. Al igual que para los autobuses, se establecieron estándares ambientales para las flotas de vehículos municipales restantes en el sentido de que todos los vehículos diésel debían tener un FPD. Las empresas de taxis fueron estimuladas con incentivos económicos para cambiar a vehículos limpios, casi libres de partículas, impulsados con gas natural comprimido en lugar de diésel. Gracias a las inversiones de varios proveedores de gas, se creó una red de más de 20 estaciones de recarga con gas natural comprimido (GNC) y biogás. Al mismo tiempo, el Plan de Aire Limpio de Berlín de 2005¹⁹⁸ y su estrategia energética apuntaban a expandir la generación de energía renovable promoviendo, entre otras actuaciones, la instalación de paneles fotovoltaicos en los tejados de los edificios públicos, los cuales también se auditaron energéticamente para evitar el uso de fósiles combustibles para calefacción y las emisiones contaminantes asociadas. Con respecto a la planificación del transporte, Berlín desarrolló su primer Plan Estratégico de Transporte Urbano¹⁹⁹ que, entre otros objetivos, definió los medioambientales a largo plazo, como el de reducir los niveles de contaminantes

atmosféricos en 2015, incluso un 25% por debajo de los valores límite de calidad del aire. Asimismo, se realizaron inversiones para mejorar el transporte público, la infraestructura ciclista y el espacio destinado a los peatones, con el fin de aumentar la proporción de viajes en transporte no motorizado a más del 80% en el área central de la ciudad y a más del 66% en toda Berlín.

Estas inversiones dieron sus frutos en términos de una disminución gradual, de más del 10%, de los volúmenes de tráfico de vehículos de pasajeros entre 2002 y 2012, en consonancia con el cambio en la distribución modal del tráfico motorizado hacia el transporte público, peatonal y ciclista, donde el crecimiento ha sido más fuerte: desde 2000, los viajes en bicicleta se han más que duplicado en la zona central de la ciudad y aumentado casi un 50% en toda Berlín. No obstante, los vehículos registrados en relación con los residentes aún se mantienen en un nivel bastante bajo, inferior a los 350 vehículos/1.000 habitantes.

Estas medidas, en particular las relacionadas con las flotas de vehículos públicos, también se contemplaron como un modelo para el sector privado, pero no tuvieron el efecto a gran escala y de corto plazo necesario para frenar rápidamente las emisiones de partículas y de NO_x²⁰⁰. Dada la magnitud del incumplimiento, se hizo obvio que se necesitarían intervenciones

198 LRP-Berlin, 2005. Clean air and action plan for Berlin 2005-10. Senate Department for Urban Development and Environment. Berlin. http://www.berlin.de/senvvk/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/2005/Clean_Air_Plan.pdf

199 StEP-Verkehr, 2003. Mobil 2010. Stadtentwicklungsplan Verkehr Berlin (Urban Development Plan Transport for Berlin). Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Berlin, Germany.

200 Lutz M., 2013. Mitigation Strategies, Berlin, Germany, in: Particulate Matter: Environmental Monitoring and Mitigation. Ed.: M Cruz Minguillón, M., C., Viana, M., Querol, X., Ebook, p. 74-95, Nov. 2013, Future Science Ltd, elISBN: 978-1-909453-13-5, doi: 10.4155/ebo.13.489

más drásticas al apuntar a todas las flotas de vehículos en uso, especialmente aquellos que utilizan cada vez más diésel y carecen de un FPD eficiente.

Sobre la base de la experiencia adquirida en la década de los noventa con el diseño de esquemas de restricción de acceso para vehículos de gasolina sin convertidor catalítico, se planteó una propuesta similar en el período posterior a 2002. Esta vez el enfoque fue en los vehículos diésel, automóviles de pasajeros, furgonetas y camiones, especialmente aquellos sin FPD, una tecnología que, como el convertidor catalítico para los automóviles de gasolina, podía ser adaptada a los vehículos en uso para frenar significativamente sus emisiones de partículas.

Una vez más, Berlín fue un precursor, al menos en Alemania, al ser la primera ciudad que adoptó un esquema de este tipo en 2005, llamado ZBE (Umweltzone). Las restricciones de acceso se plantearon para entrar en vigencia en dos etapas, 2008 y 2010. Como ya estaba previsto en los años noventa, se trataba de cubrir la superficie central más ocupada de la ciudad, de 85 km², con la esperanza de que un área tan grande restringida para vehículos contaminantes produciría un impacto positivo en el parque de vehículos de toda la ciudad. La primera etapa de la ZBE requería como mínimo el estándar de emisión de vehículos Euro 2 para vehículos diésel y Euro 1 para vehículos de gasolina. Como solo afectaba a vehículos de más de 12 años, su objetivo era que fueran reemplazados

con vehículos más modernos y limpios. La etapa 2 del esquema ZBE, introducido a principios de 2010, requería como mínimo una adaptación del vehículo con un FPD o el estándar de emisión Euro 4, obligatorio solo a partir de 2006. Dado que la cuota de vehículos diésel nuevos que cumplían con los requisitos era todavía bastante bajo en 2010, un gran número de vehículos anteriores a Euro 2 y 3 necesitaron ser adaptados con una trampa de partículas para cumplir con la etapa 2 de ZBE. Como resultado, casi 70.000 vehículos diésel –aproximadamente un cuarto de todo el parque de automóviles, furgonetas y camiones registrados en Berlín– finalmente consiguieron un FPD adaptado. Como prerrequisito para una aplicación efectiva, así como para asegurar que solo los FPD aprobados y homologados fueran utilizados, el gobierno nacional de Alemania creó las regulaciones necesarias. Establecieron la eficiencia mínima del filtro además de otras características técnicas de los kits de actualización del FPD, y definieron un esquema de etiquetado de tres pegatinas que permitía identificar visiblemente a todos los vehículos de acuerdo con sus estándares de emisiones o FPD retroadaptados²⁰¹. Esto se hizo a nivel nacional porque las ciudades, e incluso los estados federales como Berlín, no tenían jurisdicción. También fue imprescindible regular estas cuestiones en todo el país de manera armonizada, ya que Berlín no era la única ciudad que consideraba una ZBE como una receta eficiente para mejorar la calidad del aire y

201 35. BImSchV, 2007. 35th Order implementing the Federal Pollution Control Act on the marking of low-pollution motor vehicles (35. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz Verordnung zur Kennzeichnung der Kraftfahrzeuge mit geringem Beitrag zur Schadstoffbelastung). Draft version in English: <http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/tris/en/search/?trisaction=search.detail&year=2007&num=393>

cumplir con los estándares de calidad del aire europeo para PM_{10} , e incluso para NO_2 . Hasta ahora, las ZBE se han puesto en marcha en más de 60 ciudades alemanas.

El análisis del impacto de la actuación en Berlín, basado en datos de la flota de vehículos y en numerosas mediciones de PM_{10} , NO_2 y BC, realizadas antes y después de la introducción de la ZBE, demostró su éxito con respecto a la contaminación por PM. Por un lado, las emisiones de PM diésel del transporte rodado disminuyeron en aproximadamente un 60% y las emisiones de PM_{10} hasta un 20%. Por el otro, la concentración total de carbono procedente del tráfico disminuyó en un 50% en toda la ciudad, también fuera de la ZBE, según datos de 21 estaciones de calidad del aire en emplazamientos de tráfico y puntos suburbanos de áreas residenciales sin mucho tráfico. Las concentraciones medias anuales de PM_{10} disminuyeron en un 10%. De este modo, gracias a la ZBE se evitan hasta 10 días con valores de PM_{10} superiores en 24 horas a los $50 \mu g/m^3$.²⁰² Dado que la estrategia de Berlín de “ningún diésel sin filtro” fue un éxito para los vehículos de gasoil, ésta se extendió posteriormente a la maquinaria de construcción, el sector con un importante potencial de ahorro de emisiones, según el estudio de asignación de fuentes. Si todas las máquinas de construcción que trabajan en Berlín estuvieran equipadas con FPD eficiente, el ahorro de emisiones de partículas de escape incluso superaría el impacto de la ZBE

en las emisiones de hollín diésel de los vehículos pesados. Por tanto, Berlín fijó criterios de emisión para maquinaria de construcción como parte de su contratación pública de estos servicios. A partir de 2017, las máquinas que trabajan en obras puestas en marcha por el sector público deben equiparse con un FPD eficiente y homologado, a menos que la máquina ya cumpla con la última norma de emisiones de la UE para maquinaria móvil no de carretera. Dada la posición dominante de Berlín como autoridad contratante en el sector de la construcción, se espera que estos criterios tengan un impacto positivo en la flota de maquinaria que opera también para todos los proyectos de construcción privados. Con el fin de facilitar el cumplimiento, Berlín introdujo un esquema de etiquetado para la maquinaria de construcción con un juego de cuatro adhesivos similares a los de los vehículos autorizados a entrar en la ZBE.

Los cruceros fueron otra fuente en la que Berlín intentó aplicar su estrategia “ningún diésel sin filtro”, aunque con un resultado menos positivo. Aunque pudo demostrarse en un proyecto piloto que el reacondicionamiento de buques de crucero con tres FPD distintos y con diferentes estrategias de regeneración es un medio factible y rentable para evitar las emisiones tóxicas de los humos diésel, las compañías navieras prefirieron no invertir en la adaptación de FPD, incluso con un esquema de financiación que cubría el 50% de los costes. La razón de este fracaso fue la falta de capacidad legal para restringir la

202 Lutz M., 2013. Mitigation Strategies, Berlin, Germany, in: Particulate Matter: Environmental Monitoring and Mitigation. Ed.: M Cruz Minguillón, M., C., Viana, M., Querol, X., Ebook, p. 74-95, Nov. 2013, Future Science Ltd, eISBN: 978-1-909453-13-5, doi: 10.4155/ebo.13.489
LRP-Berlin, 2011. Air quality plan for Berlin 2011-17. Senate Department for Urban Development and Environment. Berlin. http://www.berlin.de/senuvk/umwelt/luftqualitaet/de/luftreinhalteplan/download/lrp_150310_en.pdf

operación de buques contaminantes en las vías fluviales y lagos de Berlín, que dependen de la jurisdicción nacional e incluso europea. Fue también decepcionante el impacto de la ZBE en las emisiones de NO_x de los vehículos diésel. El análisis del esquema ZBE²⁰³ reveló que los niveles de NO_2 en las estaciones de calidad del aire de tráfico disminuyeron solo en menos del 10%. La mayor parte de la reducción conseguida puede vincularse a la prohibición forzada de vehículos de gasolina viejos sin convertidor catalítico ya en la primera etapa de la ZBE. Una reciente actualización de los factores de emisión NO_x bajo condiciones reales de conducción urbana (ver figura 5) muestra la reducción esperada de las emisiones de los automóviles de gasolina de menor antigüedad: cuanto más nuevo es un automóvil, menores son sus emisiones de NO_x por kilómetro recorrido. Por tanto, prohibir los vehículos de gasolina antiguos y reemplazarlos por modelos más modernos explica probablemente la disminución de las emisiones conseguida. Lamentablemente, esta ventaja técnica y medioambiental no se observa en los vehículos diésel, ya que los modelos más modernos que cumplen con Euro 5 emiten incluso más que las generaciones anteriores (ver figura 5). Además, el actual Euro 6 diésel no es mucho mejor con Condiciones de Conducción Reales (RDE), sino más de 4 veces por encima del umbral de aprobación de la categoría de vehículo. Lamentablemente, lo mismo se aplica

a los vehículos ligeros (LGV). Esta discrepancia entre RDE de NO_x y los objetivos de las regulaciones de emisiones de vehículos de la UE ²⁰⁴ surge de lagunas en la normativa actual para vehículos ligeros y automóviles, que hasta hace poco dependían por completo de pruebas de emisión artificiales y poco realistas en el laboratorio. Además, las autoridades nacionales de homologación apenas han llevado a cabo pruebas de cumplimiento en uso en carreteras hasta que se hizo pública la manipulación ilegal de los sistemas de postratamiento de NO_x por parte de Volkswagen en 2016.

De ese modo, el fracaso de las regulaciones europeas para automóviles y camiones ligeros, con el fin de garantizar una RDE de NO_x progresivamente más baja, resultó en un perjuicio de la filosofía de la ZBE, de frenar las emisiones prohibiendo los vehículos viejos y contaminantes y reemplazándolos rápidamente por otros más nuevos y limpios.

¿Qué es necesario hacer en el futuro?

De acuerdo con los cálculos y resultados del modelo actual, el estándar de calidad del aire para NO_2 sigue excediéndose hasta unos 60 km de la red principal de carreteras en Berlín, en puntos donde viven más 50.000 personas.

203 Lutz M., 2013. Mitigation Strategies, Berlin, Germany, in: Particulate Matter: Environmental Monitoring and Mitigation. Ed.: M Cruz Minguillón, M., C., Viana, M., Querol, X., Ebook, p. 74-95, Nov. 2013, Future Science Ltd, eISBN: 978-1-909453-13-5, doi: 10.4155/ebo.13.489.

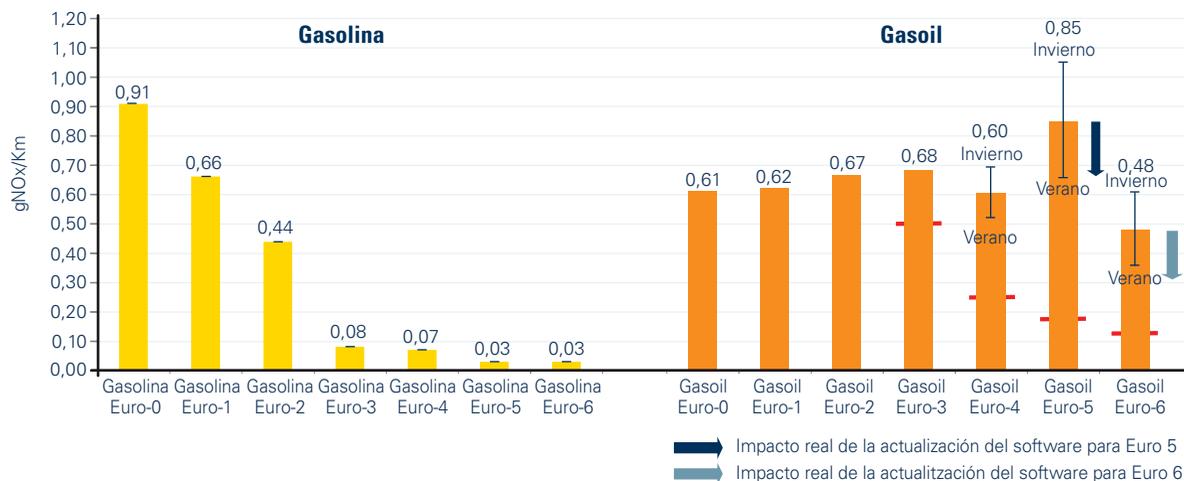
204 ICCT, 2014. Real-world exhaust emissions from modern Diesel cars. A meta-analysis of PEMS emission data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) Diesel passenger cars. The International Council on Clean Transportation. <https://www.theicct.org/publications/real-world-exhaust-emissions-modern-diesel-cars>.

EQUAIndex, 2013. Independent real-world emissions database, powered by Emissions Analytics Limited. <http://equaindex.com>.

Figura 5

Emisiones en Condiciones de Circulación Reales (RDE) de NO_x para diferentes categorías de turismos.

Factores reales de emisión de NO_x reales de los automóviles privados



En modo de conducción urbana del Handbook Emission Factors for Road Transport, versión 3.3²⁰⁵ (HBEFa, 2017). Los guiones horizontales en rojo indican los límites de NO_x de la homologación Euro estándar para diésel.

Dado el carácter jurídicamente vinculante de la norma de calidad del aire de la UE, y habiéndose superado ya en ocho años el plazo de cumplimiento de dicha norma, la presión para actuar es cada vez mayor. Sirva como ejemplo los siguientes hechos:

- Más de 30 demandas interpuestas en Alemania por ciudadanos afectados por la contaminación han dado como resultado veredictos judiciales

que exigen medidas más drásticas –incluidas restricciones de tráfico–, para cumplir con los estándares de calidad del aire tan pronto como sea posible. En el caso de Berlín, se espera una decisión judicial similar a corto plazo.

- La Comisión Europea ha impulsado procedimientos de infracción contra nueve estados miembros, entre ellos Alemania, donde más de 30 ciudades aún superan

considerablemente las normas de calidad del aire para el NO_2 , entre ellas Múnich, Stuttgart, Hamburgo y Berlín.

Es necesario conseguir como mínimo una disminución de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 para alcanzar los valores límite en un 80% de los emplazamientos de tráfico (ver figura 6, datos procedentes de los planes de calidad del aire de Stuttgart y Hamburgo). El problema es que el margen de reducción de la mayoría de las medidas es bastante limitado, y que numerosas medidas difícilmente pueden implementarse a corto plazo, dentro de uno o dos años. En particular, las medidas centradas en la electrificación de la flota de vehículos necesitarán más tiempo, dada la limitada disponibilidad de vehículos eléctricos en el mercado y la inversión sustancial necesaria para establecer la infraestructura de carga adecuada. Del mismo modo, las inversiones en transporte público e infraestructuras para bicicletas, con el fin de aumentar la participación de estos modos de transporte más limpios, tampoco darán lugar a una reducción a corto plazo de los desplazamientos en automóvil.

Lo que parece prometedor, incluso a corto plazo, son las medidas destinadas a reducir las emisiones del parque diésel en uso, especialmente en el caso de los autobuses (ver figura 4a), de los automóviles diésel relativamente nuevos Euro 4 a Euro 6, y de los vehículos LGV con emisiones reales de conducción elevadas.

En lo que se refiere a los autobuses públicos, Berlín ha modernizado con éxito más de 200 vehículos Euro IV diésel mediante sistemas de postratamiento de reducción catalítica selectiva

(SCR), que reducen las emisiones de NO_x en más del 80%. Otros 270 autobuses serán modernizados durante 2018, en combinación con un programa de renovación de la flota restante de autobuses en uso con 30 autobuses eléctricos por año y con nuevos autobuses Euro VI diésel de bajas emisiones probadas en carretera, las emisiones promedio de NO_x de la flota de Berlín se reducirán en casi un 80% para finales de 2018 en relación con las de 2010. Con respecto a otros vehículos diésel con alto RDE, especialmente los Euro 4 a 6 y los vehículos LGV, éstos producen casi el 50% de las emisiones de NO_x del transporte rodado en Berlín (ver figura 4). La industria automovilística alemana prometió recientemente en una cumbre nacional de diésel con el gobierno alemán actualizar el software de gestión electrónica de motores de más de 5 millones de vehículos, la mayoría de ellos Euro 5 y, en menor medida, Euro 6; es decir, alrededor de un tercio del parque registrado en Alemania. Según las cifras publicadas por la autoridad de homologación alemana y las mediciones de la asociación automovilística alemana ADAC, la actualización del software podría reducir efectivamente las emisiones de NO_x de los dichos vehículos Euro 5 y 6 entre un 25% y un 30% y entre un 40% y un 50%, respectivamente. Como la medida se ha aplicado en primer lugar a las marcas alemanas, el efecto de mitigación respectivo en el RDE de todos los automóviles diésel Euro 5 y 6 es aproximadamente una cuarta parte más baja (ver figura 5). En términos de concentraciones ambientales de NO_2 , la actualización del software por sí sola podría dar como resultado una reducción de 2 a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dato comparable

con el efecto de una bonificación de entre 4.000 y 8.000 euros por parte de los fabricantes alemanes a los propietarios de los antiguos vehículos diésel hasta Euro 4, si estos últimos optan por comprar uno nuevo.

Sin embargo, las estimaciones actuales del impacto de la actualización de software y las medidas antes mencionadas para reducir las emisiones de la flota de autobuses sugieren que, en aproximadamente 15 km de la red de carreteras, se seguirá excediendo el estándar de calidad del aire del NO₂. Solo algunas otras medidas parecen factibles a corto plazo, entre ellas imponer un límite de velocidad de 30 km/h (ver figura 6). De acuerdo con las mediciones de calidad del aire en las carreteras principales con límite de velocidad ya en vigor, esta medida podría reducir las concentraciones de NO₂ hasta 6 µg/m³, siempre y cuando la coordinación del semáforo pueda ajustarse a los niveles de velocidad más bajos y suavizar los flujos de tráfico. Actualmente, ya se está implementando un límite de velocidad de 30 km/h en cinco carreteras muy contaminadas, y se ha planificado en otras 13 con una longitud total de 16 km. Se están realizando mediciones de flujo y volúmenes de tráfico, perfiles de velocidad y calidad del aire para validar los beneficios esperados.

Sin embargo, parece inevitable realizar intervenciones más drásticas, a menos que las emisiones de las categorías más contaminantes y frecuentes de vehículos diésel en uso (Euro 4 a 6) puedan reducirse en un margen significativo mediante la adaptación del hardware de aquellos vehículos sin un sistema de postratamiento SCR eficiente. Un grupo de trabajo creado en el marco de la cumbre

nacional de diésel se encarga de investigar la viabilidad de tal medida.

En el momento de redactar este informe, aún no se han logrado resultados definitivos, pero las modificaciones de las pruebas piloto, y una evaluación general de las limitaciones técnicas, sugieren que al menos entre el 50% y el 70% del parque de vehículos diésel ligero podría ser modernizado mediante sistemas SCR con eficiencia del filtro de entre un 70% y un 90%. Dependiendo del número de vehículos adaptados y de la eficiencia de los sistemas de postratamiento modernizados, podrían evitarse entre el 8% y el 20% de las emisiones de NO_x del parque de vehículos de Berlín mediante una modificación adicional del hardware (ver figura 4b). El margen superior de ese rango parece realista solo si los costos de modernización, de entre 1.000 y 2.500 euros para automóviles y LGV, se cubrieran por completo con un plan de financiación nacional, y también para camiones Euro IV/V, por ejemplo, ofreciendo un descuento sustancial del peaje de la autopista alemana para vehículos pesados adaptados.

En cuanto a las carreteras más contaminadas de Berlín, con una longitud total de unos 15 km, la actualización del software y la aplicación de otras medidas locales a corto plazo se consideran insuficientes, si bien la modificación del hardware es imprescindible para evitar la medida más drástica, como es la prohibición de los vehículos diésel más contaminantes.

Como ha demostrado la experiencia del esquema ZBE existente, su ampliación para cubrir las categorías más contaminantes de motores diésel sería la manera más rentable y más fácil de ejecutar para resolver el problema generalizado de incumplimiento de los niveles

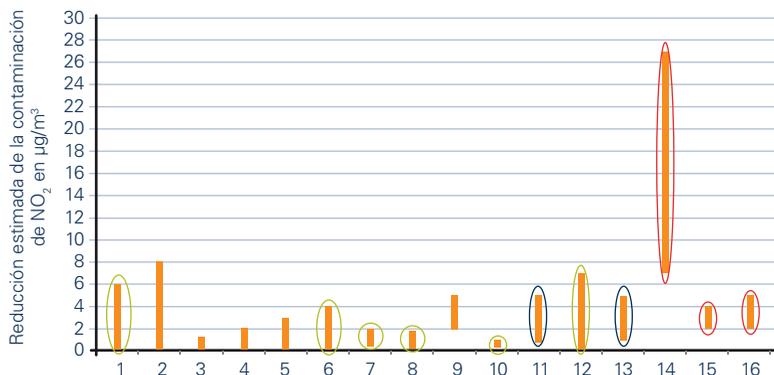


Figura 6

Potencial de reducción estimado de diferentes medidas en los niveles de contaminación de NO₂.

Basado en evaluaciones de impacto de los planes de calidad del aire de Stuttgart²⁰⁶ y Hamburgo²⁰⁷, y de la experiencia en Berlín.

- | | | |
|------------------------------------|--|---|
| 1. Autobuses limpios | 9. Combinación de medidas | ● Implementación factible a finales de 2018. |
| 2. 100% autobuses eléctricos | 10. Optimización de los flujos de tráfico | ○ Medidas aplicables en Berlín con apenas algunos efectos. |
| 3. Flota municipal eléctrica | 11. Políticas del departamento de gestión del tráfico* | ○ Medidas efectivas, aunque la implementación necesita actuaciones a escala nacional por parte de la industria del automóvil. |
| 4. Taxis eléctricos | 12. Velocidad máxima 30 km/h* | ○ Medidas con efectos tangibles sólo a partir de 2018. |
| 5. Automóviles eléctricos 5/10% | 13. Prohibición de camiones* | |
| 6. Transporte público en bicicleta | 14. Prohibición de vehículos diesel | |
| 7. Gestión del aparcamiento | 15. Actualización de software | |
| 8. Gestión de la movilidad | 16. Bonificaciones al cambio de vehículos | |

*Solo el impacto local; pueden tener efectos negativos sobre otras vías.

de NO₂ en Berlín, en muchas otras ciudades de Alemania e incluso en el conjunto de la UE, si se combinan con las siguientes medidas:

- Exenciones para vehículos diésel nuevos que cumplan con la futura norma Euro 6d basada en RDE, que entrará en vigor en 2020.
- Exenciones para vehículos diésel nuevos que cumplan con la futura norma Euro 6d basada en RDE, que entrará en vigor en 2020.
- Excepciones para vehículos en uso adaptados con un sistema certificado de postratamiento SCR.
- Exenciones por tiempo limitado para vehículos en los que no se disponga de ninguna opción de retroadaptación.
- Una nueva eco-etiqueta para identificar los vehículos limpios.

Esto requeriría una acción inmediata por parte del nuevo gobierno alemán, que tiene la jurisdicción exclusiva para definir

206 LRP-Stuttgart, 2017. Luftreinhalteplan für den Regierungsbezirk Stuttgart - Teilplan Landeshauptstadt Stuttgart, 3. Fortschreibung vom Mai 2017 (Air quality plan for the city of Stuttgart, 3rd revision of May 2017, in German only). <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rps/Seiten/aktuellemeldung.aspx?rid=133>

207 LRP-Hamburg, 2017. Luftreinhalteplan für Hamburg - 2. Fortschreibung vom 30. Juni 2017 (Air Quality Plan for Hamburg, 2nd revision of 30 June 2017, in German only). <http://www.hamburg.de/contentblob/9024022/7dde37bb04244521442fab91910fa39c/data/d-lrp-2017.pdf>

un nuevo esquema de eco-etiqueta para vehículos limpios, así como poner en vigor las reglamentaciones técnicas necesarias para la retroadaptación y asegurarse de que se otorguen incentivos financieros a quienes compraron un diésel en la creencia de que era limpio y eficiente en el consumo de energía. En el momento de escribir este artículo, aún no está claro qué sucederá y si se podrán evitar las prohibiciones drásticas sobre los vehículos diésel. El tribunal administrativo supremo alemán dictaminó recientemente que las prohibiciones de tráfico de vehículos (diesel) contaminantes pueden aplicarse para impulsar las opciones de modernización más efectivas, incluso sin una nueva etiqueta para vehículos realmente limpios, pero señala que la prohibición para la categoría de vehículos diésel no emisores de NO_x Euro 5 debe ser proporcionada, ya que se debe otorgar un período de transición de al menos hasta septiembre de 2019 en caso de restricciones de circulación impuestas en un área más grande, para que los propietarios de los vehículos tengan tiempo de llevarla a cabo. Por lo tanto, esto proporcionaría tiempo para investigar y respaldar las opciones de modernización efectivas para estos vehículos y para aquellos Euro 6 y vehículos pesados con altas emisiones de conducción reales. Afortunadamente, el nuevo gobierno establecerá rápidamente el marco regulatorio requerido, negociará con la industria del automóvil cómo proporcionar los fondos necesarios y presentará la tan necesitada ampliación del esquema de etiquetas para que los vehículos adaptados y los nuevos puedan adaptarse a restricción de tráfico. En

caso contrario, las prohibiciones de tráfico -que difícilmente podrán evitarse en un buen número de ciudades alemanas con niveles elevados de NO₂, incluido Berlín-, serán difíciles de aplicar, porque los vehículos limpios y contaminantes no pueden distinguirse fácilmente sin una etiqueta.

En lo que respecta a Berlín, el plan actual de calidad del aire está siendo revisado actualmente. El nuevo plan, en la medida de lo posible, agotará todas las opciones para las acciones locales, entre ellas un conjunto de medidas adicionales de planificación del transporte presentadas en la nueva estrategia, que también se está revisando. Prevé inversiones masivas en modos de transporte más limpios, especialmente en una mejor infraestructura ciclista, gastando más de 50 millones de euros anuales en carriles bici adicionales en las vías principales, en una red de ciclovías, en la construcción de carriles para bicicletas de hasta 100 km y en la instalación de más de 200.000 plazas de estacionamiento. Además, se está elaborando una hoja de ruta hacia la movilidad sostenible con la implicación de instituciones de investigación, agencias gubernamentales, empresas privadas innovadoras y asociaciones comerciales de Berlín, con el objetivo de impulsar el uso de vehículos eléctricos, en particular en las flotas municipales, en el carsharing, en los servicios de reparto (también con bicicletas eléctricas), y en autobuses y taxis.

Por tanto, como hace veinte años, Berlín está siguiendo una combinación de políticas que implica la adopción de las medidas siguientes:

- Promover el desarrollo y la aplicación de tecnologías más limpias y mejores técnicas disponibles mediante financiación y subsidios: en el pasado, mediante tecnologías de filtros modernas y combustibles más limpios para centrales eléctricas, industrias y motores diésel, mientras que actualmente, para el tráfico rodado, mediante técnicas de propulsión de vehículos alternativos y el suministro de combustibles, energía renovable y limpia.
- Todo ello combinado, si es necesario, con restricciones normativas para el uso de tecnologías contaminantes: en el pasado, mediante alertas de contaminación y suspensión de actividades contaminantes, y actualmente, mediante restricciones del acceso de vehículos contaminantes a áreas urbanas con superaciones de los estándares de calidad del aire (la ZBE).

- En lo que respecta a la movilidad urbana, con inversiones en medios de transporte alternativos, respetuosos con el medio ambiente y compatibles con el entorno urbano, como el uso compartido del automóvil, el transporte público y la infraestructura ciclista y peatonal.

Todo esto servirá no solo para la gestión de la calidad del aire, sino también para otros objetivos de política urbana, como la reducción del ruido, la mitigación del clima y la planificación sostenible de la ciudad y el transporte.

Sobre la base de estos tres pilares, la estrategia de calidad del aire de Berlín ha logrado deshacerse rápidamente de la etiqueta de haber sido la ciudad más contaminada de Europa, y debería ser capaz en un futuro próximo de resolver el problema actual de los humos diésel y del incumplimiento del NO₂.



Licenciado en Física. Especializado en Estadísticas de Salud y en Gestión Pública. Es el director de la Unidad de Calidad del Aire de ARPA Lombardia, la Agencia Regional de Protección Ambiental, desde 2001. Coordina las actividades relacionadas con el control de la calidad del aire, el inventario de emisiones en la atmósfera y la modelización de la calidad del aire en Lombardia. Coordina el apoyo técnico al Gobierno Regional para implementar la legislación de la Unión Europea e Italia.

Guido Lanzani

Agencia Regional para la Protección del Medio Ambiente de Lombardia (ARPA Lombardia)

Caso 4. La experiencia de Lombardia

Preguntas clave del artículo

- ¿Cuáles eran hace años los principales agentes contaminantes del aire en Lombardia?
- ¿Qué problemas de calidad del aire permanecen abiertos?
- ¿Cuál es la contribución de cada fuente emisora?
- ¿Cuáles son las medidas aplicadas y cuál su efectividad?
- ¿Son suficientes las medidas que ya se están aplicando y las que se implementarán a corto plazo?
- ¿Qué barreras deben superarse para implementar las medidas a medio y largo plazo?

Apunte inicial

Los patrones ambientales de la región de Lombardía, situada en el norte de Italia, están muy influidos por la presencia de los Alpes, que cubren la mitad del territorio, y por la planicie del valle del río Po, en el sur, que caracteriza la otra mitad. Milán, la capital, está situada en medio del valle, donde los Alpes y los Apeninos crean una cuenca interior cerrada, con montañas que superan los 2.500 m a menos de 50 km del centro de la ciudad. Esta orografía abrupta, junto con una meteorología peculiar, determina unas condiciones desfavorables para la dispersión de los agentes contaminantes del aire. Asimismo, se registran situaciones anticiclónicas más de 120 días cada año, con inversiones frecuentes de temperaturas y vientos inferiores a los 1 m/s de media, entre los más bajos de Europa²⁰⁸ (ver figura 1).

Desde un punto de vista económico, Lombardía es una de las áreas más ricas y pobladas de Italia. Con 10 millones de habitantes, y un Producto Interior Bruto (PIB) que alcanza los 357.200 M€ (2015), representa el 16% de población italiana y más del 22% del PIB total italiano²⁰⁹. Milán, con 1,3 millones de habitantes (7.450 hab./km²) contribuye de manera significativa a la economía regional y del conjunto de Italia. En el año 2015, se registraron 165.000 empresas en la ciudad y 300.000 en el área metropolitana, además de 3.000 empresas

multinacionales. Representa, aproximadamente, el 10% del PIB italiano, con 45.000 € per cápita, más del doble que el PIB italiano per cápita (24.000 €)²¹⁰.

¿Cuáles eran hace años los principales agentes contaminantes del aire en Lombardía?

Con estos datos climáticos y socioeconómicos, la acción contra la contaminación atmosférica en Lombardía es realmente imprescindible, además de un desafío, considerando que es necesario reducir emisiones mucho más que en otras regiones donde la meteorología es más favorable a la dispersión. Asimismo, la estructura productiva está basada en un gran número de pequeñas empresas, que generalmente tienen que mover bienes con un número elevado de camiones y vehículos ligeros. No obstante, la historia del dióxido de azufre nos enseña que es posible ganar la batalla contra la contaminación, incluso cuando parece particularmente difícil.

Como en otras partes de Europa, el fuerte desarrollo industrial en Lombardía tras la Segunda Guerra Mundial, con poca o ninguna atención al medio ambiente, llevó a unos niveles

208 RIVM - National Institute of Public Health and Environment (Bilthoven, Netherlands) NILU - Norwegian Institute for Air Research (Kjeller, Norway), 1995. AIR QUALITY IN MAJOR EUROPEAN CITY (1995) Part II: City Report Forms

209 ASR, 2017 Anuario Statistico Regionale – Regione Lombardia <http://www.asr-lombardia.it>

210 ASR, 2017 Anuario Statistico Regionale – Regione Lombardia <http://www.asr-lombardia.it>

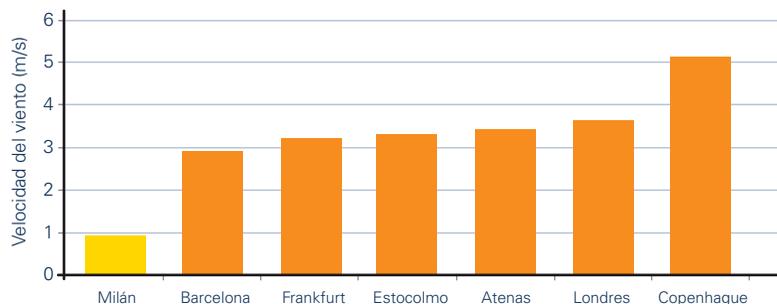


Figura 1

Velocidad media anual del viento en algunas ciudades europeas.

Fuente: Datos de RIVM, 1995²¹¹

de contaminación atmosférica muy altos. Tras el famoso episodio de niebla tóxica de Londres en 1952²¹², y también en Milán a partir de 1957, se empezó a medir la concentración de agentes contaminantes en el aire.

En aquel período, el compuesto de referencia era el SO₂. Los niveles registrados en Milán eran extraordinariamente altos, excediendo muy a menudo los 500 µg/m³ durante el invierno y como promedio anual, respectivamente. A partir de entonces, se fue reduciendo el contenido en azufre (S) de todos los combustibles usados en la industria, en calefacciones domésticas y en la gasolina y el gasoil. En la industria, la primera ley italiana contra la contaminación atmosférica (Ley n° 615 de 1966) admitió un máximo de S del 3% en el fuel y del 2% en el carbón; en 1995 el porcentaje máximo admitido era del 1% en el fuel y el carbón; en 2002, del 0,3% y el 1%,

respectivamente; en 2006 todas las centrales termoeléctricas de Lombardía fueron ya transformadas de fuel a metano (CH₄) en los ciclos combinados. Para la calefacción doméstica, antes de 1966 no existía ningún límite para el S; a partir de ese año se admitió un máximo del 3%, con la posibilidad de utilizar fueles de carbón y pesados. Hoy en día, el porcentaje máximo permitido es del 0,2% en el fuel ligero y está prohibido en Lombardía para carbón y fuel pesado (con algunas excepciones muy limitadas).

También los combustibles utilizados en la industria automotriz siguieron el mismo camino: desde las 1.000 ppm S (mg/kg) admitidas en la gasolina y las 3.000 ppm en el gasoil antes de 1993, hasta las 10 ppm después de 2009 para ambos combustibles. Todos estos esfuerzos permitieron alcanzar los objetivos planteados: los promedios mensuales de SO₂ en Milán son

211 RIVM - Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (Bilthoven, Países Bajos) NILU - Instituto Nororiental de Investigación del Aire (Kjeller, Noruega), 1995. CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD EUROPEA PRINCIPAL (1995) Parte II: Formularios de informes de la ciudad

212 Davis, DL; Bell, ML; Fletcher, T 2002. A look back at the London smog of 1952 and the half century since, Environmental Health Perspectives. 110, A734–5. PMC 1241116 PMID 12501843. doi:10.1289/ehp.110-a734.

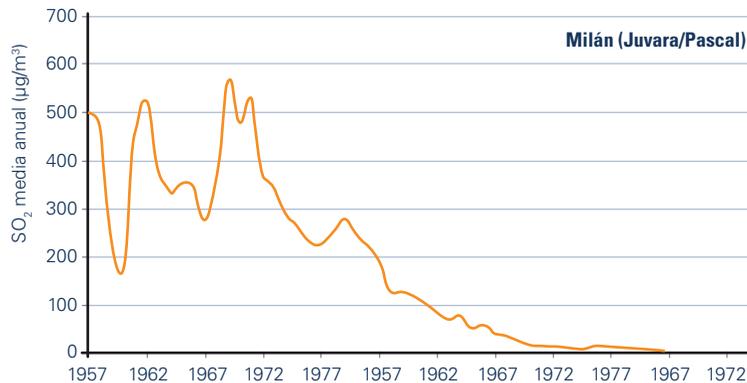


Figura 2

Promedio anual de SO₂ (µg/m³) en Milán (1954-2014).

actualmente inferiores a 10 µg/m³, y el promedio anual está por debajo de los 5 µg/m³ (ver figura 2). Esta exitosa historia demuestra que si todas las medidas de política ambiental requeridas se llevan a cabo de la manera correcta, es realmente posible alcanzar el reto de mejorar la calidad del aire, incluso a partir de situaciones de partida muy difíciles.

Para el monóxido de carbono (CO) y el benceno (C₆H₆) las tendencias fueron similares durante años, aplicándose medidas distintas, entre las que cabe destacar la renovación de la flota de vehículos de carretera y la introducción de catalizadores en los automóviles de gasolina.

¿Qué problemas de calidad del aire permanecen abiertos?

Actualmente, el desafío es aún mayor que en el pasado. La contaminación del aire en Lombardía no solo afecta a los contaminantes primarios, si no también a las sustancias que no se emiten directamente en la atmósfera, sino se forman a partir de precursores como el ozono (O₃) y una gran fracción de PM₁₀ y PM_{2.5}. El O₃ excede los objetivos de la Unión Europea sobre calidad del aire, tanto en materia de salud humana como de protección de la vegetación: más de 60 días/año con medias octohorarias por encima de los 120 µg/m³ y AOT40 de más de 28.000 µg/m³.h son bastante comunes, con valores más elevados a sotavento de las ciudades.

Las superaciones del límite diario de PM₁₀ son frecuentes y generalizadas, con alrededor de 80 a 100 días cada año por encima de los 50 µg/m³, incluso con una tendencia decreciente (ver figura 3). La concentración promedio anual de PM_{2.5}

medida en la ciudad de Milán en 2016 alcanzaba los 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en alguna estación, excediendo el valor límite anual de $\text{PM}_{2,5}$ marcado por la Unión Europea (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde 2015)²¹³.

Las concentraciones de PM son bastante similares en toda la cuenca, porque las PM secundarias tiende a superar a las primarias. Los estudios de composición de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ muestran que alrededor del 35%-40% de la masa está compuesta por nitrato de amonio y sulfato de amonio (aerosoles inorgánicos secundarios). También los compuestos orgánicos de origen secundario son una fracción importante de la masa de las PM_{10} ya que, en general, alrededor del 70% de las PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ medidas tienen este origen²¹⁴. El componente secundario es aún más importante para las $\text{PM}_{2,5}$, especialmente durante episodios de contaminación elevada²¹⁵. Unidas a estas PM primarias, la carga secundaria puede considerarse una especie de "fondo regional". Por tanto, para reducir el O_3 y las PM, se requieren acciones a escala de toda la cuenca, porque las acciones locales, si se llevan a cabo en áreas limitadas, solo pueden dar pequeños efectos o incluso no producir resultados. En el caso de Milán,

esta escala es todo el valle del Po, 400 km de este a oeste y 150 km de norte a sur. Estas medidas deben reducir a lo largo del año las emisiones primarias de PM, pero también los precursores gaseosos, principalmente los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) para partículas; y los NO_x y los COVs durante la primavera y el verano para el O_3 . Los niveles de dióxido de nitrógeno (NO_2), incluso si disminuye considerablemente con respecto a los máximos de hace algunos años, y de benzo(a)pireno (B(a)P), siguen excediendo los estándares de la Unión Europea. Para el NO_2 , las concentraciones más altas se miden en las estaciones de tráfico: en Milán, el promedio anual más elevado de 2016 alcanzó los 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, muy lejos del máximo de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de 1994, pero aún por encima del promedio anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor límite anual de la UE. Para el B(a)P, los valores máximos no se registran en los centros de las ciudades (promedios anuales del centro de Milán de 0,2 a 0,3 ng/m^3), sino en áreas con un uso generalizado de madera para calefacción doméstica –promedio anual máximo de 1,3 ng/m^3 en Darfo, un área suburbana donde es habitual el uso de estufas de leña²¹⁶–.

213 ARPA Lombardia, 2016. Rapporto annuale sulla qualità dell'aria – anno 2016. http://www.arpalombardia.it/sites/QAria/_layouts/15/QAria/Approfondimenti.aspx

214 Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V., Colombi C., Alves C., Custódio D., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapoulis E., Reche C., Minguillón M., Manousakas M., Maggos T., Vratolis S., Harrison R., Querol X., 2106. AIRUSE-LIFEC: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3289–3309, 2016. www.atmos-chemphys.net/16/3289/2016/ doi:10.5194/acp-16-3289-2016

215 Giugliano M., Lonati G., Butelli P., Romele L., Tardivo R., Grosso M., 2005. Fine particulate ($\text{PM}_{2.5}$ – PM_{10}) at urban sites with different traffic exposure. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 2421–2431.
Larsen B.R., Gilardoni S., Stenström K., Niedzialek J., Jimenez J., Belis C.A., 2012. Sources for PM air pollution in the Po Plain, Italy: II. Probabilistic uncertainty characterization and sensitivity analysis of secondary and primary sources. *Atmospheric Environment* 50 (2012) 203-213.

216 ARPA Lombardia, 2016. Rapporto annuale sulla qualità dell'aria – anno 2016. http://www.arpalombardia.it/sites/QAria/_layouts/15/QAria/Approfondimenti.aspx

¿Cuál es la contribución de cada fuente emisora?

En el tráfico por carretera

Los datos del inventario de emisiones²¹⁷ muestran que el sector del transporte es la fuente principal de PM_{10} primarias en Milán –el 44% de las PM_{10} totales primarias son emitidas por el tráfico a motor en el área metropolitana–, y el segundo en la región de Lombardía –el 25% de emisiones totales primarias de PM_{10} –. Más concretamente, las emisiones de los gases de combustión de los motores diésel representan el 22% en Milán y el 14% en Lombardía, mientras que las partículas procedentes de los frenos y los neumáticos el 21% en Milán y el 10% en Lombardía (ver figura 3).

Según el mismo inventario, el tráfico rodado es la fuente principal de NO_x , tanto en el centro de la ciudad como en toda la región de Lombardía –el 70% de NO_x emitidos en Milán y el 53% de NO_x en Lombardía se atribuyen al sector del transporte–. La motorización diésel es la principal fuente de NO_x , tanto en lo que se refiere a los vehículos privados como, sobre todo, a los ligeros y pesados empleados para la distribución de mercancías.

Asimismo, todos los tipos de vehículos producen resuspensión de polvo de carretera,

no contemplado en los inventarios de emisiones pero relevante como fuente de PM_{10} en aire ambiente: alrededor del 15% en promedio de la masa PM_{10} total²¹⁸.

Calefacción doméstica y combustión de madera

La contribución de la calefacción doméstica es también importante; la principal fuente de este sector es la combustión de leña en estufas y chimeneas pequeñas. De hecho, aunque solo un pequeño porcentaje de casas se calienta con madera –alrededor del 7% en Lombardía–, los factores de emisión de PM para este tipo de calderas son 100-1.000 superiores a los correspondientes a las alimentadas con gas natural –y 10-100 veces más que el fuel ligero–. En Lombardía, la combustión de madera de la calefacción doméstica es responsable del 44% de las emisiones primarias de PM_{10} , y alcanza el 47% si se consideran todos los sectores. En el centro de la ciudad, donde las características constructivas no son adecuadas para estufas de leña y chimeneas, esta contribución disminuye, aunque sigue siendo relevante en toda el área metropolitana de Milán, un 23% (ver figura 4), ya que en los suburbios de la ciudad está aumentando el uso de leña doméstica. Los estudios de distribución de fuentes han demostrado que sobre la base de

217 ARPA Lombardia, 2017. INEMAR2014 – inventario regionale delle emissioni – anno 2014. <http://inemar.arpalombardia.it/inemar/webdata/main.seam>

218 Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V., Colombi C., Alves C., Custódio D., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M., Manousakas M., Maggos T., Vratolis S., Harrison R., Querol X., 2106. AIRUSE-LIFEC: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3289–3309, 2016. www.atmos-chemphys.net/16/3289/2016/ doi:10.5194/acp-16-3289-2016

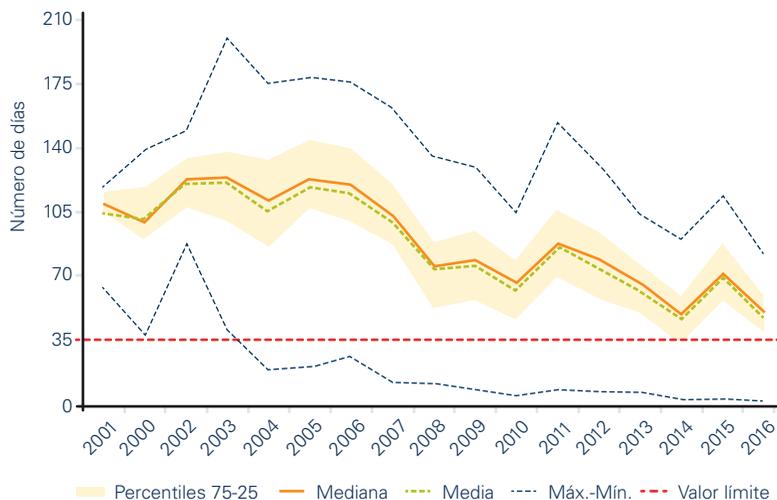


Figura 3

Número de días con promedio diario > 50 µg/m³.

Fuente: Todas las estaciones de la red de calidad del aire de la región de Lombardía

PM₁₀ medidas, de origen primario y secundario, la contribución de la combustión de madera durante la estación fría alcanza alrededor del 10-15% de PM₁₀ presente en el aire del centro de Milán. En las áreas periféricas y en los valles de fuera del área metropolitana esta cifra alcanza el 25-30% de la masa total de PM₁₀.

Es importante señalar que las emisiones de la quema de leña no solo son significativas para las concentraciones masivas de PM₁₀ en aire ambiente, sino para la concentración de

hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y, en general, para toda la carga de PM orgánico. Según el inventario de emisiones de Lombardía, más del 70% de las emisiones de B(a)P son atribuibles a esta fuente. Los estudios de distribución de fuentes confirman la importante contribución de la quema de madera a las concentraciones ambientales de B(a)P –de más del 70% en Milán a alrededor del 84%-85% en Valtellina, el principal valle alpino en Lombardía y en las estaciones rurales de la planicie²¹⁹–.

219 Belis C.A., Cancelinha J., Duane M., Forcina V., Pedroni V., Passarella R., Tanet G., Douglas K., Piazzalunga V., Bolzacchini E., Sangiorgi G., Perrone M.G., Ferrero L., Fermo P., Larsen B.R., 2011. Sources for PM air pollution in the Po Plain, Italy: I. Critical comparison of methods for estimating biomass burning contributions to benzo(a)pyrene. *Atmospheric Environment* 45 (2011) 7266- 7275.
Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V., Colombi C., Alves C., Custódio D., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M., Manousakas M., Maggos T., Vratolis S., Harrison R., Querol X., 2106. AIRUSE-LIFEC: a harmonized PM speciation and source apportionment in five southern European cities, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3289–3309, 2016. www.atmos-chemphys.net/16/3289/2016/ doi:10.5194/acp-16-3289-2016

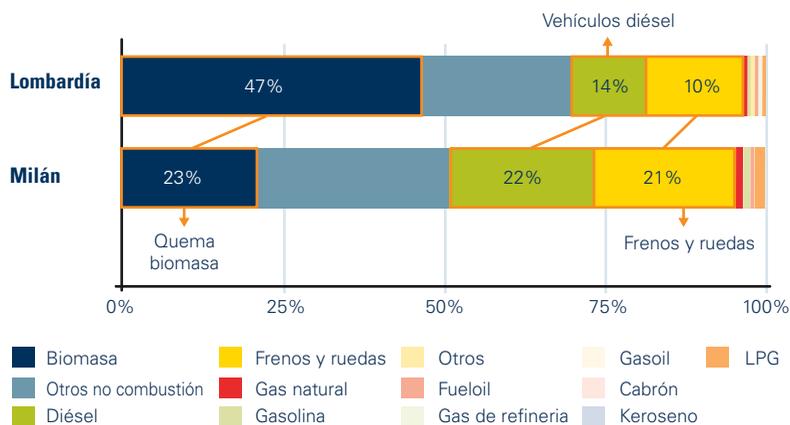


Figura 4

Inventario primario de emisiones PM₁₀ (2016).

Fuente: Arpa Lombardia, 2016

Agricultura

La agricultura y la ganadería son relevantes para las emisiones de NH₃. En Lombardía, representan el 98%²²⁰. En áreas urbanas, las de los vehículos a motor tampoco son despreciables. Así, mientras en el conjunto del territorio sólo el 1% de emisiones NH₃ se pueden imputar al sector de transporte, en la ciudad de Milán esta contribución alcanza el 42%. Como ya se ha apuntado, estas emisiones representan una contribución importante a la formación de secundario inorgánico PM.

Industria y otras fuentes

Las fuentes industriales pueden contribuir significativamente a las emisiones primarias de PM, NO_x y COVs. En particular, la generación de energía es relevante para las emisiones de NO_x, mientras que el uso de solventes es la fuente principal de COVs (ligeros)²²¹. Asimismo, el impacto de las emisiones industriales en la calidad del aire se incrementa en la proximidad de las plantas.

220 ARPA Lombardia, 2017. INEMAR2014 – inventario regionale delle emissioni – anno 2014. <http://inemar.arpalombardia.it/inemar/webdata/main.seam>

221 ARPA Lombardia, 2017. INEMAR2014 – inventario regionale delle emissioni – anno 2014. <http://inemar.arpalombardia.it/inemar/webdata/main.seam>

¿Cuáles son las medidas aplicadas y cuál su efectividad?

Local contra regional;
corto plazo contra largo

En el contexto descrito, es necesario disminuir las emisiones de PM primario y de B(a)P y NO_x , junto con las de NO_x , COVs, SO_2 y NH_3 a escala regional. Solo las políticas estructurales a largo plazo, al menos a nivel regional –y, todavía mejor, si involucra a toda la cuenca atmosférica del valle del Po–, pueden producir mejoras significativas de la calidad del aire con respecto a los niveles ambientales de PM. Las medidas locales o de corto plazo son útiles principalmente para aumentar la conciencia pública y cambiar comportamientos, pero menos efectivas en la reducción de los niveles de PM, ya que pueden disminuir los picos de concentración pero no los antecedentes regionales.

En Lombardía, el primer plan para reducir la contaminación atmosférica fue presentado en 1998, seguido de una pluralidad de proyectos y programas a escala regional. En 2013, se adoptó un nuevo plan de calidad del aire y un gran número de acciones fueron añadidas a escala local. Más adelante se apuntan las principales estrategias de mitigación adoptadas, en relación con los principales

sectores de emisión, incluso si, como se indicó anteriormente para el caso concreto de Milán, las características geográficas y meteorológicas son aspectos clave a tener en cuenta para cumplir con los estándares de PM de la UE. Según el plan de calidad del aire de la región de Lombardía, para cumplir dichos estándares habría sido necesario reducir las emisiones de PM_{10} primario y los precursores gaseosos en más del 50% con respecto a los niveles estimados de 2010, en todo el valle del Po. Debe tenerse en cuenta que las emisiones por PIB y por habitante en Lombardía ya son comparables a las de los países europeos más desarrollados²²².

Estrategias de mitigación para las emisiones del tráfico rodado

Se implementan dos tipos principales de medidas para disminuir las emisiones del tránsito: la mejora de las características tecnológicas de los vehículos y la reducción de las distancias. Es posible trabajar también en las características de los flujos de tráfico rodado: velocidad media, tipo de conducción... Además, en algunos casos, se pueden llevar a cabo acciones para reducir el PM resuspendido. Los estándares Euro han establecido una tendencia positiva en la disminución de los niveles de emisión de PM por km. En particular, los filtros de partículas en los escapes de vehículos diésel (FPD)

222 Regione Lombardia, 2013. Piano Regionale degli Interventi per la qualità dell'Aria (PRIA). <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/istituzione/direzioni-general/direzione-generale-ambiente-energia-e-sviluppo-sostenibile/piano-regionale-interventi-qualita-aria-pria>

permitieron alcanzar emisiones de PM muy bajas, comparables a las de los automóviles de gasolina. Sin embargo, se necesitan otras acciones para reducir aún más las emisiones de PM procedentes del desgaste de neumáticos y frenos. Sobre todo, deben reducirse las de NO_x de los motores diesel, teniendo en cuenta que, como ahora se sabe, no se han disminuido realmente como se esperaba sobre la base de los datos declarados en la fase de homologación.

En Lombardía, han sido puestos en práctica varios proyectos para impulsar la renovación del parque circulante. En particular, ha sido implantada una muy amplia Zona de Bajas Emisiones (ZBE) donde la circulación se restringe de octubre a marzo a vehículos de gasolina Euro 0 y vehículos diésel Euro 0, 1 y 2. Esta ZBE ocupa una superficie de 3.000 km^2 , con una población de más de 4,7 millones de habitantes. Toda la zona metropolitana de Milán está incluida en ella. Los ciclomotores con recorrido Euro 0 de dos tiempos no pueden circular en toda la red regional de carreteras durante todo el año. Se ha implementado también un programa para financiar la adaptación de los filtros de partículas en camiones y otros vehículos pesados.

Para disminuir el kilometraje realizado en vehículos privados, se ha reforzado la red del transporte público. En particular, en Lombardía se han construido 37,5 km de metro entre 2005 y 2010, y 67,5 km entrarán en servicio antes de 2020. Asimismo, se está llevando a cabo una mejora del servicio ferroviario que involucra el número de trenes y su frecuencia, además de la construcción de 300 km de nuevas líneas

ferroviarias antes de 2020. Por otro lado, se está reforzando el uso de la bicicleta, construyendo carriles bici y fomentando iniciativas para compartir bicicletas. También se han promovido otras políticas de intercambio modal, como la gestión de la movilidad, el uso compartido del automóvil y el *carsharing*.

Las acciones destinadas a reducir la resuspensión del polvo, como el riego de las carreteras, se han intentado repetidamente, pero hasta ahora no se han conseguido rendimientos importantes en la reducción de los niveles ambientales de PM.

En el centro de Milán se han tomado otras medidas basadas en cargas impositivas a los vehículos; el llamado *Ecopass*, primero, y ahora el "Área C" o "carga por congestión". Se debe pagar un peaje para entrar en el centro de la ciudad, el costo del cual depende la categoría Euro del vehículo en el primer caso, mientras que en el segundo no depende del tipo de automóvil. Este tipo de acciones no permite lograr reducciones significativas de las concentraciones de masa ambiente de PM_{10} , considerando las escalas involucradas, pero disminuyen los componentes más relacionados con las emisiones primarias del tráfico, como el carbono negro (BC).

La introducción del peaje y la disminución de las emisiones asociada al flujo de tráfico en el centro de la ciudad –30% según lo estimado por el municipio de Milán–, ha provocado un aumento significativo en el uso de la bicicleta, como lo demuestra también el incremento de usuarios del servicio de bicicletas compartidas *BikeMe*, con un coste anual de 36 €: de 10.700 en 2009 a alrededor de 54.000 en 2016, con

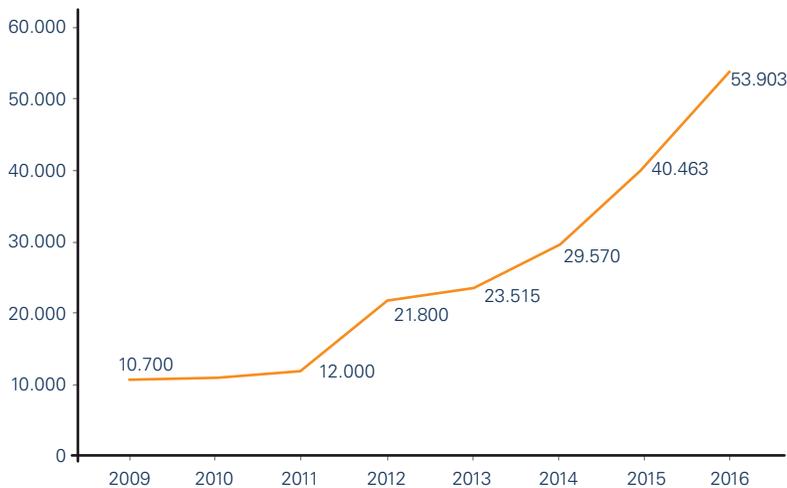


Figura 5

Bicicletas públicas en Milán.
Evolución del número de usuarios.

Fuente: Comune di Milano, 2016

alrededor de 20.000 alquileres diarios²²³ (ver figura 5). Recientemente, se han presentado otras dos compañías privadas que ofrecen bicicletas, no en puntos fijos como para BikeMe, pero con la posibilidad de encontrarlas y dejarlas en todas partes mediante una aplicación. Gracias a la entrada gratuita y al estacionamiento de vehículos en el "Área C"; también los servicios de autos compartidos han aumentado en gran medida sus usuarios, que a finales de 2016 alcanzaban un total de 334.903²²⁴.

Estrategias de mitigación para fuentes estacionarias residenciales

Las estrategias de mitigación para fuentes residenciales estacionarias se han abordado mediante diferentes medidas destinadas al ahorro de energía. Se ha prestado especial atención a limitar las emisiones de la leña en estufas y chimeneas, dado que estas fuentes aparecen en este momento como uno de los problemas más importantes y crecientes para la calidad del aire.

223 Comune di Milano, 2016. Piano Urbano della Mobilità Sostenibile. [http://download.comune.milano.it/13_07_2017/DdP%20Documento%20di%20Piano%20emendato%20\(1499955646081\).pdf?pgpath=/SA_SiteContent/UTILIZZA_SERVIZI/MOBILITA/Pianificazione_mobilita/piano_urbano_mobilita](http://download.comune.milano.it/13_07_2017/DdP%20Documento%20di%20Piano%20emendato%20(1499955646081).pdf?pgpath=/SA_SiteContent/UTILIZZA_SERVIZI/MOBILITA/Pianificazione_mobilita/piano_urbano_mobilita)

224 Osservatorio Nazionale Sharing Mobility, 2016. 1° Rapporto Nazionale sulla mobilità condivisa, http://osservatoriosharingmobility.it/wp-content/uploads/2016/11/Rapporto-Nazionale-SM_DEF_23_11_2016.pdf

Está prohibida la quema en estufas y chimeneas con un rendimiento energético inferior al 63% en toda la llanura del Valle del Po y en todas las áreas metropolitanas de la región desde 2007. Esta prohibición, sin embargo, ha dado resultados limitados. Una mitigación efectiva de esta fuente está necesariamente ligada a un proceso de renovación tecnológica de estufas y chimeneas, con el fin de desarrollar una tecnología compatible con la mejora de la calidad del aire y las políticas que favorezcan la sustitución de las estufas actuales por las de baja emisión.

Estrategias de mitigación para el sector agrícola y ganadero

Estas fuentes de emisión no pueden descuidarse, ya que se ha demostrado que afectan la calidad del aire también en áreas urbanas, dada su contribución al aumento de la carga de PM secundario inorgánico en el aire ambiente de la región. El punto clave es disminuir las emisiones de NH_3 , especialmente relevantes en el Valle del Po, por lo que se han impulsado diferentes acciones. Teniendo en cuenta que es muy difícil de llevar a cabo la reducción de la producción, la estrategia de mitigación se dirige a una gestión integrada de las aguas residuales con la producción de biogás antes y la gestión de la dispersión del estiércol de una manera útil para minimizar la volatilización del amoníaco.

Puede ser útil, en particular, la inyección directa de aguas residuales en el suelo en el momento adecuado, cuando los cultivos realmente lo

necesitan, lo que permite limitar las emisiones tanto de los fertilizantes como de las aguas residuales. Se está llevando a cabo un gran esfuerzo en Lombardía en este tema, a pesar incluso de que no siempre es sencillo obtener un cumplimiento total de las normas por parte de los agricultores.

La quema de biomasa agrícola al aire libre, otra fuente importante de contaminación, está prohibida en Lombardía, con algunas pequeñas excepciones, aunque, también en este caso, el cumplimiento de esta regla es difícil.

Estrategias de mitigación para fuentes industriales

Como es bien sabido, de acuerdo con la legislación europea IPPC, las fuentes industriales están sujetas a un proceso específico de autorización destinado a garantizar la protección del medio ambiente y reducir las emisiones lo más posible. En Lombardía, se deben subrayar tres puntos clave con respecto a este sector. En cuanto a la producción de energía, existen limitaciones para las nuevas instalaciones en las áreas más contaminadas. Más de 165 núcleos industriales, que corresponden al 70%-80% de las emisiones industriales totales, están monitorizados mediante medidores de emisión continua. Todas las centrales térmicas se han convertido en plantas de turbinas de gas, con rendimientos de recuperación de energía más elevados y menos emisiones. Aunque la energía generada ha aumentado, las emisiones de NO_x y SO_2 han disminuido significativamente.

¿Son suficientes las medidas que ya se están aplicando y las que se implementarán a corto plazo?

Teniendo en cuenta que los estándares de calidad del aire de la UE todavía no se cumplen, la región de Lombardía decidió en 2017 revisar su plan de calidad del aire con la actualización de las medidas planteadas y la introducción de otras nuevas. Como la escala territorial es todo el Valle del Po, el proceso se ha compartido con las otras regiones de la cuenca: Emilia Romagna, Piemonte y Veneto. Se firmó un acuerdo en junio de 2017²²⁵. Los temas incluidos están relacionados con los aspectos más críticos para cumplir con los resultados esperados en la disminución de emisiones: vehículos diesel NO_x , quema de leña y emisiones agrícolas.

Para las emisiones diesel, se ha planteado una estrategia de prohibición progresiva de todos los automóviles que no cumplen realmente con los estándares definidos. A partir del 01/10/2018, y entre octubre y marzo, no se admitirán vehículos diésel Euro 3 entre semana en todas las ciudades de Lombardía de más de 30.000 habitantes; a partir del 01/10/2020, la limitación se aplicará también a los vehículos diésel Euro 4, y a partir del 01/10/2025 a los vehículos diesel Euro 5. Durante los episodios de alta contaminación, la circulación de los vehículos

diésel Euro 3 y 4, los vehículos ligeros y los camiones ya está prohibida desde el 01/10/2017. Las posibles limitaciones de los automóviles Euro 6 se realizarán sobre la base de los resultados de las emisiones reales.

Para las estufas de leña, se ha introducido un sistema de clasificación basado en los estándares de emisiones, en el que las estufas de menor emisión tienen un mayor número de estrellas. También en este caso, se han planteado limitaciones progresivas para garantizar al final del proceso sólo la instalación de estufas de alto rendimiento. Durante los episodios de alta contaminación, las limitaciones se refieren no sólo a la instalación de nuevas estufas, sino también al uso de estufas de leña de generaciones anteriores. Asimismo, se han introducido otras normas para garantizar una instalación y un mantenimiento adecuados de las estufas y de calidad de los pellets. Se ha realizado un gran esfuerzo para informar a las personas sobre el uso correcto de este tipo de aparatos, ya que es muy importante evitar la combustión de materiales inadecuados, como desechos o madera tratada, y encender el fuego desde la parte superior. Las normas y limitaciones se han planificado también para limitar las emisiones de NH_3 de la agricultura, si bien todavía se deben definir algunos detalles. En general, se espera que con la adopción de las medidas planteadas previstas para 2025, las emisiones de PM , NO_x y NH_3 se reduzcan el 38%, el 30% y el 23% respecto 2014, respectivamente, en toda la cuenca del

225 Regione Lombardia, 2017. Accordo di bacino padano per il miglioramento della qualità dell'aria. <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/servizi-e-informazioni/cittadini/Tutela-ambientale/Qualita-dell-aria/nuovo-accordo-programma-miglioramento-qualita-aria/nuovo-accordo-programma-miglioramento-qualita-aria>

Po. Si se logra la implementación completa de las acciones planificadas, se espera el cumplimiento de los estándares de la UE, al margen de que existen muchas variables que pueden influir en el proceso y en los resultados esperados. De hecho, la naturaleza secundaria del PM, y la no linealidad de los procesos, aumenta la incertidumbre de los resultados, sobre todo con respecto al momento del éxito.

¿Qué barreras deben superarse para implementar las medidas a medio y largo plazo?

A medida que las concentraciones de los diferentes contaminantes disminuyen, es cada vez más difícil lograr buenos resultados. La mayoría de las soluciones disponibles ya están adoptadas y las restantes pueden ser cada vez más caras en términos económicos o sociales. En todo caso, es necesario continuar mejorando la calidad del aire, cumplir con los estándares de la UE lo antes posible y, en perspectiva, también las directrices de la OMS. Deben tenerse en cuenta no solo los contaminantes ya considerados por las directivas, sino también otros parámetros de calidad del aire potencialmente relevantes para el medio ambiente o la salud como, por ejemplo, los de las partículas ultrafinas (UFP) y BC. Además, es necesario adoptar un enfoque integrado, que considere no solo la calidad del aire sino también los gases de efecto

invernadero, relevantes para la lucha contra el cambio climático. Finalmente, al definir medidas, se deben considerar también todos los componentes ambientales –agua, suelo y alimentos–. Hasta ahora, en las mejoras obtenidas, la innovación tecnológica ha jugado un papel principal, mientras que el cambio en los comportamientos ha sido solo marginal. La tecnología debe ayudar también en el futuro. Desde este punto de vista, en los próximos años, los motores de combustión interna podrían ser sustituidos progresivamente por motores eléctricos, incluso si las diferentes soluciones son posibles. El impacto de las nuevas tecnologías debe evaluarse en todo el ciclo de vida. También el progreso en la tecnología de conducción autónoma podría llevar hacia un estilo de conducción regular, suave y menos agresivo. Asimismo, podría ayudar la identificación de los vehículos con mejores resultados en términos de emisiones reales y la reducción progresiva de los que tienen resultados peores.

El gran desarrollo de aplicaciones “inteligentes” que no estaban disponibles hasta hace sólo unos pocos años, también permite el desarrollo de servicios de intercambio de automóviles y bicicletas, que ya se ofrecen en algunas ciudades. La tecnología también puede ayudar en lo que se refiere a las emisiones del desgaste de frenos y neumáticos.

Para la combustión de madera, la tecnología ya ofrece dispositivos más eficientes en términos de emisiones que los electrodomésticos antiguos. Sin embargo, es necesario que el desarrollo de la tecnología de las estufas de leña y las chimeneas continúe para alcanzar unos niveles de emisión al menos comparables con

los del aceite ligero. La vía para disminuir el impacto de esta fuente debe seguir la estrategia planteada para los vehículos, con estándares cada vez más ambiciosos desde el punto de vista ambiental.

La tecnología puede ofrecer soluciones importantes, pero es necesario actuar también en el comportamiento de las personas. Sin duda es más difícil que introducir nuevas normas, límites o tecnologías, pero suele aportar resultados excelentes en lo que se refiere a calidad del aire, consumo de energía y calidad de vida.

La disponibilidad del transporte público es el requisito básico para convencer a las personas de que reduzcan el uso de sus automóviles privados. Para aumentar el uso de bicicletas, es fundamental ofrecer rutas seguras para las bicicletas, pero también lugares o sistemas donde estacionarlas de manera segura. El uso compartido de bicicletas también es una solución.

Otra forma efectiva para reducir las emisiones de contaminantes primarios está relacionada, además, con el desarrollo de las áreas peatonales. En Milán se han implementado diferentes experiencias con buenos resultados. Aunque las áreas peatonales pueden contribuir sólo marginalmente en la escala urbana considerada como un todo, sí pueden mejorar la calidad del aire a nivel local, reduciendo potencialmente el uso de vehículos privados e incrementando la calidad de vida de la ciudad. Por otro lado, es importante planificar adecuadamente el desarrollo de la estructura urbana. Los problemas están relacionados con la dispersión de los distintos usos y actividades sobre el territorio, ya que dificulta

la implementación de transporte público en el último tramo, y para organizar correctamente la distribución de las mercancías. El gran número de vehículos pesados en las carreteras es otro problema relacionado. Teniendo en cuenta el tipo de urbanización y las características productivas de Lombardía y del área de Milán, es difícil en este frente obtener resultados no relacionados con las mejoras tecnológicas. Para las acciones a corto plazo, pero también a medio y largo plazo, es clave contar con el apoyo de la opinión pública, imprescindible para adoptar medidas que requieran costos personales o para ciertos sectores de la sociedad. Desde este punto de vista, es necesario cambiar la idea de que “la madera es buena” porque se ha utilizado desde la antigüedad, y que la “agricultura es natural” por sí misma, ya que los usos intensivos actuales son similares a una actividad industrial convencional.

La agricultura y la industria deberían ser analizadas no sólo por su impacto en la calidad del aire regional, sino también por los posibles impactos más cercanos a las fuentes, con el fin de proteger la salud sin olvidar otros aspectos como los olores, que incluso cuando no es relevante desde un punto de vista sanitario, puede causar molestias en las personas. En las últimas décadas, los planes relacionados con el cambio climático han planteado medidas específicas. Si bien muchas de ellas plantean sinergias con las de la calidad del aire, otras pueden tener reacciones negativas, por lo que debe tenerse en cuenta esta cuestión y evaluar cuidadosamente las acciones que son útiles solo para un aspecto, como el apoyo de algunos tipos de energías renovables, por ejemplo.



Ingeniero químico y doctor en ciencias de la atmósfera por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estancia posdoctoral en el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente. Miembro del Grupo de Aerosoles Atmosféricos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. Las áreas de investigación son las mediciones de carbono negro ambiental, la composición química de partículas atmosféricas y ciclos biogeoquímicos.

Oscar Peralta

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

**María de la Luz Espinosa,
Telma Castro, María Isabel Saavedra**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

Caso 5. La experiencia de México

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo se comporta la contaminación del aire en Ciudad de México?
- ¿Cuáles son las tendencias históricas de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?
- ¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?
- ¿Qué acciones se impulsan para mejorar la calidad del aire?

Apunte inicial

La Ciudad de México tiene más de 8 millones de habitantes y la zona metropolitana que la rodea más de 15 millones. En su totalidad, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) tiene en conjunto alrededor de 23 millones de habitantes. El acelerado crecimiento de la población, el incremento en las emisiones de actividades vinculadas a la industria y al transporte, la meteorología y la topografía locales, así como los hábitos de consumo y la baja calidad de los combustibles, han provocado un deterioro gradual en la calidad del aire de la región. Por todo ello, y para establecer políticas para mejorar las condiciones atmosféricas de la metrópoli, es básico entender la dinámica atmosférica que gobierna la calidad del aire, así como la emisión y generación de contaminantes y su evolución temporal²²⁶.

¿Cómo se comporta la contaminación del aire en Ciudad de México?

Algunos contaminantes atmosféricos, además de deteriorar la calidad del aire al modificar la composición química de la atmósfera, también son forzantes radiactivos que promueven variaciones anormales en el clima²²⁷, absorben, reflejan o dispersan radiación solar y alteran la meteorología regional²²⁸.

Desde los años 1980 la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA) opera varias redes de monitoreo, como la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red Meteorológica (REDMET), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). Juntas integran el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México, el cual vigila, evalúa e informa permanentemente a la población la calidad del aire. Ello permite tomar acciones para proteger la salud de la población y apoyar la toma de decisiones de prevención y control de la contaminación. El SIMAT es el sistema de monitoreo más grande del país, integrado por 45 estaciones de monitoreo, 34 destinadas a medir ozono

226 NARSTO, 2004. Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment, Edited by McMurry M., Shephard M., Vickery J. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, England. ISBN 0 52 184287 5. PP. 542 pp

227 Crutzen P.J., Ramanathan V., 2003. The parasol effect on climate. *Science* 302, 1679–1681.

Hidy G.M., Brook J.R., Demerjian K.L. et al., (Eds.), 2011. Technical challenges of multipollutant air quality management. Springer Pub. Dordrecht, Germany. ISBN 978-94-007-0304-9, 540 pp.

228 Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science* 294, 2119-2124.

(O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y material particulado en suspensión (PM₁₀ y PM_{2,5}). Este sistema genera una base de datos que contiene las concentraciones de gases y partículas, en promedios horarios, diarios, mensuales y anuales²²⁹.

De acuerdo con los informes generados por la SEDEMA²³⁰, y como en otras ciudades, la contaminación del aire no se comporta de manera uniforme, sino que presenta ciclos asociados con las estaciones del año y otros factores de corto y mediano plazo, como la hora del día, la intensidad del tránsito vehicular, la actividad industrial, las actividades de construcción y demolición, la presencia de manifestaciones públicas, la lluvia y el viento. Además, a medio plazo se ha de tener en cuenta el efecto del crecimiento de los centros urbanos, los cambios en los patrones de tránsito y las modificaciones en los combustibles, entre otros.

Los meses más fríos (diciembre a febrero) registran las mayores concentraciones de contaminantes, mientras que en los más lluviosos (mayo a octubre) se registran sus concentraciones mínimas. La nubosidad disminuye la intensidad de los procesos fotoquímicos y el agua lava varios contaminantes de la atmósfera. Durante los meses de abril y mayo (temporada cálida

seca) los sistemas de alta presión con vientos suaves propician inversiones térmicas por las noches que persisten, sobre la cuenca atmosférica y la ciudad, hasta la salida del sol. En la mañana siguiente hay una fuerte actividad fotoquímica antes de que la capa baja de la atmósfera se mezcle por turbulencia. Es en este período cuando se registran las concentraciones más altas de O₃ y PM_{2,5}.

¿Cuáles son las tendencias históricas de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?

En este contexto, el análisis de las tendencias anuales permite apreciar un deterioro de calidad del aire en los años 1980 mientras que actualmente se observa una disminución gradual de la concentración media de varios contaminantes. Esta tendencia constituye sin duda el mejor indicador disponible para evaluar si una ciudad se aproxima o se aleja de lo que puede considerarse una vía hacia la sustentabilidad en materia de calidad del aire.

229 <http://www.aire.df.gob.mx/estadisticasconsultas/concentraciones/index.php>

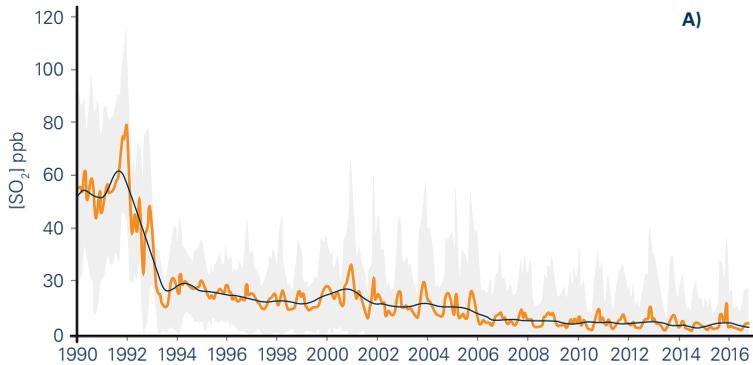
230 Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2011. Calidad del aire en la Ciudad de México, 25 años de monitoreo atmosférico 1986-2011. Ciudad de México, 2012.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2011/#p=1
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Noviembre, 2017.
http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2016v1/mobile/index.html#p=11

El SO_2 se emite junto con otros compuestos durante la quema de combustibles derivados del petróleo, como gasolina, diésel, gasóleo o gas licuado de petróleo (GLP). Es un contaminante que ha mantenido una tendencia de concentración promedio descendente de 1990 a 2016, con una reducción de 92% (ver figura 1a), y desde 2006 su concentración es inferior al valor límite de la Norma Oficial Mexicana (NOM-022-SSA1-2010). Esto se ha logrado gracias a la reducción del contenido de azufre (S) en los combustibles empleados en la zona metropolitana. El contenido actual de S en diésel es 11 ppm (partes por millón) y en la gasolina es 16 ppm.

El CO se emite durante la combustión parcial de hidrocarburos y materiales orgánicos. La concentración de CO en el aire ambiente varía según la cercanía a la fuente, la distribución y el flujo de tráfico de las vías primarias y secundarias que cruzan la zona metropolitana. La concentración media anual de este contaminante entre 1990 y 2016, el cual se redujo en 89% (ver figura 1b). Las acciones de las autoridades para evitar las emisiones de este contaminante han presentado buenos resultados. Las más relevantes han sido el uso del convertidor catalítico, el programa de verificación vehicular y la renovación de la flota de vehículos por otros con motores más eficientes. Desde el año 2001 la concentración máxima de este contaminante no ha superado el valor límite de la NOM-021-SSA1-1993, que es 11 ppm para el promedio octohorario. En 2016, la concentración

máxima reportada para el promedio móvil de 8 horas fue de 7,0 ppm.

Los vehículos automotores y la generación de electricidad emiten grandes cantidades de óxidos de nitrógeno (NO_x). Por ejemplo, ésta última aporta alrededor de 60% del total de emisiones de la zona metropolitana. La distribución espacial de las concentraciones de NO_x ambientales se ven muy afectadas por la proximidad a las fuentes de emisión, con la mayor parte de las emisiones de CO y NO_x teniendo fuentes comunes. Sin embargo, los sistemas de control de emisiones de los vehículos y la industria no son tan eficientes para reducir emisiones de NO_x como lo son en el caso del CO, por lo que las emisiones de NO_x no han disminuido en una proporción similar (ver figura 1c), ya que la reducción entre 1990 y 2016 fue de sólo 43%. La norma ambiental para NO_2 establece una concentración máxima de 210 ppb (partes por billón, próximos a $410 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como valor horario, y las concentraciones de NO_2 no suelen rebasar el límite de concentración ambiental; sin embargo, este compuesto es un precursor de O_3 por lo que su acumulación en la atmósfera presenta un riesgo adicional. El O_3 es un contaminante de origen secundario que se forma en la atmósfera por reacciones químicas entre el NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de radiación solar. Estos precursores provienen de emisiones de vehículos, industrias y otras fuentes que generalmente se vinculan con zonas de alta densidad urbana, industrial o comercial. Generalmente estos precursores

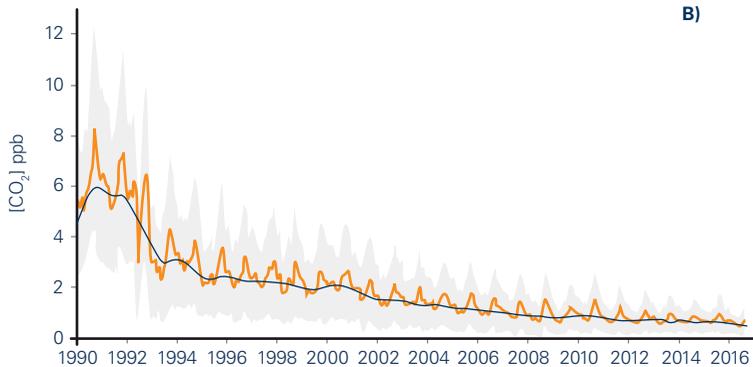


A)

Figura 1

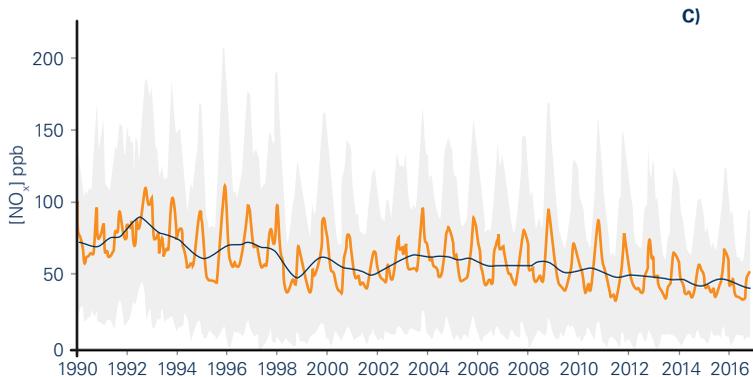
Series temporales de la concentración promedio mensual de SO₂ A), CO B), NO_x C) para el período de enero de 1990 a diciembre de 2016.

La línea naranja corresponde al promedio mensual, la región marcada de color gris indica la desviación estándar, y la línea azul la tendencia obtenida mediante medias móviles.



B)

Fuente: Informe 2016, SEDEMA.



C)

son transportados por el aire durante varios kilómetros²³¹ dando lugar a impactos en la calidad del aire por altas concentraciones de O₃ a cierta distancia de la ciudad. En las regiones más urbanizadas la formación de O₃ depende en mayor medida de los COVs (dado que hay casi siempre exceso de NO_x), mientras que en las regiones más rurales depende en una proporción similar de NO_x y COVs²³². Las altas concentraciones de O₃ en la atmósfera baja son una causa importante de problemas respiratorios cuando hay exposiciones por periodos prolongados. La figura 2a muestra la tendencia de la concentración promedio mensual de O₃ para el periodo de 1990 a 2016, en ella se puede observar una disminución gradual que alcanza un 30% en el periodo considerado; sin embargo, es importante recalcar que a partir de 2006 la tendencia decreciente tiene una tasa de decrecimiento muy baja, y desde 2015 el promedio mensual de la concentración ambiental es constante. Los valores límite de las NOM para O₃ a partir de 2015 es 70 ppb máximo anual promedio de las concentraciones móviles octohorarias, y 95 ppb promedio horario. Para 2017 el valor máximo registrado para el promedio móvil octohorario fue de 140 ppb. Una gran variedad de actividades generan material particulado (PM) primario que se

suma al PM secundario, este último creado por procesos atmosféricos a partir de gases precursores. Las fuentes más comunes de PM₁₀ (PM inferior a 10 µm de diámetro) primario, son la resuspensión del polvo del suelo y las emisiones vehiculares (70%), el restante 30% es PM secundario (inversamente a como suele ocurrir en ciudades europeas, ver capítulos anteriores sobre planes y medidas de mejora de calidad del aire). Entre 1990 y 2015 el promedio anual de la concentración de PM₁₀ disminuyó 65% debido a programas de reforestación de zonas sin cobertura vegetal, pavimentación de calles y avenidas. Lo que conduce a la disminución de la resuspensión de PM, y por tanto a reducir significativamente la concentración ambiental de este contaminante. No obstante, en los datos disponibles de 2016 se observa un ligero repunte (ver figura 2b). De acuerdo con la NOM 025- SSA1-2014 para PM₁₀, sus valores límite son un promedio máximo permisible en 24 h inferior a 75 µg/m³ y otro anual inferior a 40 µg/m³. Desde el año 2016 el número de días y estaciones donde no se cumple la norma ha aumentado. El valor para el promedio anual en 2016 fue 61 µg/m³ y el valor máximo para el promedio de 24 horas fue 123 µg/m³. Las emisiones de los motores de los vehículos y la quema de biomasa generan PM_{2.5} primario,

231 Li G., Lei W., Zavala M., G. Li^{1,2}, W. Lei¹, M. Zavala¹, R. Volkamer^{3,4}, S. Dusanter⁵, P. Stevens⁵, and L. T. Molina^{1,2} 2010. Impacts of HONO sources on the photochemistry in Mexico City during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 6551-6567. Velasco E., Lamb b., Westberg h., E. Velasco^{1*}, B. Lamb¹, H. Westberg¹, E. Allwine¹, G. Sosa², J. L. Arriaga-Colina², B. T. Jobson^{3,**}, M. L. Alexander³, P. Prazeller³, W. B. Knighton⁴, T. M. Rogers⁴, M. Grutter⁵, S. C. Herndon⁶, C. E. Kolb⁶, M. Zavala⁷, B. de Foy^{7*}, R. Volkamer⁸, L. T. Molina^{7*}, and M. J. Molina⁸, 2007. Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 & 2003 field campaigns. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 329-353.

232 Molina L.T., Madronich S., Gaffney J.S., L. T. Molina¹, S. Madronich², J. S. Gaffney³, E. Apel², B. de Foy⁴, J. Fast⁵, R. Ferrare⁶, S. Herndon⁷, J. L. Jimenez⁸, B. Lamb⁹, A. R. Osornio-Vargas¹⁰, P. Russell¹¹, J. J. Schauer¹², P. S. Stevens¹³, R. Volkamer⁸, and M. Zavala¹, 2010. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 18, 8697-8760.

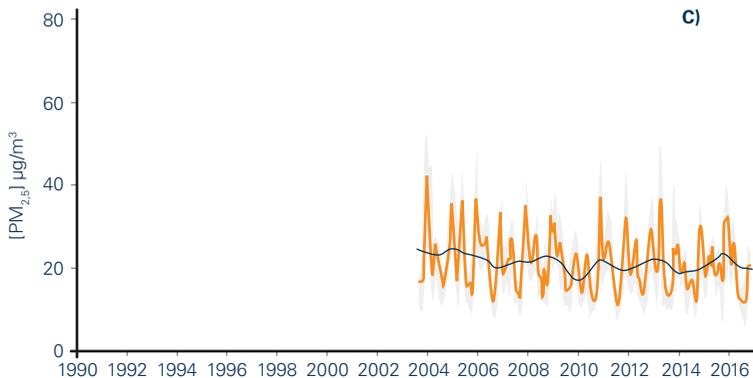
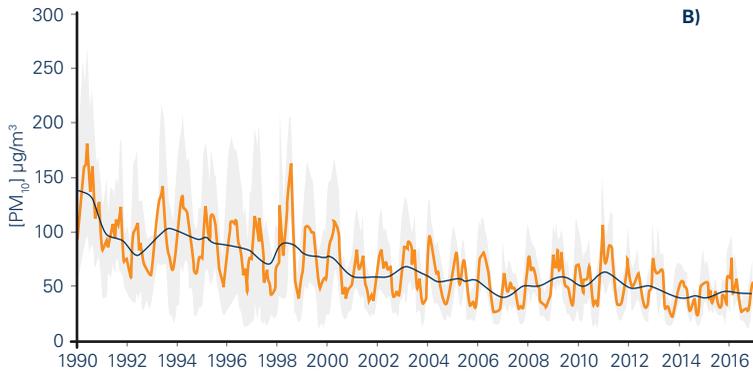
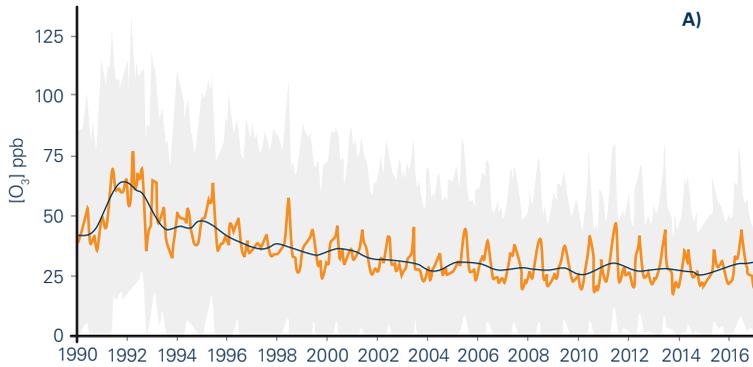


Figura 2

Series de tiempo de la concentración promedio mensual de O_3 A), PM_{10} B), $PM_{2.5}$ C) para el período de enero de 1990 a diciembre de 2016.

La línea amarilla corresponde al promedio mensual, la región marcada de color gris indica la desviación estándar, y la línea azul la tendencia obtenida mediante medias móviles.

Fuente: Informe 2016, SEDEMA.

que incluye al carbono negro (BC), el cual representa entre 10 y 15% de la masa de $PM_{2.5}$. Por otra parte, más de la mitad del $PM_{2.5}$ es secundario y se origina por procesos químicos en la atmósfera e involucra precursores gaseosos (NO_x , SO_2 , NH_3 , COVs). El $PM_{2.5}$ se empezó a medir de manera rutinaria desde el año 2004 (ver figura 2c). El promedio anual de $PM_{2.5}$ se ha mantenido relativamente estable desde entonces; no obstante, entre 2004 y 2015 se redujo solamente 9%. La formación de $PM_{2.5}$ en la atmósfera es compleja y ello dificulta su reducción y control. Con la actualización de la NOM-025-SSA1-2014 se modificaron los valores límite de $PM_{2.5}$, con límites promedio de 24 h y anual 45 y 12 $\mu g/m^3$, respectivamente. En 2016, las concentraciones máximas registradas para los promedios de 24 h y anual fueron de 96 y 24 $\mu g/m^3$, respectivamente; así pues en ambos casos se superaron los valores límite de la norma oficial.

¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México?

De acuerdo con las mediciones de la RAMA, los contaminantes de mayor preocupación en la ZMVM son O_3 , PM_{10} y $PM_{2.5}$, por registrar concentraciones superiores a las establecidas por las normas nacionales de salud. En términos del índice de calidad del aire, en el año 2011 se reportaron 246 días con calidad del aire mala

por O_3 , PM_{10} o $PM_{2.5}$. Así, en 2011 sólo 124 días registraron una calidad del aire favorable que equivale a 34% de los días del año. Mucho del PM_{10} y $PM_{2.5}$ urbanos son el resultado de quema de combustibles y biomasa (quemadas agrícolas y de bosques fuera de la ciudad que contribuyen significativamente a aumentar su concentración en la atmósfera) y contienen, entre otras cosas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) que son muy tóxicos.

En el caso particular del O_3 se han establecido límites cada vez más estrictos para decretar contingencia ambiental y aplicar acciones para proteger a la población de la exposición a altas concentraciones ambientales. El Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) ha modificado los niveles de activación para declarar las distintas fases que consisten en detener actividades que potencialmente puede producir precursores de O_3 . En 1990 las contingencias se decretaban a partir de 294 ppb y en 1998 en 416 ppb. Después los valores se ajustaron a 283 ppb. En ese año se agregó una Precontingencia de 234 ppb, con la finalidad de que los sectores involucrados en la generación de contaminantes disminuyeran sus emisiones y evitar así la activación de la contingencia. A partir de 2006 el umbral ha bajado, en 2012 se fijó en 205 ppb y en 2016 en 155 ppb (ver figura 3). En 1986 se estableció el Programa "Hoy No Circula" (PHNC) con el objetivo de limitar el uso del automóvil y ejercer control sobre la contaminación generada por vehículos para reducir su impacto ambiental. Sin embargo, a la fecha no existen evidencias de que la medida sea eficiente para reducir la formación de O_3 en la ZMVM. El PHNC no contempla el control de emisiones de otras fuentes como motocicletas, ni fugas y

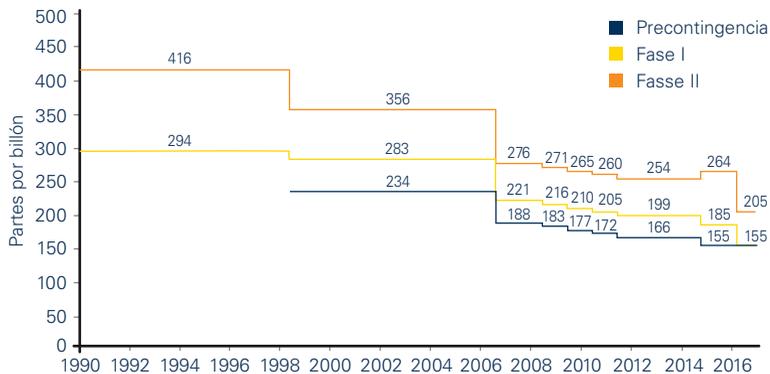


Figura 3

Series temporales de las modificaciones a los valores de activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas para O₃. Los valores que aparecen sobre cada línea indican la concentración en ppb.

Fuente: Informe 2016, SEDEMA.

combustión ineficiente de GLP (que pueden emitir altos niveles de COVs), ni emisiones fugitivas de vapores de gasolina, ni tampoco abarca todos los municipios de la ZMVM.

Además, los efectos que tienen tanto el crecimiento de la ciudad como la distribución espacial de áreas urbanas, como son la ubicación de las viviendas y de los trabajos de la población, tienen una relación directa con los traslados diarios de la gente desde su vivienda hacia su trabajo y viceversa, lo que tiene un efecto directo sobre las emisiones de los contaminantes. En particular, el crecimiento de la periferia de la ciudad ha dado lugar a zonas de alta densidad poblacional lo que obliga a viajes más largos en medios de transporte “viejos”, además de promover el uso del automóvil particular generando mayores tiempos y distancias de traslado, así como más congestionamientos causando todo esto, más emisiones.

¿Qué acciones se impulsan para mejorar la calidad del aire?

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la exposición a los contaminantes atmosféricos está en gran medida fuera del control, y requiere medidas urgentes de las autoridades de gobierno a nivel local, nacional e internacional. Las Guías de la Calidad del Aire de la OMS constituyen un análisis consensuado y actualizado sobre los efectos de la contaminación en la salud que recomienda los parámetros de calidad del aire para reducir de modo significativo los riesgos a la salud²³³. Derivado de esto, las autoridades nacionales mexicanas elaboran las NNOM por conducto de la Secretaría de

233 OMS, 2016. WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database (update 2016). http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/

Salud, las cuales fijan los valores máximos permisibles para aquellos contaminantes que representan un riesgo comprobado en la salud humana. Los límites se establecen utilizando como referencia a los grupos más sensibles de la población, como niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares.

Para evaluar el cumplimiento de las NOM es necesario contar con herramientas de medición y monitoreo –sistema de monitoreo atmosférico, inventarios de emisiones, índices de calidad del aire, entre otros- que permitan implementar acciones para mejorar el aire que respiramos y que se integran a la Gestión para Mejorar la Calidad del Aire²³⁴. Como se ha expuesto en apartados anteriores, la calidad del aire en la región de la ZMVM ha mejorado en la últimas dos décadas gracias a las medidas que se han tomado; sin embargo, aún es necesario que los diferentes actores dialoguen y actúen en consecuencia para que las medidas tengan éxito a corto y mediano plazo. Un obstáculo importante para aplicar nuevas políticas públicas en la materia es la corrupción que existe en algunas estaciones de inspección técnica de vehículos, donde se realiza la medición de emisiones de los vehículos automotores que circulan en la ZMVM.

Además, es prioritario tomar acciones para mejorar la de calidad del aire en toda la ZMVM y que después puedan hacerse extensivas a otras ciudades del país, las cuales desafortunadamente tienen un desarrollo no planificado y presentan problemas similares o incluso más agudos que los de Ciudad de México y su área metropolitana.

Al respecto grupos de investigación en contaminación ambiental se han planteado propuestas de movilidad, tecnológicas y de gestión para implementarse a corto, mediano y largo plazo y así reforzar las medidas actuales de mejora en la calidad del aire. Algunas de ellas se presentan en la figura 4.

Así pues las soluciones a los problemas de calidad del aire de la Ciudad de México y su zona metropolitana probablemente se encuentran en ella misma, pero su aplicación requiere replantear el ordenamiento territorial y buscar un desarrollo urbano que minimice los daños en la salud de los habitantes y en los ecosistemas. La ZMVM se debe configurar en una urbe inteligente y baja en emisiones para lograr también un ahorro neto en su consumo de energía, con sistemas de generación de energía renovable y así contribuir a la lucha contra la contaminación atmosférica y el calentamiento del planeta²³⁵.

234 Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2011-2020. <http://respiramexico.org.mx/wp-content/uploads/2015/07/proaire2011-2020.pdf>
Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2016. Inventario de Emisiones de la Ciudad de México, 2014. Contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx2014-2/E-CDMX-2014.pdf>

235 CONAMA, 2012. Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid, España. <http://www.conama2012.conama.org/web/es/presentacion.html>
<http://www.conama2012.conama.org/web/es/encuentro-iberoamericano/presentacion.html>

Figura 4

Propuestas de medidas a corto, mediano y largo plazo, sobre movilidad, tecnológicas y de gestión para reforzar las medidas actuales de mejora en la calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México.

PROPUESTAS		
PLAZO	TIPO	ACCIONES
Inmediato	Gestión	Revisar los criterios de activación de las contingencias ambientales considerando la exportación de contaminantes, la hora del día, el día de la semana, las condiciones y pronóstico meteorológico, la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, etc.
Corto	Gestión	Revisar los niveles de concentración de contaminantes para la activación de contingencias de acuerdo con las condiciones actuales del centro de México y tomar en cuenta cambios en la infraestructura y desarrollo tecnológico. Considerar la incorporación de una fase de Precontingencia haciendo uso de los pronósticos meteorológico y de calidad del aire, como medida preventiva a la activación de la contingencia. Incluir en la aplicación de todos los programas de control de emisiones en la ZMVM a todos los municipios conurbados del Estado de México, ya que están sujetos a una continua y desordenada expansión urbana y periurbana que los ha despojados de su carácter rural.
	Movilidad	Promover un uso eficiente de las vías y medios de comunicación con las que actualmente cuenta el centro de México, mediante una mejor señalización, organización de paraderos de autobuses, microbuses, taxis, apoyo de la policía de tránsito en horas y zonas de congestión y sincronización de semáforos.
Mediano	Gestión	Actualizar las normas para inducir una renovación continua de la flota vehicular, apoyada en la eficiencia energética y en nuevas tecnologías más limpias. Fortalecer leyes y normas para incluir conceptos como carga crítica, ciclo de vida y huella de carbono en manifestaciones de impacto ambiental y solicitudes de cambio de uso del suelo para desarrollos habitacionales y grandes centros comerciales.
		Fortalecer la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) con mecanismos de consulta obligada al Consejo Científico Asesor y a la comunidad científica cuando fuere necesario. Implementar un programa de renovación de cilindros y tanques estacionarios de gas GLP, con el objeto de reducir fugas al ambiente.
	Tecnológica	Implementar el pronóstico meteorológico orientado al transporte y dispersión de contaminantes para apoyar la toma de decisiones.

PROPUESTAS		
PLAZO	TIPO	ACCIONES
Largo	Gestión	Crear regulaciones que fomenten la renovación y modernización tecnológica de la flota vehicular y que abarquen otros sistemas de transporte motorizado.
		Retomar las recomendaciones aplicables del PROAIRE 2011-2020 (http://www.sedema.df.gob.mx/flippingbook/proaire2011-2020/#p=203) que sean acordes con lo que hay que realizar en cuanto a control de la contaminación a corto, mediano y largo plazos.
		En la próxima Constitución de la Ciudad de México, evitar la fragmentación de los mecanismos de ordenamiento territorial, gestión y vigilancia ambiental, asegurando la colaboración obligada entre los gobiernos estatales y municipales e introduciendo mecanismos de observación ciudadana.
	Tecnológica	Implementar un plan de eficiencia energética para mejorar la quema de gas, evitar fugas y usar calentadores de agua solares.
		Implementar controles en las emisiones de motocicletas.
		Los generadores de electricidad y la maquinaria de construcción y agrícola deben ser más eficientes en la quema de combustibles para reducir emisiones. El desarrollo de un laboratorio de emisiones donde se puedan evaluar los vehículos y otros sistemas de combustión. Entre sus líneas de investigación a mediano y largo plazo pueden considerarse la reactividad de combustibles, gasolinas y biocombustibles en el aire.
Movilidad	Aplicar medidas de planeación metropolitana para restringir la expansión urbana en suelo agrícola y de conservación y regular el uso de suelo mixto en áreas de densidad media y alta.	
	Diseñar un programa integral que promueva la reducción de emisiones y el ahorro de energía en el transporte, fortaleciendo el transporte público de calidad y seguro La densificación de áreas urbanas existentes alrededor de nodos de transporte masivo y semimasivo conlleva a una mejor movilidad y accesibilidad. Promover la creación de una red de transporte público metropolitano que expanda e integre las redes de BRT existentes (Metrobús y Mexibús) y que se amplíe la red del Metro.	

Fuente: Centro de Ciencias de la Atmósfera e Instituto de Geografía, 2016²³⁶.



Ingeniero especializado en emisiones, energía y combustibles vehiculares, análisis de tecnologías emergentes en el sector transporte, evaluación y proyección de cambio climático, investigación de carácter experimental como de modelación y simulación computacional.

Dr. Mauricio Osses Alvarado

Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Caso 6. La experiencia de Santiago de Chile

Preguntas clave del artículo

- ¿Cómo ha evolucionado la calidad del aire en Santiago de Chile?
- ¿Ha influido el uso de gas natural en la mejora de la calidad del aire?
- ¿Cuál es el origen de las emisiones contaminantes?
- ¿Qué impacto tendría la introducción a gran escala del gas natural?

Apunte inicial

Santiago, la capital de Chile, se ubica en un valle cuyas características geográficas dificultan la circulación de vientos, ya que corresponde a una cuenca rodeada por un cordón de cerros. La renovación del aire al interior de la cuenca está limitada; en épocas de estabilidad atmosférica provocada por inversión térmica, los contaminantes quedan atrapados, dando origen a un aumento repentino en los niveles de contaminación²³⁷.

¿Cómo ha evolucionado la calidad del aire en Santiago de Chile?

Desde que existen registros oficiales de calidad de aire, provenientes de estaciones de monitoreo, se registran altos índices de contaminación en Santiago. Durante la década de los 90 las causas se atribuían principalmente al uso de leña para calefacción, emisiones asociadas al transporte público y privado, así como a la actividad industrial en la Región Metropolitana y sus alrededores, que principalmente quemaba petróleo, diésel y carbón²³⁸ (ver figura 1).

Si bien en el año 1978 ya se habían establecido normas primarias de calidad del aire para partículas totales en suspensión (TSP) y otros contaminantes²³⁹, recién en el año 1992, bajo la vigencia del Decreto Supremo 185/92 del

237 Muñoz, R. and Alcañal, R. I.: Variability of urban aerosols over Santiago, Chile: Comparison of surface PM10 concentrations and remote sensing with ceilometer and lidar, *Aerosol and air quality research*, 12, 8-19, 2012.

Garreaud, R. D. and Rutllant, J.: Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Numerical Simulation of a Typical Case, *Monthly Weather Review*, 131, 891–908, 35 doi:10.1175/1520-0493(2003)131<0891:CLATSW>2.0.CO;2, 2003.

238 Villalobos, A., Barraza, F., Jorquera, H., and Schauer, J.: Chemical speciation and source apportionment of fine particulate matter in Santiago, Chile, 2013, *Science of the Total Environment*, 512-513, 133–142, doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.006, 2015.

Gramsch, E., Cereceda-Balic, F., Oyola, P., and von Baer, D.: Examination of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM10 and Ozone data, *Atmospheric Environment*, 40, 5464–5475, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.03.062, 2006.

Gramsch, E., Caceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vasquez, Y., Rubio, M., and Sanchez, G.: Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM2.5 and black carbon concentration, *Atmospheric Environment*, 98, 290 – 298, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.08.066, 2014.

Gallardo, L., Olivares, G., Langner, J., and Aarhus, B.: Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile, *Atmospheric Environment*, 36, 3829 – 3841, doi:10.1016/S1352-2310(02)00285-6, 2002.

Saide, P. E., Carmichael, G. R., Spak, S. N., Gallardo, L., Osses, A. E., Mena-Carrasco, M. A., and Pagowski, M.: Forecasting urban PM10 and PM2.5 pollution episodes in very stable nocturnal conditions and complex terrain using WRF–Chem CO tracer model, *Atmospheric Environment*, 45, 2769–2780, 2011.

239 Norma primaria para partículas totales en suspensión (PTS), Dióxido de Azufre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O₃) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Resolución 1215/78 del Ministerio de Salud.

Figura 1

Comparación de parámetros de actividad en la Región Metropolitana de Santiago de Chile.

TIPO DE ACTIVIDAD	1994	2004	2014
Número de buses transporte público	14.000 15 años promedio	7.500 10 años promedio	6.500
Calidad diésel uso vehicular	5.000 ppm azufre	50 ppm azufre	15 ppm azufre
Calidad gasolina uso vehicular	Todas con plomo	Todas sin plomo	Todas sin plomo
Tecnología vehículos particulares	100% convencionales	25% convencionales 75% catalíticos	3% convencionales 97% catalíticos
Combustibles industriales	Leña, carbón y petróleos pesados	Gas natural y diésel 50 ppm azufre	Gas natural y diésel 50 ppm azufre
Combustibles generación eléctrica	Carbón	Gas natural	Gas natural

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAMA Metropolitana, INE, ENAP y Decreto 60/2013 del Ministerio de Energía.

Ministerio de Minería²⁴⁰, se publicó la norma primaria para material particulado inferior a 10 micrómetros o inhalable (PM₁₀). En 1990, con la creación de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, se aborda de manera integrada la implementación de políticas públicas en torno a la contaminación ambiental en Santiago y sus alrededores. A principios de los años 90 se aplicaron medidas paliativas como el control en la quema agrícola, retiro de 3000 buses de transporte público, entrada de vehículos

catalíticos, prohibición de quema de leña en chimeneas y reducción del azufre en el diésel²⁴¹. En 1992 se promulgó el Decreto Supremo 4, del Ministerio de Salud, el cual establecía la norma de emisión de material particulado para fuentes estacionarias puntuales y grupales, que significó un aporte significativo a la mejora de la calidad del aire de la Región Metropolitana, según registraba el sistema de monitoreo. En el año 1996, dicha región fue declarada zona saturada por ozono (O₃), PM₁₀, TSP y monóxido de carbono (CO), y zona latente por

240 Decreto Supremo 185, reglamenta funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el territorio de la República.

241 Informe del Estado del Medio Ambiente, Ministerio de Medio Ambiente, 2011.

Figura 2

Impactos en salud debido a problemas de calidad del aire en Chile (impacto económico en miles de millones de US\$).

Tipo de Efecto	Causa	N° de eventos	Impacto económico		
			Costos Médicos	Productividad perdida	Total
Mortalidad prematura	Cardiopulmonar	4.070	0	590	590
Admisiones hospitalarias	Asma	130	0,13	0,011	0,14
	Cardiovasculares	1.350	2,8	0,27	3,1
	Pulmonar crónica	179	0,23	0,032	0,26
	Neumonía	700	0,97	0,15	1,1
Visitas sala Urgencia	Bronquitis aguda	127.000	4,8	1,6	6,5
Restricción de actividad	Días laborables perdidos	871.000	0	29	29
	Días con actividad registrada	3.730.000	0	37	37
		Total	9	660	670

Fuente: MMA, 2013.

dióxido de nitrógeno (NO₂). Esta declaración se genera bajo el nuevo contexto legislativo que amparó la Ley de Bases del Medio Ambiente (Ley 19.300), promulgada en 1994, y sobre la base de los datos recopilados entre los años 1993 y 1995 respecto del cumplimiento de las normas vigentes. Posteriormente, en 1998, bajo el Decreto Supremo 16/98 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, se aprueba el Plan de Prevención y Descontaminación Ambiental para la Región Metropolitana. Más recientemente, en 2011, se promulga el Decreto Supremo 12 del Ministerio de Medio

Ambiente, que establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino o respirable (o inferior a 2,5 micrómetros, PM_{2,5}). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica en 2004 era responsable de al menos 4.000 muertes prematuras a nivel nacional. De acuerdo al Ministerio de Medio Ambiente, esto equivaldría a 1.900 millones de dólares si se considera el perjuicio en bienestar social que representa un aumento en el riesgo de muerte como consecuencia del deterioro de la calidad del aire (ver figura 2).

¿Ha influido el uso de gas natural en la mejora de la calidad del aire?

Al amparo del Protocolo de Integración Gasífera suscrito por los Estados de Chile y Argentina en 1995, se construye la infraestructura para importar gas natural desde Argentina. Hacia fines de esa década, el gas se convierte en un importante energético para los sectores industriales y residenciales de la Región Metropolitana.

En 1997 se inaugura el gasoducto Gas Andes²⁴² entre ambos países, lo que permite el inicio de distribución de gas natural en la Región Metropolitana de Santiago por parte de la distribuidora Metrogas. En 1998, la Central Nueva Renca en medio de la estrechez energética que vivía el país en ese entonces, debido a la escasez hídrica con 370 MW de capacidad, fue la primera planta de ciclo combinado a gas natural del Sistema Interconectado Central (SIC)²⁴³.

Como resultado de medidas de política interna de Argentina, en el año 2004 el gobierno de ese país comenzó a limitar las exportaciones de gas natural a Chile, privilegiando el abastecimiento de su mercado doméstico. Esta situación se tradujo en una crisis energética

para nuestro país y una baja en el consumo de gas del sector industrial en la Región Metropolitana.

Para enfrentar la crisis de suministro de gas argentino, en Chile se conformó un consorcio de grandes empresas consumidoras de gas natural licuado (GNL), integrado por la petrolera estatal ENAP, las generadoras eléctricas AES Gener, Colbún S.A. y Endesa (hoy ENEL), y las distribuidoras de gas que abastecían la zona central del país (Metrogas y GasValpo). Este grupo logró materializar la construcción del terminal de regasificación de GNL Quintero, en el puerto de Quintero, región de Valparaíso, infraestructura que le permitió a Chile superar la dependencia del gas natural argentino. Este terminal comenzó a operar en 2009, permitiéndole al país importar gas desde cualquier origen.

Tal como se indicó anteriormente, la curva de demanda de gas natural muestra una importante caída entre los años 2004 y 2008, y una reactivación del crecimiento a partir del año 2009 (ver figura 3). No obstante, no se aprecia una correlación clara entre el consumo de gas natural y las concentraciones promedio anuales de PM.

La situación actual en cuanto a calidad del aire es el de la superación de los valores de la legislación ambiental chilena, tanto para PM₁₀ como para PM_{2,5} (ver figura 4).

242 Los cuatro gasoductos que se construyeron para importar gas natural desde Argentina fueron: GasAndes (1997), GasAtacama, Norandino y Gas Pacífico (1999).

243 Chile se compone de dos grandes sistemas eléctricos que cubren el 98% de la población: el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC).

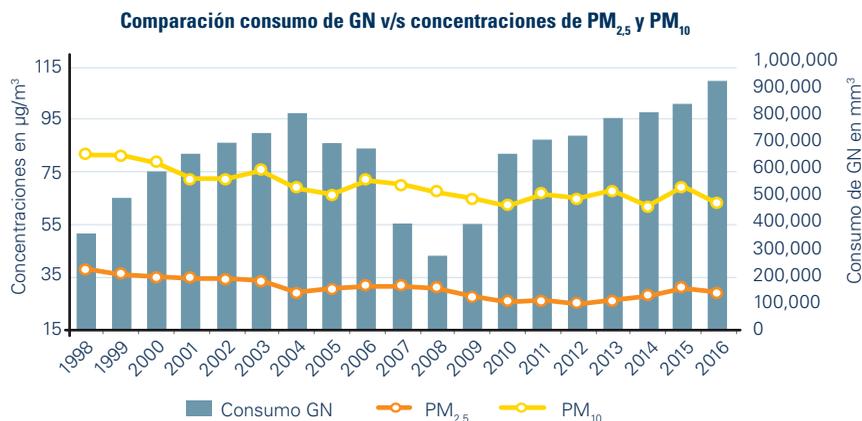


Figura 3

Tendencias de consumo de gas natural y concentraciones anuales promedio de material particulado en la Región Metropolitana de Santiago de Chile.

Fuente: SINCA (2017), SEC (2017).

¿Cuál es el origen de las emisiones contaminantes?

Para comprender mejor la relación que existe entre las distintas fuentes emisoras en la calidad del aire es necesario identificar el origen de estas emisiones, su variación temporal en cortes diarios o mensuales y la variabilidad de las estaciones de monitoreo disponibles en distintos períodos. En el trabajo de Barraza et al (2017) se analizaron químicamente los filtros de PM_{2,5} correspondientes a la Estación Parque O'Higgins durante los años 1998-2012²⁴⁴. Mediante modelos receptores químicos se identificaron distintos tipos de concentraciones de PM_{2,5} asociados a cinco fuentes emisoras

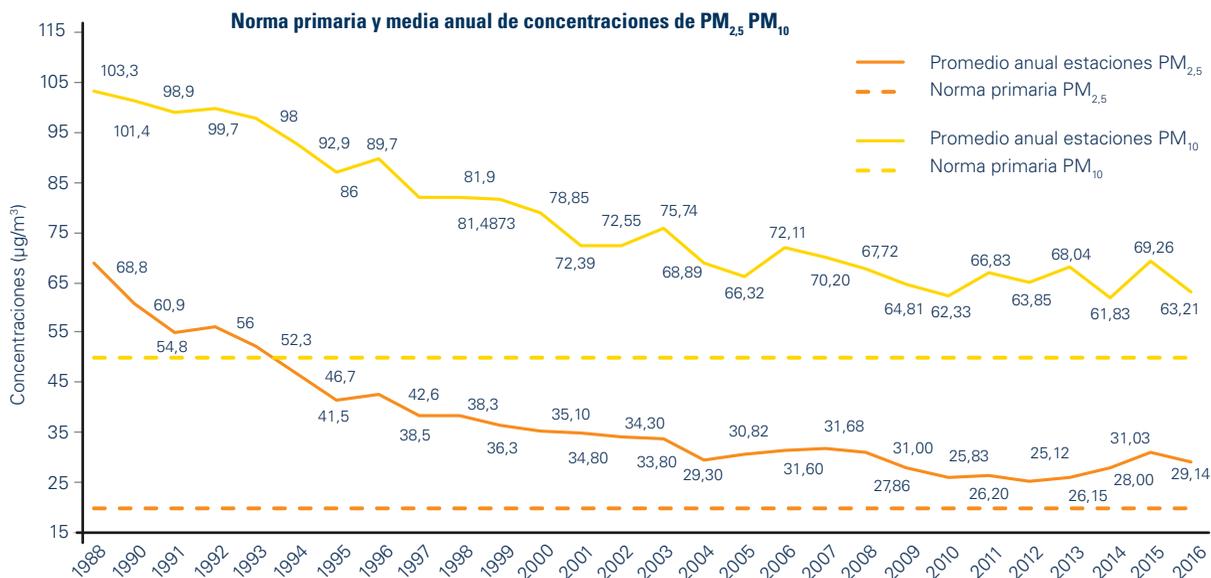
–transporte, industria, fundiciones de cobre, quema de leña, fuentes costeras–. Luego, aplicando análisis estadísticos, se detectaron cambios abruptos en las tendencias de concentración de PM_{2,5} para cada tipo de fuente emisora y se asociaron a eventos importantes ocurridos en la región que pudiesen explicar dichos cambios.

Si se analiza la evolución temporal de las concentraciones de PM_{2,5} asociadas a procesos industriales para la Región Metropolitana entre 1998 y 2012, y el análisis de detección de cambios abruptos mensuales en el mismo período, a nivel general se observa que las fuentes industriales redujeron sus contribuciones en 2,63 µg/m³ durante el período completo de análisis. Esta mejora se explica

244 Barraza F., Lambert F., Jorquera H., Villalobos A.M., Gallardo L. 2017. Temporal evolution of main ambient PM_{2,5} sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10093–10107, 2017, doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017.

Figura 4

Series temporales de concentraciones promedio anual de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en Santiago.



A modo de referencia se indica la norma primaria para cada tamaño de PM. Las medidas adoptadas por la autoridad ambiental han logrado mantener una tendencia a la baja en las concentraciones de PM, aun cuando la actividad económica ha seguido creciendo. No obstante, todavía se superan los valores límite de la norma primaria respectiva.

Fuente: SINCA (2017).

en gran medida por las políticas de reducción del azufre (S) en el diésel²⁴⁵, las reducciones obligatorias de las emisiones industriales, las restricciones de vehículos durante los días de

baja calidad del aire²⁴⁶ y el cambio de diésel a gas natural como combustible industrial²⁴⁷. Analizando los distintos períodos identificados como cambios abruptos, el año 2002 mostró

245 Jhun, I., Oyola, P., Moreno, F., Castillo, M.A., Koutrakis, P., 2013. PM2.5 mass and species trends in Santiago, Chile, 1998 to 2010: The impact of fuel-related interventions and fuel sales. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 63, 161–169. doi:10.1080/10962247.2012.742027.

246 Mena-Carrasco, M., Saide, P., Delgado, R., Hernandez, P., Spak, S., Molina, L., Carmichael, G., Jiang, X., 2014. Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology. *Urban Clim.* 10, 771–781. doi:10.1016/j.uclim.2014.06.006

247 MMA, 2015. Ministerio del Medio Ambiente - Anteproyecto del plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago

una reducción significativa de 2,52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con 2001, lo que se puede explicar por una disminución de 1.000 a 300 ppm en el contenido de azufre en el diésel²⁴⁸. Posteriormente, entre 2005 y 2007 se observa un importante aumento de las contribuciones por fuentes industriales, que coincide con la reducción gradual de las importaciones de gas natural de Argentina. Durante esos años muchas industrias se vieron obligadas a cambiar de nuevo a diésel y fueloil, que tienen un mayor contenido en S que el gas natural.

A partir de 2009, con la entrada en operaciones del primer terminal de regasificación de GNL en Quintero, Chile empieza a tener acceso al gas natural importado de diferentes países. La disponibilidad continua del energético produce un significativo reemplazo de diésel por gas natural, lo que se ve reflejado en una reducción de emisiones industriales²⁴⁹. El período 2010-2012 muestra una reducción de 1,76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones de material particulado fino en la Región Metropolitana, en comparación con el período en que se restringieron los envíos de gas natural argentino (2004-2008)²⁵⁰.

¿Qué impacto tendría la introducción a gran escala del gas natural?

Otro estudio analiza el impacto potencial que hubiese tenido la introducción masiva de gas natural en transporte y calefacción residencial en Santiago²⁵¹. Estos escenarios no se llevaron a cabo en la Región Metropolitana, pero el valor del análisis radica en la demostración de poder aplicar varios modelos en serie, que permiten convertir emisiones en concentraciones y exposición, luego llevar estas concentraciones a mortalidad y morbilidad, para finalmente realizar una valoración de los efectos en la salud de la población (ver figura 5).

El primer escenario considera al sistema de transporte público completamente impulsado por gas natural comprimido (GNC), reemplazando buses diésel de tecnología Euro III principalmente. Se estimó una reducción total de 229 t/año de $\text{PM}_{2,5}$ y 4.763 t/año de NO_x ; 728 t/año para COVs y 25 t/año para SO_2 .

248 Centro Mario Molina Chile, 2014. Propuesta de regulaciones para la reducción del $\text{PM}_{2,5}$, sus cambios precursores y contaminantes que afecten al cambio climático, para las distintas fuentes estacionarias de la Región Metropolitana. MMA, 2015. Ministerio del Medio Ambiente - Anteproyecto del plan de prevención y descontaminación atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago

249 Figueroa, E., Gómez-Lobo, A., Jorquera, P., Labrín, F., 2013. Develando económicamente los impactos sobre la concentración atmosférica de material particulado de un proyecto de remodelación del transporte urbano: El caso del Transantiago en Chile. *Estud. Econ.* 40, 53–79. doi:10.4067/S0718-52862013000100003

250 Barraza F., Lambert F., Jorquera H., Villalobos A.M., Gallardo L. 2017. Temporal evolution of main ambient $\text{PM}_{2,5}$ sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10093–10107, 2017, doi.org/10.5194/acp-17-10093-2017.

251 Mena-Carrasco M., Oliva E., Saide P., Spak S.N., de la Maza C., Osses M., Tolvett S., Campbell J.E., Chi-Chung T., Molina L.T., 2012. Estimating the health benefits from natural gas use in transport and heating in Santiago, Chile. *Science of the Total Environment* 429, 257–265.

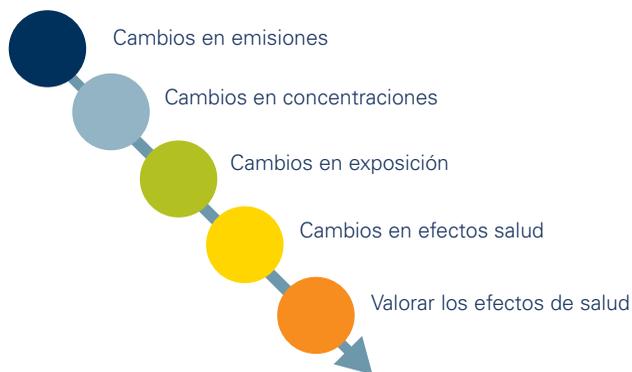


Figura 3

Metodología de evaluación para escenarios de introducción masiva de gas natural en la región metropolitana.

Fuente: Mena et al. (2012)

La reducción media de la concentración para la media anual ponderada por densidades de población es de $0,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este escenario evita un total de 36 casos de mortalidad, 113 hospitalizaciones, 13.665 días de trabajo perdidos y aproximadamente 67.000 días de actividad restringida. Los beneficios económicos para el escenario del sistema de autobuses GNC alcanzan los US\$49 millones al año.

El segundo escenario fue construido estimando las emisiones reducidas de reemplazar la quema de leña con la mezcla actual de keroseno, gas natural y propano mostrada en el inventario oficial. Para este escenario las emisiones de $\text{PM}_{2,5}$ se redujeron en 671 t/año y COVs en 7.461 t/año. Para la quema de madera residencial se observa que, durante el invierno, se reduce en promedio un máximo de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (casi 10 veces mayor que el escenario de buses GNC), y la reducción ponderada de la población sobre una base anual es de $2,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El escenario de calefacción residencial limpia evita 229 casos de mortalidad prematura, 712 ingresos hospitalarios,

aproximadamente 86.000 días de pérdida de trabajo y 420.000 días de actividad restringida. La valoración de estos impactos se estima en US\$ 310 millones al año. Considerando que hay 110.000 estufas de leña en Santiago –según cifras del Ministerio de Medio Ambiente–, cada una genera externalidades ambientales valuadas en US\$ 2.821 anuales.

Ambas políticas se muestran como formas rentables de reducir la contaminación atmosférica, ya que se dirigen a fuentes de contaminación de alta emisión y reducen las concentraciones en áreas urbanas densamente pobladas, así como en zonas menos densas fuera de los límites de la ciudad.

La principal conclusión es que la calidad del aire en la Región Metropolitana de Santiago ha mejorado de manera continua desde el año 1990 a la fecha y el aporte del gas natural queda demostrado en ello. No obstante, aún se exceden los promedios máximos de PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ establecidos como niveles aceptables por el Ministerio de Medio Ambiente.



Ingeniero Químico, PhD en Ingeniería Ambiental. Profesor e investigador en las áreas de calidad del aire y modelamiento ambiental. Dirige el grupo de investigación CLIMA y asesora a instituciones del país en temas ambientales.

Jorge E. Pachón

Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental, CLIMA. Universidad de La Salle. Bogotá. Colombia

Caso 7. La experiencia de Bogotá

Preguntas clave del artículo

- ¿Cuáles son las condiciones ambientales y socioeconómicas de la ciudad de Bogotá?
- ¿Cómo es la calidad del aire en Bogotá?
- ¿Qué fuentes de emisión afectan la calidad del aire?
- ¿Cuáles son los efectos de la contaminación y qué costes supone?
- ¿Qué eficacia tienen las medidas aplicadas para mejorar la calidad del aire?
- ¿Cómo contribuye el gas natural a la mejora de la calidad del aire?
- ¿Qué medidas se pueden tomar a corto, medio y largo plazo?

Apunte inicial

Bogotá, capital de Colombia, aloja una población de más de 8 millones de habitantes. La ciudad se ha caracterizado a lo largo de los años por sus problemas de congestión vehicular y la ausencia de un transporte público organizado y eficiente. El sector del transporte representa una alta demanda energética en la ciudad, que se satisface principalmente con combustibles fósiles. Lo anterior trae como consecuencia que el 90% de las emisiones de gases contaminantes, tales como monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), provengan de las fuentes móviles²⁵². En el caso del material particulado (PM), los vehículos también representan el sector que genera más emisiones en forma directa (combustión) o indirecta (resuspensión). La industria, por su parte, consume mayoritariamente gas natural y carbón, generando emisiones de NO_x, PM y dióxido de azufre (SO₂).

Los contaminantes que con mayor frecuencia exceden los límites normativos son el PM y el ozono (O₃), según los registros de la red de monitoreo de calidad del aire²⁵³. Actualmente, se cuenta con un pronóstico simulado de la contaminación a 24 horas²⁵⁴ proveniente del sistema de modelación de calidad del aire. La contaminación del aire en la ciudad tiene un

gran impacto en la salud pública. Se estima que para el año 2015, el costo asociado a la contaminación del aire en Bogotá alcanzó los 4.200 millones de dólares, lo cual representa el 2,5% el PIB de la ciudad²⁵⁵.

A lo largo de los años, se han tomado diferentes medidas para combatir la contaminación del aire, tanto de comando y control en fuentes fijas y móviles, como acciones de renovación del parque vehicular, mejoramiento y sustitución de combustibles, promoción del transporte sostenible, relocalización de la industria, pavimentación de vías, entre otras. Estas acciones han permitido que, a pesar del continuo crecimiento poblacional y económico, la calidad del aire en la ciudad en promedio haya mejorado en la última década²⁵⁶.

En la actualidad, Bogotá enfrenta grandes retos en materia de contaminación del aire, pero a la vez una oportunidad única para emprender acciones efectivas de descontaminación. La ciudad cuenta hoy en día con mejores inventarios de emisiones, un robusto sistema de medición y modelación de contaminantes, metodologías para la valoración económica de impactos en salud y un nuevo marco normativo, herramientas que son de gran utilidad en la formulación de estrategias para la descontaminación del aire, en especial, para la reformulación del plan de descontaminación del

252 SDA, 2010. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. Bogotá D.C. 324pp.

253 SDA, 2016. Informe anual de calidad del aire en Bogotá 2016. Bogota. 187pp.

254 Pronóstico de calidad del aire de Bogotá, <http://www.ambientebogota.gov.co/calidad-del-aire>

255 DNP-Departamento Nacional de Planeación, 2017. The costs of Environmental Degradation in Colombia. [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx) (accessed 10.30.17).

256 SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogota. 120pp.

aire de la ciudad. Es imprescindible un análisis coste beneficio de las medidas que se formulen pues, sólo teniendo en cuenta los impactos en la salud, llegarán a ser económicamente viables.

¿Cuáles son las condiciones ambientales y socioeconómicas de la ciudad de Bogotá?

Bogotá está ubicada en el trópico a 2.600 m de altura, en las estribaciones de la Cordillera Oriental de los Andes, ocupando un área de 163.659 hectáreas, de las cuales el 25% son urbanas y un 75% rural. La ciudad está rodeada al oriente por un complejo montañoso que alcanza alturas de hasta 3.150 m y al occidente por cerros de menor altura (ver figura 1). Los vientos fluyen predominantemente del noreste-este y sureste-este en los extremos norte y sur de la ciudad y se observa confluencia de los vientos hacia el centro y occidente. La velocidad del viento es en promedio menor a 2 m/s, con excepción de los meses entre julio y septiembre con influencia de vientos alisios con mayores velocidades de hasta 5 m/s. Los vientos locales, en general, transportan contaminantes hacia el occidente y fuera de la

ciudad, sin embargo, en ciertas épocas del año los vientos alisios transportan contaminantes del occidente hacia el centro de la ciudad²⁵⁷. La ciudad presenta un régimen bimodal de lluvias, con períodos de mayor precipitación en los meses de abril y octubre (precipitación >150 mm/mes), y periodos secos en enero y junio (precipitación <75 mm/mes). Son frecuentes en la ciudad en la época seca, situaciones de inversión térmica que ocasionan fuertes gradientes de temperatura e impiden la dispersión de contaminantes en las primeras horas del día, lo que ocasiona niveles de contaminantes por encima de los valores normativos.

La población en Bogotá se ha venido incrementando en la última década a razón de una tasa del 1,3% anual, llegando en el año 2016 a cerca de 8 millones de personas, o 9 cuando se tiene en cuenta la población flotante de municipios aledaños. Bogotá es una ciudad relativamente densa (4.876 hab./km²) y con un PIB de unos 100.000 millones US\$ anuales con un crecimiento anual del 4.5%. Aunque su tasa de motorización (16,2 vehículos/100 habitantes para el 2015) es menor que otras ciudades latinoamericanas, la ciudad presenta altos índices de congestión²⁵⁸ y de crecimiento vehicular.

La ciudad se ha caracterizado a lo largo de los años por sus problemas de congestión vehicular y la ausencia de un transporte público organizado y eficiente. No hay un sistema de metro y sólo hasta el año 2000

257 SDA, 2016. Informe anual de calidad del aire en Bogotá 2016. Bogota. 187pp.

258 Bogotá ocupa el quinto puesto por congestión en el Índice Global de Tráfico INRIX (<http://inrix.com/scorecard/>)



1. Guaymaral
2. Usaquén
3. Suba
4. Las Ferias
5. Centro alto rendimiento
6. Min. Ambiente
7. Puente Aranda
8. Kennedy
9. Carvajal
10. Tunal
11. San Cristóbal
12. Bolivia
13. Estación móvil

Figura 1

Ubicación geográfica de Bogotá y su red de monitoreo de calidad del aire RMCAB.

En verde estaciones activas, y en rojo inactivas.

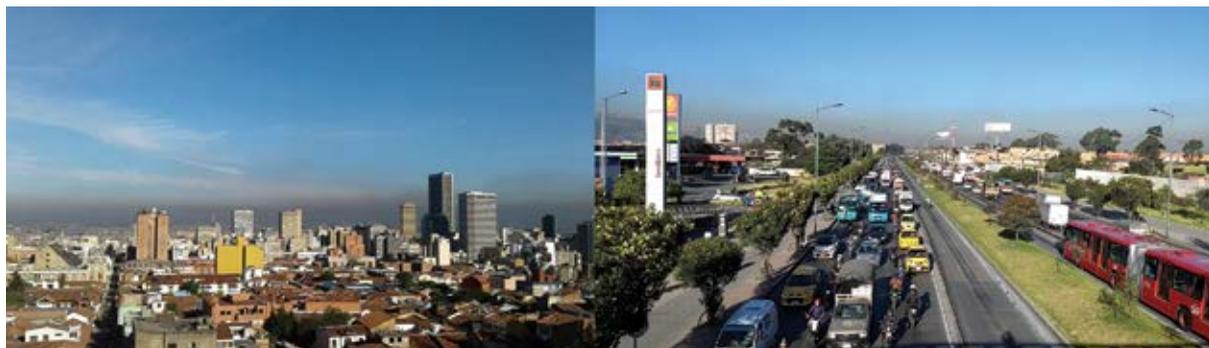
se implementó un sistema de buses rápidos denominado Transmilenio (TM), el cual consiste en buses articulados que circulan por carriles exclusivos en las vías, estaciones para el cargue y descargue de pasajeros y un sistema centralizado de colecta de tarifa. Sin lugar a duda, TM fue un avance con respecto al transporte público caótico que circulaba por la ciudad, caracterizado por la sobreoferta, la competencia por pasajeros y la obsolescencia del parque vehicular. Sin embargo, hoy en día TM es insuficiente para movilizar una población de una megaciudad y gran parte de los usuarios han migrado hacia otros sistemas de transporte, en especial, vehículos particulares y motocicletas.

¿Cómo es la calidad del aire en Bogotá?

Desde el año 1997 opera en Bogotá la red de monitoreo de calidad del aire (RMCAB) registrando concentraciones de contaminantes criterio (PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , CO , NO_x , SO_2) y variables meteorológicas a lo largo del perímetro urbano. En el año 2017, la RMCAB funcionó con 13 estaciones, 12 fijas y una móvil (ver figura 1). Las estaciones se clasifican como estaciones de fondo, de tráfico o industrial según su localización en la ciudad. La RMCAB trasmite en forma automática los registros de calidad del aire a las instalaciones de la Secretaría de Ambiente (SDA), donde los datos son manualmente validados según protocolo y

Figura 2

Situación de inversión térmica y capa visible de smog en el occidente (izquierda) y sur (derecha) de Bogotá.



Fuente: Jorge Pachón

publicados en su página web para acceso de los ciudadanos²⁵⁹.

En las primeras horas de la mañana, durante los episodios de inversión térmica propios de la época seca, es posible visualizar desde el oriente una espesa capa de smog pardo-grisácea que cubre el occidente de la ciudad, un signo innegable de la contaminación del aire (ver figura 2). La capa de mezcla a las 06:00 h UTC puede estar limitada a unos 500 m, generando una acumulación de contaminantes en la superficie, que gradualmente se van diluyendo en la medida que la inversión se va destruyendo (a partir de las 08:00 h UTC de la mañana).

Los contaminantes que con mayor frecuencia exceden los límites normativos son PM y, en

menor medida, el O_3 . El PM, en sus fracciones PM_{10} y $PM_{2,5}$, presenta excedencias frecuentes en la zonas sur y occidental de la ciudad, en tanto que las excedencias por ozono son más comunes al norte de la ciudad (ver figura 3). Para otros contaminantes, como CO, dióxido de nitrógeno (NO_2) y SO_2 , no se reportan excedencias del valor normativo. Sin embargo, su medición se continúa con el fin de observar tendencias en estos gases producto de combustión.

A la par con el monitoreo está la modelación de contaminantes. En el año 2014 se implementó el modelo fotoquímico CMAQ acoplado con el modelo meteorológico WRF²⁶⁰. Este sistema de modelación ha sido de gran utilidad para revisar y ajustar los inventarios de emisiones, contar

259 <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/red-de-calidad-del-aire>

260 Nedbor-Gross, R., Henderson, B.H., Davis, J.R., Pachón, J.E., Rincón, A., Guerrero, O.J., Grajales, F., 2016. Comparing Standard to Feature-Based Meteorological Model Evaluation Techniques in Bogotá, Colombia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 56, 391-413. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0058.1>

Figura 3

Concentraciones promedio anuales de PM_{10} , $PM_{2,5}$ y O_3 para el año 2016.

Contaminante	PM_{10}		$PM_{2,5}$		O_3		
	Estación	Promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Escedencias norma anual (%)	Promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Escedencias norma anual (%)	Promedio anual 8-h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Escedencias norma octohoraria (%)
Guaymaral		32	0	16	0	25	2,2
Usaquén		42	4	17	5	38	2,9
Suba		52	2	22	2	29	3,8
Las Ferias		40	1	19	0	23	1,8
Centro alto rendimiento		35	0	20	2	25	2,0
Min. Ambiente		34	0	18	4	25	0,3
Puente Aranda		52	7	23	0	15	0,11
Kennedy		58	12	30	15	16	1,8
Carvajal58		58	48	30	12	19	0,5
Tunal		50	11	23	11	19	0
San Cristóbal		27	0	10	0	19	0,3
Promedio		45		19		23	
Valor límite		50		25		80	

Fuente: SDA, 2016. Informe anual de calidad del aire en Bogotá 2016. Bogota.

con una mayor resolución espacial y temporal de las concentraciones y evaluar diferentes escenarios de reducción de emisiones.

Material particulado

Los registros históricos de PM_{10} de la RMCAB indican un aumento en las concentraciones de este contaminante en el período 2000 a

2007, propiciado por el desarrollo económico de la ciudad, en especial, un aumento de la actividad industrial y crecimiento del parque vehicular. Se observa posteriormente a 2007 un descenso gradual del PM_{10} hasta 2012 cuando la concentración anual promedio ciudad se presenta por primera vez por debajo de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver figura 4).

Sin embargo, las zonas sur y occidental de la ciudad presentan niveles por encima del valor

límite normativo. El descenso del PM en el periodo 2007-2012 podría ser debido por la mejora de la calidad de los combustibles y renovación del parque vehicular, al entrar en funcionamiento nuevas troncales del sistema Transmilenio (TM). A partir del año 2012, cambios en la concentración del PM₁₀ son menores y deben analizarse con cuidado, pues podrían ser debidos a la variabilidad meteorológica y al número de estaciones de monitoreo presentes, en lugar de una reducción consecuente de las emisiones.

En cuanto a PM_{2,5}, para los años 2012 y 2013 sólo se contaba con una estación de monitoreo, ya para el año 2016 ocho estaciones reportaron este contaminante. El promedio ciudad de la concentración anual de PM_{2,5} no supera los valores normativos, sin embargo, las estaciones ubicadas al occidente de la ciudad están por encima de éste (25 µg/m³, ver figura 3).

Contaminantes gaseosos

Las concentraciones de contaminantes gaseosos (SO₂, NO₂, CO, O₃) se encuentran generalmente por debajo de los valores normativos. En el caso SO₂ hay una clara tendencia a la baja, explicada por el descenso en el contenido de azufre en los combustibles y la sustitución de carbón por gas natural. Anteriormente al año 2000, el diésel que se consumía en fuentes móviles tenía un contenido de azufre superior a 4.000 ppm (partes por millón, el cual fue reducido a 1.200 ppm en

2000 y posteriormente a 50 ppm en 2008²⁶¹. La gasolina tuvo una reducción de 1.200 a 270 ppm de azufre.

El CO también presenta un descenso progresivo, explicado por la renovación de vehículos ligeros que ha tenido lugar en los últimos años. En el caso del NO₂, cuyas emisiones están más asociadas a los vehículos pesados, no hay una tendencia clara en su concentración. Tanto el CO como el NO₂ son indicadores de fuentes móviles con un perfil horario similar al tráfico.

Con respecto al O₃, a pesar del estricto estándar nacional (80 µg/m³ octohorario), sólo se presentó un 3% de excedencias en la zona norte de la ciudad (ver figura 3). Las mayores concentraciones de O₃ se presentan en los meses secos de inicio del año debido a la mayor radiación solar, y los domingos, debido a la menor titración (o consumo) de éste por NO durante el fin de semana²⁶². Durante otros meses del año, la formación de O₃ es limitada, dada las condiciones topográficas y meteorológicas de la ciudad (bajas temperaturas, nubosidad constante, precipitación).

Composición química del PM

Estudios sobre la composición química del PM₁₀ en Bogotá (ver figura 5) indican que el componente mayoritario es el carbón orgánico (OC, 32%) y elemental (EC 26%), seguido

261 La Ley 1205 del Congreso de la República requirió un suministro de diésel con 50ppm de azufre para todo el país.

262 González Riaño, V., 2016. Análisis del efecto de ozono de fin de semana en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. <http://www.bdigital.unal.edu.co/55908/1/52914834.2016.pdf>

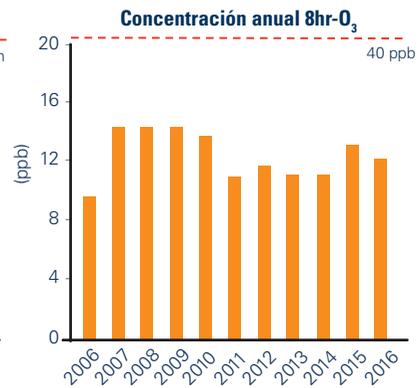
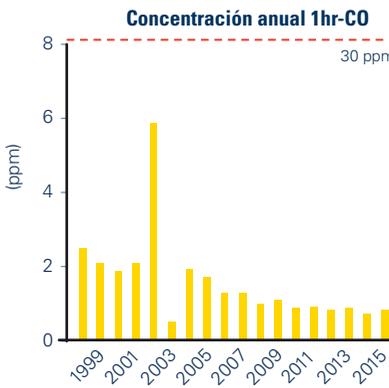
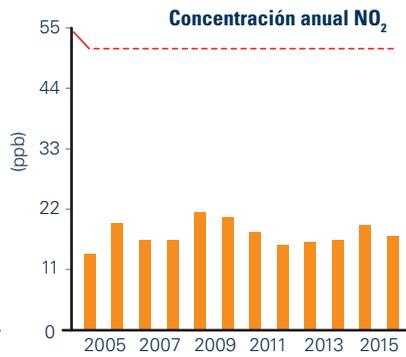
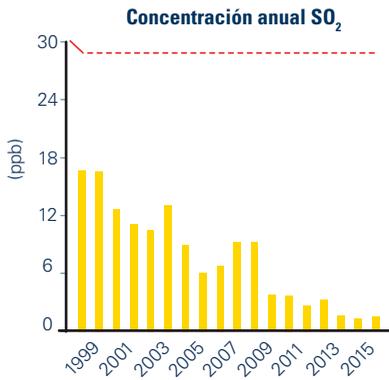
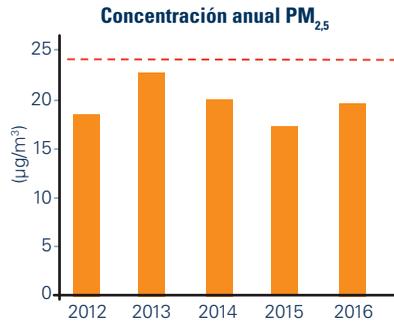
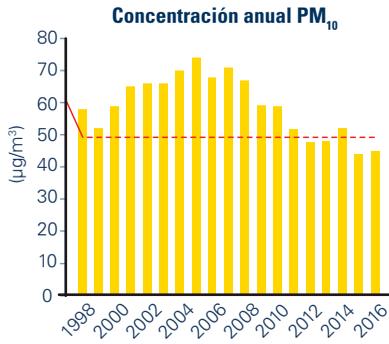


Figura 4

Series temporales de contaminantes medidos por la RMCAB para diferentes contaminantes y comparación con el respectivo valor límite anual (en color rojo).

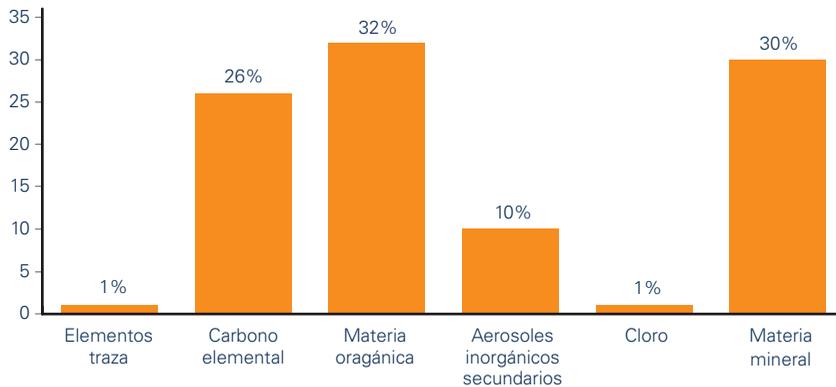


Figura 5

Composición química promedio de PM_{10} en Bogotá (PM_{10} promedio de $45 \mu g/m^3$).

Fuente: Pachon, J.E., Saavedra, C., Amato, F., Rincon, A., Sanchez, D., 2017. Identificación del aporte de fuentes al PM_{10} en la ciudad de Bogotá. Memorias Del IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad Del Aire Y Salud Pública CASAP (www.casap.com.co). Universidad del Valle, Cali.

de la fracción mineral (25%), constituida fundamentalmente por óxidos de aluminio, silicio, calcio, hierro y titanio, y en menor proporción la fracción de iones secundarios con un aporte del 8-11%²⁶³. Los metales son contenidos traza en el PM_{10} ²⁶⁴. A pesar del descenso en las concentraciones de PM_{10} en los últimos años, la fracción carbonácea (OC+EC) se ha mantenido en promedio en un 50%, lo que indica la presencia aún de fuentes importantes de combustión ineficiente. A diferencia de lo que ocurre en otras ciudades del mundo, la proporción entre el OC y el EC es en

promedio la unidad (OC/EC=1,0) indicando un origen mayoritariamente primario del OC.

¿Qué fuentes de emisión afectan la calidad del aire?

La ciudad de Bogotá posee diversas fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera: vehículos ligeros y pesados, motocicletas, aeropuertos, ferrocarril, industria, comercio,

263 Pachon, J.E., Saavedra, C., Amato, F., Rincon, A., Sanchez, D., 2017. Identificación del aporte de fuentes al PM_{10} en la ciudad de Bogotá, in: Memorias Del IV Congreso Colombiano Y Conferencia Internacional de Calidad Del Aire Y Salud Pública CASAP. Universidad del Valle, Cali.
 Pachon, J.E., Russell, A.G., Sarmiento, H., Galvis, B., 2008. Identification of secondary aerosol formation in Bogota: a preliminary study, in: Papers from the 101st A&WMA Annual Conference & Exhibition. Portland, OR.
 Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A.M., Amato, F., Catacolí, R.A., Rojas, N.Y., de la Rosa, J., 2018. Chemical composition and source apportionment of PM_{10} at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia). Environ. Pollut. 233, 142-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>

264 Pachon, J.E., Vela, H.S., 2008. Heavy metal determination and source emission identification in an industrial location of Bogota-Colombia. Rev. Fac. Ing. Antioquia 120-133.

construcción de vías y edificaciones, polvo de rodadura en vías de circulación, estaciones de servicio, tratamiento de residuos sólidos y líquidos, incendios forestales, entre otros. A lo largo de los años se han cuantificado las emisiones de estos sectores por parte de la autoridad ambiental y la academia.

Fuentes móviles

En el 2014, Bogotá registró aproximadamente 2 millones de vehículos, de los cuales el 68% correspondía a vehículos particulares, 21% motos, 5% carga, 3% taxis y 3% buses²⁶⁵. El crecimiento económico y la planificación del territorio inciden en que la cantidad de vehículos en la ciudad crezca en una forma exponencial. Una década antes en el 2004, se contaban menos de 500.000 unidades. El crecimiento de las motos es aún más acelerado, pasando de 200.000 unidades en el año 2010 a casi 500.000 en el 2016. Este drástico crecimiento de las motocicletas es resultado de un transporte público ineficiente y costoso.

Las fuentes móviles representan el mayor porcentaje de las emisiones de gases de combustión (CO, CO₂ y NO_x) y de compuestos orgánicos volátiles (COVs), y casi la mitad de las emisiones de PM derivada de procesos de combustión (ver figura 5). En cuanto al PM, las emisiones están asociadas al tipo de categoría

vehicular: buses (37-44%), carga (22-42%), vehículos particulares (12-20%), motos (7-10%) y taxis (1-4%)²⁶⁶.

Las emisiones de material particulado en vehículos pesados están asociadas al consumo de diésel y la obsolescencia de la flota de buses y camiones. A pesar de contar en la ciudad con un combustible de calidad internacional (<50 ppm de azufre), la renovación de la tecnología vehicular no ha ido de la mano con el mejoramiento de los combustibles. Aún siguen presentes en la ciudad buses con estándares de emisiones pre-Euro, Euro I y Euro II, y con más de 15 años de funcionamiento. Incluso vehículos con mejores tecnologías de control de emisiones (Euro IV, V) pudieran no estar cumpliendo los estándares dado la ausencia de programas de mantenimiento preventivo y los agresivos patrones de conducción.

Fuentes fijas

En Bogotá se reportan cerca de 3.000 chimeneas industriales para el año 2014, número que podría estar subestimado debido a la presencia de industria operando por fuera de los registros. La producción industrial en la ciudad es principalmente de productos metálicos, plásticos, maquinaria, imprenta, químicos, alimentos, concentrados, bebidas, tabaco, textiles y maderas. El consumo de

265 Según base de datos de la Secretaría Distrital de Ambiente.

266 Pachón, E.J., Galvis, B., Lombana, O., Carmona, G.L., Fajardo, S., Rincón, A., Meneses, S., Chaparro, R., Nedbor-Gross, R., Henderson, B., 2018. Development and Evaluation of a Comprehensive Atmospheric Emission Inventory for Air Quality Modeling in the Megacity of Bogotá. Atmosphere 9 (2), 49. <https://doi.org/10.3390/atmos9020049>
SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogotá. 120pp.

combustibles en la industria se distribuye en gas natural (72%), carbón mineral (9%), fuel-oil (8%), carbón coque (4%), GLP (4%) y otros (4%)²⁶⁷. Son considerables las emisiones de PM y SO₂, incluso mayores que el aporte de fuentes móviles (ver figura 6), posiblemente por el consumo de carbón en la industria informal. La metodología de estimación de emisiones de fuentes fijas puede ser consultada en publicaciones previas²⁶⁸.

Estaciones de servicio

Bogotá cuenta con aproximadamente 500 estaciones de servicio (EDS) y cuatro grandes tanques de almacenamiento de combustible (CAC) que generan considerables emisiones de COVs a la atmósfera (ver figura 7). La metodología de estimación de emisiones en estaciones de servicio puede ser consultada en publicaciones previas.

Polvo resuspendido

Se ha señalado el polvo resuspendido como un componente importante de las emisiones a la atmósfera. En 2012 se construyó el primer inventario de emisiones por material susceptible de resuspensión en Bogotá usando métodos de la US-EPA y una carga de sedimentos de 0,1 g/m²²⁶⁹. Posteriormente, se realizan mediciones en vía para determinar la carga de sedimentos en Bogotá donde se encuentra que la carga de PM75 entre 0,1 y 10,2 g/m²²⁷⁰. Con estas cargas se construye el primer inventario de emisiones de PM resuspendido en Bogotá con fines de modelación de calidad del aire. Este inventario resulta en valores superiores a las emisiones por combustión (ver figura 6). Es muy probable que haya una sobrestimación en estas emisiones, por lo que se han aplicado factores de ajuste que tienen en cuenta la variabilidad temporal de las emisiones logrando una reducción del 60% de las mismas²⁷¹.

267 SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogota. 120pp.

268 Fajardo, S., Zambrano, D., Pachón, J.E., 2016. Estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de asaderos, restaurantes, estaciones de servicio y centros de almacenamiento de combustible en Bogotá, in: *Construyendo Investigación: Semilleros Generadores de Ideas*. Ediciones Unisalle, Bogota, pp. 223-239.

269 Beltran, D., Belalcázar, L.C., Rojas, N., 2012. Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión de Bogotá. *Rev. Ing. Sanit. y Ambient.* 231, 25-33.

270 Pachon, J.E., 2014. Informe final del contrato 1467 de 2013 para el desarrollo e implementación de un modelo de calidad del aire para Bogotá. Bogota. 825pp.

271 Nedbor-Gross, R., Henderson, B.H., Davis, J.R., Pachón, J.E., Rincón, A., Guerrero, O.J., Grajales, F., 2016. Comparing Standard to Feature-Based Meteorological Model Evaluation Techniques in Bogotá, Colombia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 56, 391-413. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0058.1>

Pérez-Peña, M.P., Henderson, B.H., Nedbor-Gross, R., Pachon, J.E., 2017. Natural mitigation factor adjustment for re-suspended particulate matter emissions inventory for Bogota, Colombia. *Atmos. Pollut. Res.* 8, 29-37. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.006>

Figura 6

Emisiones a la atmósfera por todas los diferentes sectores²⁷³.

Fuente	PM _{2.5} (t/año)	PM ₁₀ (t/año)	COVs (t/año)	CO (t/año)	NOx (t/año)	SO ₂ (t/año)	CO ₂ (t/año)
Móviles (en ruta)	1.125	1.240	26.105	240.973	4.276	1.257	9.163.396
Móviles (fuera de ruta)	N.D.	157	N.D.	4.521	5.159	159	769.623
Fijas (industria + comercial)	285	1.411	2.933	3.341	3.342	2.226	1.625.935
Estaciones de servicio	N.D.	N.D.	23.789	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Polvo resuspendido*	9.085	43.087					
Total	10.914	46.221	52.884	244.314	64.073	3.642	11.588.614

*Las fuentes móviles fuera de ruta corresponden a las emisiones de los puertos aéreos de la ciudad (Eldorado y Guaymaral), maquinaria industrial y de construcción y la locomotora. El polvo resuspendido ha sido cuantificado usando la metodología AP-42, capítulo 13 de la US-EPA, actualmente esta cifra está en revisión.

Fuente: Pachón, J.E., 2016. Informe final del convenio 5224377 "Evaluar los estados de calidad del aire generados a partir de diferentes escenarios de emisión utilizando el sistema integrado de modelación de calidad del aire de Bogotá - SIMCAB".

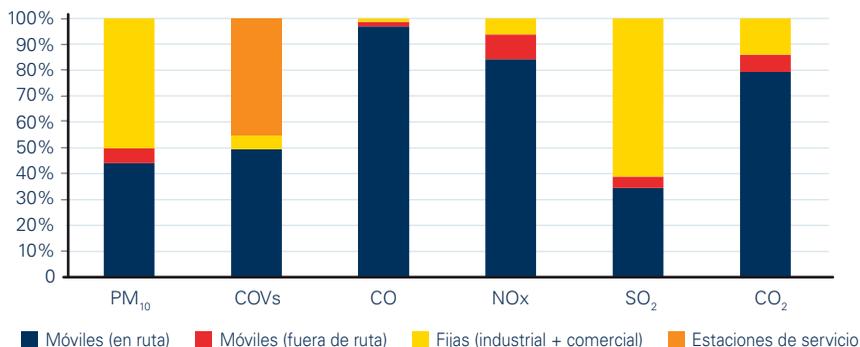


Figura 7

Emisiones a la atmósfera por todos los sectores (PM sólo por combustión).

272 Emisiones de las fuentes móviles en base a publicaciones previas, de las que sobresalen las emisiones de CO₂ dada la alta dependencia del transporte por los combustibles fósiles.

Contribución de fuentes al PM₁₀

El estudio de la composición química de PM₁₀ (ver figura 5) ha posibilitado la estimación de la contribución de las fuentes al PM₁₀ mediante la aplicación de modelos de receptor²⁷³. Si bien los resultados de la modelación difieren de acuerdo a la época del año, el lugar en que se toman las muestras, el número de especies químicas y de días seleccionados, y el número de fuentes atribuibles; en general se puede observar un aporte del 35-50% del PM₁₀ de actividades de combustión en fuentes fijas y móviles, un 45-55% aporte de polvo resuspendido y erosión y finalmente un 10% de aporte por formación secundaria de contaminantes, iones sulfato (SO₄²⁻), nitrato (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺).

El aporte mineral es particularmente más alto en las zonas sur y occidental de la ciudad, donde la presencia de vías no asfaltadas o en mal estado, y el tránsito de vehículos de carga es más frecuente. La fracción carbonacea indica que el incremento del parque vehicular y el deterioro del mismo, junto con la actividad industrial, aún

contribuyen con cantidades significativas de PM₁₀ a la atmósfera.

¿Cuáles son los efectos de la contaminación y qué costes supone?

Durante muchos años las enfermedades respiratorias han sido la causa más frecuente de atención hospitalaria en Bogotá, en especial en la población menor a 5 años²⁷⁴. Por este motivo, existen en la ciudad instituciones dedicadas al cuidado de la enfermedad respiratoria aguda, denominadas salas ERA. Por otro lado, las enfermedades cardiovasculares son la primera causa de mortalidad en la población mayor de 60 años. La evidencia científica mundial señala que tanto las enfermedades respiratorias como cardiovasculares están asociadas con la contaminación del aire²⁷⁵.

-
- 273 Pachon, J.E., Saavedra, C., Amato, F., Rincon, A., Sanchez, D., 2017. Identificación del aporte de fuentes al PM10 en la ciudad de Bogotá, en: Memorias Del IV Congreso Colombiano Y Conferencia Internacional de Calidad Del Aire Y Salud Pública CASAP Universidad del Valle, Cali. Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A.M., Amato, F., Catacolí, R.A., Rojas, N.Y., de la Rosa, J., 2018. Chemical composition and source apportionment of PM10 at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia). *Environ. Pollut.* 233, 142-155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>
- Vargas, F., Rojas, N.Y., Pachon, J.E., Russell, A.G., 2012. PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmos. Pollut. Res.* 3, 72-80. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>
- 274 Salud, Secretaría Distrital de Salud, 2015. Diagnóstico Sectorial de Salud. Bogota. <https://doi.org/http://www.saludcapital.gov.co/Empalme%20del%20Sector%20Salud%2020122016/DIRECTIVA%2009%20DE%202015/1%20%20DIAGNOSTICO%20SECTORIAL%20DE%20SALUD.pdf>
- 275 Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X.P., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G., Speizer, F.E., 1993. An association between air-pollution and mortality in six United-States cities. *N. Engl. J. Med.* 329, 1753-1759.
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R., Renjun, M., Hughes, E., Shi, Y., Turner, M., Pope III, C.A., Thurston, G., Calle, E., Thun, M.J., 2009. Extended Follow-up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. *Health Effects Institute*, Boston, MA. 154 pp.
- Pope, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E., Heath, C.W., 1995. Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 151, 669-674. https://doi.org/10.1164/ajrccm/151.3_Pt_1.669

En Bogotá se han realizado estudios de asociación entre la contaminación del aire y el impacto en la salud²⁷⁶. Un estudio de series de tiempo en el período 1998-2006 observó un incremento en la mortalidad por todas las causas del 0,71% y por enfermedad respiratoria del 1,43% por un incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración diaria de PM_{10} ²⁷⁷. Este estudio usó una concentración promedio diaria de PM_{10} de 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pudiendo subestimar los resultados en las zonas de mayor concentración en la ciudad donde frecuentemente se alcanza valores de PM_{10} por encima de dicho promedio. En efecto, se ha detectado que en los estratos sociales con un nivel socioeconómico más bajo, este tipo de relación concentración-respuesta representa un valor más elevado que en las zonas con un mayor poder adquisitivo²⁷⁸, lo que supone un fenómeno de injusticia social. La calidad del aire en ambientes interiores representa también un riesgo de salud

pública en la ciudad. Estudios llevados a cabo en jardines infantiles localizados cerca de complejos industriales y vías de alto flujo vehicular han reportado concentraciones de PM_{10} superiores al ambiente exterior y han mostrado un mayor riesgo de morbilidad respiratoria y ausentismo escolar en niños menores a 5 años que aquellos que permanecen en jardines en zonas más residenciales²⁷⁹.

De forma similar, se han observado mayores concentraciones de contaminantes en el interior de medios de transporte que en el ambiente externo, especialmente en vías con configuración de –cañón urbano– y altos flujos vehiculares. Un estudio de interiores de vehículos siguiendo buses –chimenea– detectó concentraciones de hasta 1.200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en vías de cañón urbano. Las concentraciones fueron menores cuando se transitaba por carriles alejados al sistema TM y una configuración más abierta²⁸⁰.

276 Arciniegas, A., Rodríguez, C., Pachon, J., Sarmiento, H., Hernandez, L.J., 2006. Estudio de la morbilidad en niños menores a 5 años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *Acta Nov.* 3, 147-154.

Hernandez, L.J., Medina, K., Cantor, L., Rodríguez, N., Barrera, J., Bayona, J., Aristizabal, G., 2009. Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de 5 años en tres localidades de Bogotá. Bogotá.

Rodríguez, C., Arciniegas, A., Pachón, J., Sarmiento, H., Hernández, L.J., 2006. Relationship between acute respiratory illness and air pollution in Bogotá. *Investig. en Segur. Soc. y Salud* 8.

277 Blanco, L.C., Miranda, V., Hernández, L., Barraza, A., Junger, W., Hurtado, M., Romieu, I., 2014b. Effect of particulate matter less than 10 μm (PM_{10}) on mortality in Bogota, Colombia: a time-series analysis, 1998-2006. *Salud Publica Mex.*

278 Blanco, L.C., Miranda, V., Barraza, A., Junger, W., Hurtado, M., Romieu, I., 2014a. Effect of socioeconomic status on the association between air pollution and mortality in Bogota, Colombia. *Salud Publica Mex.*

279 Franco, J.F., Rojas, N., Sarmiento, O.L., Hernandez, L.J., Zapata, E., Maldonado, A., Matiz, L., Behrentz, E., 2009. Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 101-111.

Hernández, L.J., Aristizabal, G., Salgado, Y., Cantor, L., Medina, K., Reyes, J., 2012. Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de cinco años en tres localidades de Bogotá. *Pediatría (Santiago)*. 45, 124-138. [https://doi.org/10.1016/S0120-4912\(15\)30011-2](https://doi.org/10.1016/S0120-4912(15)30011-2)

Sarmiento, R., Hernandez, L.J., Medina, E.K., Rodríguez, N., Reyes, J., 2015. Síntomas respiratorios asociados con la exposición a la contaminación del aire en cinco localidades de Bogotá, 2008-2011, estudio en una cohorte dinámica. *Biomedica* 35, 167-176.

280 Pachón, J.E., Sarmiento, H., Hoshiko, T., 2013. Health risk represented by inhaling polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) during daily commuting involving using a high traffic flow route in Bogota. *Salud Pública* 15, 398-407.

CONTAMINANTE	MORTALIDAD	EDAD (AÑOS)	DEFUNCIONES ESTIMADAS	COSTE (10 ⁶ US\$)	% PIB BOGOTÁ
PM _{2,5}	Todas las causas	> 30	1.746	1.002	1,1
PM ₁₀	Infantil	< 1	330	190	0,2
O ₃	Todas las causas	> 30	152	88	0,1

Figura 7

Estimación de costos asociados a la contaminación del aire por PM y O₃.

Fuente: Pachon, J.E., Perez-Peña, M., Parra, A., Ramirez, J., Ortiz, B., 2018. Valoración de costos en salud humana asociados a la contaminación del aire en Bogotá.

Otro estudio midió la exposición al PM_{2,5} y carbono negro (BC) en interior de buses TM, encontrando niveles de hasta 500 µg/m³ debidas a las emisiones del propio bus, y de otros buses en el corredor vial, y la ausencia de un sistema de filtración/ventilación en los buses²⁸¹. De forma similar, la exposición de usuarios de carriles de ciclistas en vías de alta congestión vehicular se ha encontrado significativamente alta, por lo que se ha sugerido construir nuevos bici-carriles por vías secundarias²⁸².

Estudios de valoración económica indican que el costo asociado a la contaminación del

aire en Bogotá superó los 1.000 millones de dólares en 2014, lo que representa el 1,1% el Producto Interior Bruto (PIB) de la ciudad²⁸³. Este costo está representado en tasas de mortalidad por enfermedad respiratoria y cardiovascular asociadas a la contaminación por PM y O₃ (ver figura 8). Para Colombia, el costo asociado a la contaminación del aire urbano asciende a 5.133 US\$ para 2015, lo que representa el 1,9 del PIB nacional²⁸⁴. Estudios similares han estimado beneficios en salud y económicos por la reducción de PM en la ciudad.²⁸⁵

281 Morales, R., Galvis, B., Balachandran, S., Ramos-Bonilla, J.P., Sarmiento, O.L., Gallo-Murcia, S.M., Contreras, Y., 2017. Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments. *Atmos. Environ.* 157, 135–145. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.006>

282 Fajardo, O.A., Rojas, N.Y., 2012. Particulate matter exposure of bicycle path users in a high-altitude city. *Atmos. Environ.* 46, 675–679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.047>

283 Pachon, J.E., Perez-Peña, M., Parra, A., Ramirez, J., Ortiz, B., 2018. Valoración de costos en salud humana asociados a la contaminación del aire en Bogotá. *Biomedica* (submitted)

284 DNP-Departamento Nacional de Planeación, 2017. The costs of Environmental Degradation in Colombia. [https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-\\$20,7-billones-.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/Los-costos-en-la-salud-asociados-a-la-degradación-ambiental-en-Colombia-ascienden-a-$20,7-billones-.aspx) (accessed 10.30.17).

285 Castillo, J.J., 2010. Estimación de los beneficios en salud asociados a la reducción de la contaminación atmosférica en Bogotá. Universidad de Los Andes, Reporte MIC-2010-II-5. <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/estimacion-de-los-beneficios-en-salud-asociados-a-la-reduccion-de-la-contaminacion-atmosferica-en-bogota-colombia>
Ortiz-Durán, E.Y., Rojas, N.Y., 2013. Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM10 en Bogotá. *Rev. Salud Publica* 15, 90-102. <https://doi.org/10.15446/rsap>

¿Qué eficacia tienen las medidas aplicadas para mejorar la calidad del aire?

Se han tomado medidas tanto a nivel nacional como local. La mejora de la calidad de los combustibles por parte de la Empresa Colombiana de Petróleos fue una apuesta nacional para contribuir con la calidad del aire. Como se ha citado anteriormente en 2008 se disminuyó el contenido de azufre en el combustible diésel a 50 ppm en todo el país, esto con el fin de mejorar las condiciones de combustión y permitir tecnologías avanzadas para el control de emisiones en fuentes móviles. Previamente en el año 2000 se había reducido el contenido de azufre de 4.500 a 1.200 ppm. Esta situación se ve reflejada en el descenso en las concentraciones ambientales de SO_2 (ver figura 4) y posiblemente también en el PM_{10} (ver figura 4). En cuanto a la gasolina, ésta tiene un contenido máximo de 270 ppm de azufre. Bogotá usa desde el año 2005 gasolina con 8% de alcohol (E8) y biodiesel del 9% (B-9) tal como lo establece la legislación²⁸⁶. El bioetanol para la gasolina es proveniente de la caña de azúcar y el biodiesel (metil/etil) extraído del aceite de palma. El objetivo de los biocombustibles es por

un lado disminuir gradualmente la dependencia por el petróleo, y por otro, disminuir emisiones de gases contaminantes, en especial de CO_2 . En cuanto a los contaminantes críticos urbanos, no existe un consenso sobre el beneficio de los biocombustibles.

A nivel local, tradicionalmente ha existido un control sobre las emisiones de fuentes móviles y fijas. Las fuentes móviles se han controlado con operativos en vía e inspecciones vehiculares que son de obligatorio cumplimiento²⁸⁷. A nivel industrial, se hacen visitas de inspección que pueden resultar en el cierre de establecimientos si no cumplen con los valores normativos²⁸⁸. Es difícil evaluar la efectividad de estas medidas dado el bajo número de vehículos e industrias que es posible evaluar. Sin embargo, estos mecanismos de comando y control han propiciado en el sector industrial la relocalización fuera del perímetro urbano y la sustitución del carbón por gas natural, y en los vehículos, mejores prácticas de mantenimiento preventivo y correctivo.

En 2008 la autoridad ambiental de la ciudad formula el Plan Decenal para la descontaminación del aire PDDAB²⁸⁹ donde se priorizan medidas para reducir los niveles de contaminantes en la atmósfera, en especial, lograr que las concentraciones anuales de PM_{10} en toda la ciudad cumplan el estándar nacional

286 Ley 693 de 2001 por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes y Resolución 40351 de 2017 la cual modifica la mezcla de biocombustible para uso en motores diésel.

287 Res 910 de 2008 por el cual se reglamentan los niveles máximos permisibles de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres, Ministerio de Ambiente, Colombia.

288 Res 909 de 2008 por el cual se reglamentan los niveles máximos permisibles de contaminantes que deben cumplir las fuentes fijas, Ministerio de Ambiente, Colombia.

289 Decreto 98 de 2011 del Distrito de Bogotá.

SDA, 2010. Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. Bogotá D.C. 324pp.

anual de 50 µg/m³ para el año 2020. El PDDAB priorizó seis estrategias para reducir emisiones en fuentes industriales y móviles, a saber:

- Uso de sistemas de control de emisiones de PM en todos los sectores industriales.
- Conversión del 100% de instalaciones industriales que consumen carbón por gas natural, y formalización del 50% de la industria no declarada.
- Instalación de catalizadores oxidativos en todos los vehículos de transporte de carga.
- Instalación de catalizadores oxidativos y sistemas secundarios de inyección de aire en motocicletas con motores menores a 250 cc.
- Implementación del sistema integrado de Transporte Público (SITP) con un esquema continuo de renovación vehicular y chatarrización.
- Instalación de filtros de PM (FPD) en buses de la flota del SITP.

Estas acciones en conjunto permitirían a la ciudad disminuir las emisiones de PM₁₀ de forma que en toda la ciudad se alcanzara en 2020 el estándar normativo de calidad del aire. Desafortunadamente, la implementación de las medidas del PDDAB encontró barreras de tipo técnico, logístico, económico, legislativo, e

incluso social, que han obligado a la autoridad ambiental a revertir dichas medidas y reformular un nuevo plan de descontaminación. Al día de hoy sólo la implementación del SITP sigue vigente. Entre las lecciones que dejó este proceso a la autoridad ambiental está la necesidad de una mayor coordinación inter-institucional a la hora de formular e implementar medidas tendientes a disminuir la contaminación del aire²⁹⁰.

En los últimos años se ha generado una mayor conciencia en la sociedad en el tema de calidad del aire. A nivel nacional, la academia organiza cada dos años el Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública CASAP²⁹¹, que se ha convertido en referente no sólo a nivel país sino también en Latinoamérica²⁹². El evento cuenta con la asistencia de científicos, representantes del gobierno, la empresa privada y las organizaciones no gubernamentales de tal forma que se da cabida a espacios de discusión sobre temas emergentes de contaminación del aire.

A nivel ciudad, el acceso a la información de calidad del aire es vital para generar conciencia en la población. Los registros de la RMCAB pueden ser consultados y descargados por cualquier ciudadano en el portal web de la SDA. Teniendo presente que esta información no es de fácil acceso ni interpretación se han generado dos mecanismos para su socialización. Por un lado, se habilitó el portal web del

290 SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogotá. 120pp.

291 www.casap.com.co

292 Pachón, J.E., 2013. Tendencias en investigación sobre calidad del aire en Colombia a partir de los resultados del IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública (Casap). Epsilon 21, 13-40.

observatorio ambiental de Bogotá²⁹³, donde la población accede fácilmente a indicadores de calidad del aire y salud pública, entre otros temas. Por otro lado, se diseñó el Índice Bogotano de Calidad del Aire²⁹⁴ que a través de una escala numérica y colores permite apreciar el estado de la calidad del aire en la ciudad. También existen iniciativas privadas que propenden por una mayor socialización de la problemática, como el portal web de Gobernanza del aire²⁹⁵.

La promoción del transporte sostenible tiene efectos benéficos tanto en movilidad como en calidad del aire. Bogotá es reconocida mundialmente por su amplio sistema de ciclo rutas, con 465 km de bici-carriles y 141 cicloparqueaderos. Esta infraestructura ha permitido un incremento progresivo en el número de viajes en bicicleta en la ciudad²⁹⁶.

¿Cómo contribuye el gas natural a la mejora de la calidad del aire?

El gas natural es ampliamente usado en la ciudad de Bogotá, por un lado, en el sector residencial, comercial e industrial y por otro lado

en el sector transporte. Si bien su contribución ambiental no ha sido cuantificada, es previsible que parte del mejoramiento en calidad del aire que ha experimentado la ciudad en los últimos años se deba a la sustitución de combustibles como carbón y diésel por gas natural.

En el sector industrial, la ciudad ha impulsado desde hace varios años la sustitución del carbón por gas natural en hornos y calderas, con el fin de disminuir las emisiones contaminantes a la atmósfera. En la actualidad, dos de cada tres instalaciones industriales hacen uso del gas natural, por encima del carbón mineral, diésel, GLP, crudo u otros combustibles. Sin embargo, el panorama es alcanzar un 100% de fuentes industriales operando con gas natural. En el sector residencial y comercial, el gas natural es la principal fuente energética comercial y residencial, por lo que, ante una eventual escasez de este combustible, se prioriza su distribución en los hogares.

En el sector transporte, el gas natural es usado especialmente en taxis y vehículos ligeros tipo sedán y pick-up. En una flota de 65.000 taxis en la ciudad para 2014, un 65% usan gas natural como combustible²⁹⁷, lo cual representa para los conductores un ahorro en el precio del combustible y para la ciudad menores emisiones de contaminantes a la atmósfera. Sin embargo, el beneficio

293 <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/indicadores-por-recurso-natural?v=2&p=21>

294 http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/8091b853a4dfbdf5c477a01ca21b2cd9/pronostico-iboca-bogota.html

295 <https://gobernanzadelaire.uniandes.edu.co/>

296 Cámara de comercio de Bogotá, 2017. Bogotá como vamos: informe de calidad de vida 2016. Bogotá. 371 pp.

297 SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogotá. 120pp.

ambiental podría no ser el esperado, dado que la gran mayoría de estos vehículos no venían originalmente diseñados para su operación con gas natural, y por tanto, han sido convertidos de motores a gasolina. En sistemas de transporte masivo hay un gran potencial de disminución de emisiones al implementar buses y camiones con gas natural.

¿Qué medidas se pueden tomar a corto, medio y largo plazo?

La nueva legislación sobre calidad del aire²⁹⁸ trae retos al país en materia de calidad del aire, al hacer más restrictivos los niveles diarios máximos permisibles de PM_{10} ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2,5}$ ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$), e invalidar el promedio de diferentes puntos de monitoreo para cumplir con la normatividad; la concentración de contaminantes debe evaluarse por cada punto de monitoreo. Las autoridades ambientales deberán realizar planes de descontaminación para alcanzar los nuevos valores normativos. Sin embargo, y a pesar de la evidencia científica, los niveles anuales máximos permisibles de PM sólo serán modificados hasta 2030, con valores PM_{10} ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2,5}$ ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las estrategias desde las cuales se busca mejorar las condiciones de calidad del aire en la ciudad con la redefinición del PDAAB son²⁹⁹:

- Movilidad sostenible: busca un uso racional del vehículo particular, incentivos al transporte público, promoción de fuentes limpias de movilización y respeto a todos los actores en la vía.
- Gestión integral de la energía: busca implementar procesos de reconversión tecnológica y de uso eficiente de los combustibles, así como fuentes renovables de energía.
- Infraestructura urbana: busca mantener una armonía con los espacios naturales, el mantenimiento y limpieza de las vías, así como el manejo adecuado de obras de construcción.
- Fortalecimiento institucional y del marco regulatorio: busca que la ciudad tenga un marco regulatorio apropiado para las fuentes de contaminación presentes con límites de emisión que sean factibles de cumplir. Se busca que los sectores regulados conozcan sus responsabilidades y sean partícipes en su solución.
- Investigación e información en calidad del aire: articulación entre las entidades distritales, el sector privado y la academia en la formulación de políticas integrales de descontaminación del aire.

Si bien estas estrategias presentan el marco global para enfrentar el problema de calidad del

298 Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

299 SDA, 2017. Documento técnico de soporte de modificación del Decreto 98 de 2011. Bogotá. 120pp.

Figura 9

Escenarios de reducción de emisiones respecto a flota vehicular y combustibles.

	FLOTA VEHICULAR ESTADO ACTUAL		FLOTA VEHICULAR RENOVACIÓN	
	Moto / Coche	Autobús / Camión	Moto / Coche	Autobús / Camión
Calidad de combustibles estado actual	CO, COVs, SO ₂ y CO ₂	PM y NO _x	CO (-15%)	PM (-23%) NO _x (-6%)
Calidad de combustibles reformulación	COVs (-27%) CO (-35%) SO ₂ (-92%)	PM (-5%)	PM (-8%) CO (-41%) SO ₂ (-92%) CO ₂ (-19%)	PM (-60%) NO _x (-45%)

Fuente: Pachón, J.E., 2016. Informe final del convenio 5224377 - Evaluar los estados de calidad del aire generados a partir de diferentes escenarios de emisión utilizando el sistema integrado de modelación de calidad del aire de Bogotá - SIMCAB - 480 pp.

aire de la ciudad, queda en la mesa el reto de articularlas en acciones y proyectos concretos, en especial bajo un esquema de concertación con los sectores generadores de las emisiones. Bogotá tiene una oportunidad de reducir sus emisiones de PM mediante la renovación del parque vehicular pesado (buses y camiones). Así quedó evidenciado en un ejercicio de valoración sobre la reducción de emisiones en tres escenarios:

- Renovación vehicular con la calidad del combustible actual.
- Reformulación de combustibles con la tecnología vehicular actual.
- Renovación vehicular a la par de la reformulación de combustibles (ver figura 9).

Los resultados indican que manteniendo la calidad del combustible actual se lograría una

reducción del 25% de las emisiones de PM al renovar la flota vehicular de camiones de la ciudad. Un porcentaje mayor (no cuantificado) se lograría incluyendo renovación de la flota de buses. Por el contrario, reformular los combustibles manteniendo la flota vehicular actual tendría una reducción marginal de PM del 5% (ver figura 9). El escenario de reformular los combustibles a la par de la renovación vehicular en buses y camiones tiene una reducción potencial del 60% en las emisiones de PM, lo que lo convierte en una alternativa interesante a largo plazo, dado el tiempo que toma el montaje de la infraestructura necesaria en refinerías de crudo y sistemas de distribución, además de la consecución de créditos para tal fin. La principal barrera en la renovación del parque vehicular, y en otras medidas de reducción de emisiones, es la ausencia de una evaluación integral de los costos de dichas medidas, en

especial, de los beneficios monetarios por la mejora de las condiciones ambientales y, por ende, de la salud pública. En este sentido, falta un mayor liderazgo de la autoridad sanitaria, quien asume los costos de las externalidades ambientales del sector transporte. Sólo una articulación inter-institucional podría fomentar la inversión de recursos en el sector transporte con el fin de disminuir los costos en el sector salud. Los escenarios de reducción de emisiones planteados anteriormente consideran únicamente el diésel y la gasolina como combustibles de las fuentes móviles. La inclusión de una flota de buses o camiones con gas natural podría representar una reducción importante en las emisiones de PM, una apuesta que han hecho otras ciudades del país.

También una flota eléctrica o híbrida sería de beneficio, teniendo en cuenta que la generación es fundamentalmente hidroeléctrica en el país. Los retos en este campo están en el desarrollo de la infraestructura de recarga y los incentivos económicos que hagan competitivos el costo de esta tecnología frente a la de combustión. Para avanzar en el entendimiento de la dinámica de los contaminantes atmosféricos en la ciudad se requiere investigación en temas relacionados con la composición química del $PM_{2.5}$, perfiles químicos de fuentes fijas y móviles, mayor cobertura de medición de contaminantes mediante sensores de bajo costo, entre otros. Para este propósito es clave una mayor articulación entre la autoridad ambiental y la academia.

Conclusiones

La contaminación del aire: contexto actual, legislación y efectos en la salud

1. La necesidad de mejorar la calidad del aire se deriva del problema de salud pública que suponen sus efectos en la morbilidad y mortalidad prematura, así como los impactos en el medio ambiente y los costes derivados. Así pues, esta necesidad, y el cumplimiento de la legislación derivada de la misma, no es una opción ambientalista o ecologista, sino la obligación de dar respuesta a dicho problema.
2. La contaminación del aire urbano puede presentar niveles, características y orígenes muy diferentes según la región del mundo, así como variar en el tiempo en una misma ciudad (estacionalmente o interanualmente). La cuestión se puede centrar en uno o varios contaminantes, cuyas soluciones requeridas no siempre son las mismas para todos ellos. Por tanto, es importante analizar cada caso con detalle. En este sentido, hemos podido ver cómo se aplican pinturas catalíticas para disminuir la contaminación en una ciudad con problemas de partículas (cuando en teoría, están diseñadas para reducir NO_x), o reducir la velocidad de los vehículos urbanos en ciudades con problemas de NO_x (cuando, también en teoría, la reducción de 50 a 30 km/h reduce el PM de resuspensión, pero incrementa los NO_x).
3. Existen contaminantes con impacto local en una misma ciudad, como NO_x , SO_2 , NH_3 , CO, O_3 , COVs no metánicos, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, metales, HAP, BC, UFP entre otros; y otros que pueden

afectar a la ciudad y a zonas circundantes por el desplazamiento atmosférico del problema generado, como $\text{PM}_{2,5}$, SO_2 , NH_3 , O_3 y COVs no metánicos, entre otros.

4. En la mayoría de las ciudades del mundo, los contaminantes críticos con mayor impacto en la mortalidad prematura son el $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} (casi 400.000 muertes/año en EU-28, según la Agencia Europea de Medio Ambiente), seguidos de los NO_x (75.000) y O_3 (14.000). Es posible que determinadas ciudades y zonas colindantes tengan problemas de NO_x y O_3 , pero cumplan la legislación vigente en PM. Puntualmente, los problemas de HAP, metales o SO_2 pueden ser también muy relevantes.
5. La legislación europea en materia de calidad del aire es similarmente restrictiva a las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el NO_2 (con valores guía que realmente protegen a la población), pero mucho más permisiva para $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} . También lo es para B(a)P, SO_2 y O_3 . Para muchos de estos parámetros, los valores límite u objetivo fueron fijados a finales de la década de 1990 y no se han modificado desde entonces. Existe pues una clara necesidad de aproximarse a los valores guías de la OMS para forzar así a una reducción de los contaminantes con mayor impacto en la mortalidad ($\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10}).
6. Al revisar los inventarios de emisión oficiales de la Unión Europea queda patente, que en el caso de los NO_x , el tráfico rodado es una de las fuentes principales de NO_2 , tanto por su proporción en el volumen anual de emisiones, como por la proximidad a los ciudadanos. Para $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10}

primario, el uso de combustibles sólidos (carbón y biomasa) en focos domésticos y residenciales es la primera fuente. No sucede lo mismo con las fuentes de $PM_{2,5}$ en todas las ciudades de Europa, ya que para muchas el tráfico rodado representa en aire ambiente entre 20% y 35% (2/3 debidos a las emisiones de los motores y 1/3 al desgaste de frenos y ruedas). Es importante resaltar que para disminuir realmente los niveles de $PM_{2,5}$, se ha de actuar sobre el tráfico rodado, pero también sobre otros focos emisores de gases precursores de $PM_{2,5}$ secundario, especialmente NH_3 (mayoritariamente derivado de la agricultura y ganadería) y NO_x (del tráfico e industria/ generación eléctrica), dado que alrededor del 70% del $PM_{2,5}$ se origina en la atmósfera por reacción de gases precursores.

7. Para reducir los niveles de O_3 también se tienen que disminuir los niveles de sus precursores (NO_x y $COVs$), tanto del tráfico rodado, como de la industria y la generación eléctrica.
8. El caso del B(a)P constituye un problema en aumento en Europa, y mayoritariamente se suele asociar al uso de combustibles sólidos en calderas domésticas y residenciales en países sin un despliegue normativo adecuado de certificación de calderas y combustibles de bajas emisiones.
9. En España, pese a que en los últimos años se han realizado importantes esfuerzos para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, aún persisten determinados problemas en la calidad del aire en lo referente sobre todo a NO_2 y PM_{10} , y se concentran principalmente en zonas urbanas y suburbanas. El caso del O_3 troposférico requiere especial atención. Su

problemática afecta a gran parte del país, siendo esta afectación especialmente relevante en las zonas central, oriental y sur, debido a la especial complejidad de este contaminante y a las características climatológicas de estas zonas. Por ello deben llevarse a cabo, en todos los ámbitos administrativos que sea posible, medidas para mejorar el conocimiento de este contaminante y proporcionen una base sólida sobre la que fundamentar la toma de decisiones encaminada a reducir los niveles de O_3 troposférico. El problema del B(a)P está muy ligado a zonas rurales, donde se utilizan calderas de biomasa sin certificación adecuada para reducir emisiones.

10. La evolución de las emisiones de los vehículos diésel en materia de PM ha sido muy positiva de manera que un turismo diésel de 1997 emitía PM como 35 equivalentes actuales. Sin embargo para NO_x esta tendencia no ha sido adecuada y los cambios tecnológicos de la flota no permiten que se respeten los valores límite de protección a la salud humana en muchas ciudades europeas. La electrificación de la flota colaborará a reducir el problema pero no con la rapidez que exige el resolver el problema legal de incumplimiento del NO_2 urbano. Dada la elevada dieselización del parque actual de vehículos que circulan por entornos urbanos, y el problema de sus emisiones de NO_x , la solución pasa por reducir el número de vehículos circulantes en nuestras ciudades, tal como han hecho ya gran cantidad de ciudades europeas. En Europa, muy probablemente, se va a reducir significativamente el porcentaje de vehículos con motor diésel en favor de los de gasolina. Sin embargo, esto será tanto por sus menores emisiones, como por el precio que los turismos diésel deberán alcanzar para cumplir

la norma Euro 6d. Este incremento de precio favorecerá a los híbridos de gasolina, que si bien actualmente están sometidos a limitaciones de emisiones contaminantes iguales a las de los no híbridos, la potencialidad de reducción de CO₂ es mayor. Asimismo, en el futuro podrán establecerse límites a las emisiones de CO, HC y NO_x más bajas que las de los vehículos de propulsión convencional. La implantación de propulsión híbrida con motores diésel en vehículos ligeros es, sin embargo, poco probable por su elevado coste. También cabe resaltar el potencial de reducción de emisiones y consumo de gas natural como combustible, así como de ciertos combustibles sintéticos, en áreas urbanas, aunque no cambia sustancialmente la tecnología de motor y postratamiento, será una opción razonable en la extensión de vida de los motores de combustión interna en el sector del transporte.

Planes de mejora de la calidad del aire y propuestas de actuación

1. Los planes de mejora de la calidad del aire son agrupaciones de actuaciones necesarias para dar respuesta a un problema de incumplimiento legal de los umbrales de protección a la salud humana. En Europa, el artículo 23 de la directiva 2008/50/CE especifica que *'Cuando, en determinadas zonas o aglomeraciones, los niveles de contaminantes en el aire ambiente superen cualquier valor límite o valor objetivo, así como el margen de tolerancia*

correspondiente a cada caso, los Estados Miembros se asegurarán de que se elaboran planes de calidad del aire para esas zonas y aglomeraciones con el fin de conseguir respetar el valor límite o el valor objetivo correspondiente especificado en los anexos XI y XIV'. Se hace necesario resaltar aquí que legalmente esta norma no solamente solicita la lista y descripción de todas las medidas recogidas en el plan, sino el calendario de ejecución, y de manera muy importante, las 'estimaciones acerca de la mejora de la calidad del aire prevista y del plazo necesario para la consecución de esos objetivos' (Anexo XV, 2.8). Remarcamos que no es suficiente cuantificar la reducción de emisiones derivada de la aplicación de las medidas, sino demostrar que éstas van a permitir no superar los objetivos de calidad del aire en un plazo determinado. Este apartado es el que va a permitir a la Comisión Europea evaluar si las medidas son o no suficientes para afrontar con éxito el problema planteado.

2. En cuanto al tráfico rodado, se propone una estrategia de mejora de calidad del aire urbano (capítulo 7) basado en los siguientes 6 tipos de actuaciones básicas.

- Oferta de un transporte público eficiente, rápido, cómodo, económico y ecológico;
- Reducción del número de vehículos circulantes en la ciudad (a lograr mediante peajes urbanos, como Estocolmo y Milán); aparcamientos disuasorios periféricos y en nodos importantes de transporte público; reducción de plazas de aparcamiento (únicamente para residentes); restricciones de la circulación de matrículas pares/impares en las

zonas afectadas (únicamente en episodios de contaminación, en este caso);

- Renovación del parque de vehículos que tengan que acceder al centro (zonas de bajas emisiones, ZBEs, muy eficientes para reducir las emisiones de PM, pero no para NO₂) acompañada de medidas tales como la electrificación e hibridación del parque urbano circulante. Las ZBEs y la electrificación deberían afectar también a las motocicletas, en especial en ciudades con una alta proporción de ellas en la flota urbana (por ejemplo, Barcelona, con casi un 30%);
 - Una logística de distribución urbana de mercancías y taxis que incluya criterios ambientales, tales como potenciar preferentemente la electrificación, hibridación y gasificación de dichos vehículos, crear micro-plataformas logísticas de distribución con vehículos de bajas emisiones, incentivar el reparto nocturno, asegurar que los establecimientos comerciales tengan espacio de almacenaje grande para reducir la frecuencia en las recepciones, y evitar la circulación de taxis vacíos;
 - Transformaciones urbanísticas de la ciudad para alejar sus habitantes del tráfico rodado, y reducir así su exposición a la contaminación: preferencia a carriles-bici (seguros y alejados del tráfico), peatonalizar, crear o agrandar zonas verdes, y en definitiva reducir el espacio del tráfico rodado en aras del incremento de otros usos del territorio, como es el caso de las 'super-manzanas' implementadas en Barcelona;
 - Otras medidas de prevención y remediación adicionales a las anteriores.
- 3.** El empleo de combustibles más limpios en el transporte público es una necesidad, en tanto se consiguen los avances técnicos necesarios para que la movilidad eléctrica se implante definitivamente en los conglomerados urbanos. Es deber de las grandes empresas de transporte urbano promover la movilidad sostenible con actuaciones dirigidas a mejorar la calidad del aire local, no solo actuando sobre la flota, sino también formando a su personal y diseñando instalaciones eficientes y que consuman energía de origen renovable. También es su deber y el de los municipios dirigir las acciones hacia la descarbonización del transporte urbano, comenzando por la modificación de los hábitos de movilidad de los ciudadanos, disminuyendo la dependencia en vehículo privado y promocionando el uso del transporte público. La primera y principal medida a implantar en una ciudad y, sobre todo en un área metropolitana, es tener un transporte público rápido, económico, ecológico y confortable, para poder asumir el cambio de modalidad en la movilidad que es necesario en la mayoría de nuestras ciudades.
 - 4.** Las medidas sobre el sector doméstico y residencial requieren de un despliegue normativo tanto en lo referente a la obligatoriedad de certificación de calderas de combustibles de baja emisión, como al origen natural y la humedad y cenizas de los pellets para reducir las emisiones de este sector. No obstante, sería muy conveniente no autorizar la instalación de calderas de combustibles sólidos en entornos urbanos con altos niveles de PM. Además, las medidas de climatización de los edificios y viviendas son también clave para reducir las emisiones, de NO_x de calefacciones en invierno y del consumo

eléctrico de aires acondicionados en verano. A resaltar también que en estudios relativamente recientes se ha demostrado que en entornos urbanos densos, las emisiones de las cocinas suponen aproximadamente un 15% de la materia orgánica que contiene el PM. Al ir disminuyendo las emisiones de otras fuentes, es posible que en un futuro no muy lejano estos focos de emisión deban ser tenidos en cuenta a la hora de aplicar medidas de mejora de calidad del aire.

5. La evaluación de las emisiones de los sectores energético, industrial y residencial a nivel global muestra que estas contribuyen en gran medida al empeoramiento de la calidad del aire, si bien las medidas que se requieren para disminuir su impacto varían muy ampliamente en diferentes regiones del mundo. A modo de ejemplos, mientras que en algunas aún siguen siendo un problema las emisiones de la combustión en cocinas y calefacciones, en otras la mejora radica en implementar catalizadores para reducir NO_x en vehículos y focos industriales y de generación eléctrica. La Agencia Internacional de Energía (IEA) describe un Escenario de Aire Limpio que debe aplicarse en base a un amplio abanico de políticas, que entre otras incluirían las siguientes:

- Asegurar el acceso de toda la población a cocinas limpias para así reducir el uso de las cocinas de biomasa ineficientes y sus emisiones de $\text{PM}_{2,5}$;
- Elevar la exigencia y hacer cumplir de manera estricta los estándares de emisiones en el transporte rodado, especialmente en las ciudades, con el propósito de reducir la contaminación por NO_x ;

- Controlar las emisiones e impulsar el cambio de combustible en el sector de generación de calor y electricidad (poniendo especial atención a la sustitución del carbón por el gas natural), e incrementar la eficiencia en el sector industrial, para de este modo recortar las emisiones de SO_2 .

Según la IEA, las inversiones adicionales necesarias para implementar las medidas contempladas en el Escenario Aire Limpio son factibles. La sustitución por gas natural de otras fuentes energéticas primarias, principalmente carbón, fueloil y gasoil, constituye una medida de gran potencial positivo para reducir emisiones de PM y SO_2 . Un razonamiento análogo puede seguirse en el caso de las emisiones contaminantes de NO_x , muy ligadas al sector del transporte y que podrían rebajarse sustancialmente favoreciendo el despliegue, tanto en el caso del tráfico rodado como en el marítimo, de motores de gas natural, en vez de los alimentados por derivados del petróleo abrumadoramente mayoritarios en la actualidad. Y algo similar ocurre con el PM emitido, en gran parte, por los sectores residencial e industrial, donde el gas natural podría ser un sustituto ideal para fueloil, biomasa y carbón. Obviamente, la utilización del gas natural no constituye por sí solo un remedio infalible para combatir el grave problema de la calidad del aire en el mundo. Sin embargo, enmarcado en el conjunto de medidas, sí constituye una parte importante de la solución. La sustitución de la energía de combustibles sólidos y no sólidos por la renovable, y el incremento de la eficiencia energética (tanto en su producción como en su uso), deben tener sin duda uno de los papeles principales en la reducción de la contaminación atmosférica y del impacto climático.

6. Respecto a las medidas sobre el sector industrial y de generación eléctrica en Europa, las grandes instalaciones de estos sectores tienen normativas específicas que regulan sus emisiones de contaminantes atmosféricos (1996/61/EC, 2008/1/EC, 2010/75/EC, 2001/80/CE, EU 2015/2193, entre otras). No obstante, a escala urbana se evidencian una serie de necesidades con respecto a los planes de mejora sobre el sector industrial, de las que destacamos las siguientes:

- La contribución del sector industrial a los niveles en aire ambiente de PM_{10} y $PM_{2.5}$ alcanzan en muchos entornos urbanos el 20%, en gran parte debido a los aportes de PM secundario (generado en la atmósfera a partir de gases precursores). Por tanto se requieren medidas que afecten no solamente a las de PM primario si no a gases reactivos (SO_2 , NO_x , NH_3 y COVs);
- La baja proporción de focos tratados con sistemas de reducción de emisiones de NOX en estos sectores en el sur de Europa, donde los problemas de O_3 son especialmente acentuados, es especialmente relevante en cuanto a impacto en calidad del aire si tenemos en cuenta que los NO_x son precursores de O_3 ;
- Las emisiones fugitivas (aquellas no canalizadas, sino producidas por resuspensión, manipulación de materiales pulverulentos, desmoldes, entre otros) pueden ser muy relevantes en el sur de Europa, por el ambiente predominantemente seco que favorece estas emisiones;
- En la mayor parte de las ciudades es necesaria una mejora de los inventarios de emisiones industriales.

Además, generalmente se requieren actualizaciones de las actividades afectadas y controladas por la directiva de emisiones industriales, pero sobre todo aquellas que, por sus tamaños reducidos (pero generalmente numerosos), no están afectadas, y con una evaluación control de sus emisiones muy reducidas. Es importante remarcar la gran importancia de las instalaciones de pequeño tamaño, tanto de generación eléctrica como industriales, cuyo permiso de actividades reside en la administración local, la cual en muchos casos no tiene posibilidades de realizar controles de emisiones o de imponer requisitos clave para la reducción del impacto ambiental. En muchos entornos urbanos, estos focos no están incluidos en los inventarios de emisión y no tienen un control adecuado de instalación de mejores técnicas disponibles (MTDs) para reducción de emisiones. Por tanto, se deben realizar esfuerzos importantes para corregir esta situación. También resaltaremos aquí la importancia de un control adecuado de las actividades y MTDs del sector construcción en obra pública y privada.

7. En las zonas portuarias debemos considerar los siguientes focos de emisión de contaminantes con posible impacto en calidad del aire:

- Las emisiones de los motores de los buques, durante la espera, la aproximación y en amarre (la obligación de uso de combustibles con bajos contenidos en azufre y alto poder calorífico, el uso de equipos de tratamiento de gases de combustión, la gasificación de buques y la electrificación de puertos para suministrar energía a los buques amarrados, son las medidas utilizadas en puertos europeos avanzados en temas ambientales);

- En puertos graneleros, un foco importante de emisión es la carga, descarga y manipulación de graneles (existen una serie de MTDs al respecto para reducir dichas emisiones, tales como tolvas anti-polvo, carga y descarga en lecho fluido, pantallas cortavientos, o construcción de recintos cerrados para manipular graneles como la Medusa del puerto de A Coruña);
 - La maquinaria pesada de carga y descarga, los generadores eléctricos y los vehículos portuarios son focos importantes de emisión de contaminantes atmosféricos y deben tenerse en cuenta para los planes de mejora de calidad del aire (la electrificación y gasificación de los vehículos y la aplicación de filtros de PM y catalizadores para NO_x en la maquinaria pesada, y la exigencia de EURO 5 y 6 para camiones son medidas relevantes en este sector);
 - El tráfico de vehículos asociados a los ferris y cruceros (taxis, autobuses, vehículos de entrega de mercancías y recogida de residuos, entre otros) es muy denso en áreas portuarias, y debe tenerse en cuenta en los inventarios de emisión y aplicarse medidas para reducir sus emisiones.
- 8.** Los aeropuertos presentan también focos muy diversos de contaminación. Además del muy intenso tráfico rodado asociado, y de los vehículos y maquinaria aeroportuaria (asimilable a las emisiones de los apartados c) y d) de los puertos) las aeronaves son focos importantes de NO y partículas ultrafinas (UFP). En el primer caso, sus emisiones pueden tener relevancia en la contribución a emitir precursores de O_3 . En el segundo, su impacto en la calidad del aire de ciudades próximas ha sido descrito en

Europa y Australia. La reducción de emisiones de las aeronaves está limitada por problemas de seguridad y no ha habido avances relevantes en las últimas décadas.

- 9.** Con respecto a las medidas en el sector agrícola, las emisiones pueden producirse a mucha distancia de entornos urbanos pero afectar la calidad del aire de los mismos, sobre todo por su impacto en la emisión de PM (quemados de residuos agrícolas, rastrojos, pastos) o por favorecer la generación secundaria de $\text{PM}_{2,5}$ en la atmósfera en entornos con elevados niveles de NH_3 (94% emitido por el sector agrícola y ganadero en Europa). Además, la quema de rastrojos y de residuo de poda (generalmente permitida en condiciones de viento bajo, cuando su impacto en la calidad del aire se acentúa) puede contribuir decisivamente a incrementar en gran medida los niveles de $\text{PM}_{2,5}$ y B(a)P, y la resuspensión de partículas del suelo durante prácticas agrícolas puede tener también un efecto negativo en los niveles de PM_{10} . Es por ello que se debe actuar sobre dichos focos para reducir las emisiones.

Experiencias y casos prácticos

Vehículos a gas natural en Barcelona y Madrid

Si se introdujeran los vehículos a gas natural en sustitución de aquellos ya existentes (que utilizan gasolina, y especialmente gasóleo), los resultados evidencian una mejora de los niveles de NO_2 y

PM₁₀ para una alta proporción de sustituciones. Los resultados obtenidos en los escenarios que suponen la modificación de los autobuses urbanos e interurbanos y de los vehículos pesados de transporte de mercancías son, sin embargo, menos relevantes. Son destacables las reducciones de emisiones de SO₂ y PM en estos escenarios, debido a la gran influencia que tienen los vehículos pesados diésel en el total de emisiones de dichos contaminantes.

Berlín

Hace 30 años era una de las ciudades con más problemas de contaminación de Europa en cuanto a SO₂, PM y C₆H₆. Partiendo de esta posición se aplicaron medidas a finales de los años 1980 y los 1990 que le permitieron mejorar mucho la calidad del aire hasta convertirse en una ciudad con un aire más limpio que muchas de las ciudades europeas. El problema de incumplimiento normativo de los niveles de protección de la salud humana se centra en NO₂ y O₃, aunque en el caso de PM₁₀ y PM_{2,5} si bien se cumplen los límites legales, no los de las guías de protección a la salud de la OMS. Se expone que para reducir los niveles de O₃, PM₁₀, PM_{2,5} son necesarias políticas a nivel nacional y Europeo, pues gran parte del problema proviene de aportes transfronterizos a la ciudad. No obstante, las medidas locales pueden ayudar a mejorar la situación claramente como, por ejemplo: la reducción de NO_x y COVs emitidos localmente para reducir los niveles de O₃; la aplicación de filtros de partículas a la maquinaria de construcción diésel para reducir PM₁₀ y PM_{2,5}; la reducción de la re-suspensión del

tráfico y de las emisiones de abrasión mecánica de freno, ruedas y firme de rodadura para PM₁₀; y la reducción de las emisiones residenciales y comerciales de calefacciones de biomasa para PM_{2,5} y PM₁₀. Se expone que el problema del NO_x está causado por el tráfico rodado en un 80%, y que, de todos los vehículos, los turismos diésel y los vehículos de reparto de mercancías suponen un 50% del mismo. Se evidencia que el problema tiene soluciones complejas debido al fallo de la política europea en el control de las emisiones de NO_x de los vehículos. Mientras las zonas de bajas emisiones han funcionado bien para reducir PM_{2,5}, dicho fallo no ha permitido que esta herramienta sea aplicable con éxito para el NO₂. Para solucionarlo, se propone extender las prohibiciones de circulación (en zonas de bajas emisiones), de manera selectiva para los vehículos diésel más contaminantes en NO_x (que pueden llegar a ser relativamente nuevos), acompañado de:

- Exenciones para vehículos diésel nuevos que cumplan con la nueva norma Euro 6d basada en emisiones reales de circulación;
- Excepciones para vehículos en uso adaptados con un sistema certificado de pos-tratamiento de NO_x en gases del motor mediante sistemas SCR o similares;
- Exenciones por tiempo limitado para vehículos en los que no se dispone de ninguna opción de retro-adaptación;
- Y creación de una nueva identificación-etiqueta para identificar vehículos limpios en lo referente a NO_x.

En referencia a este último punto, recientemente la Corte Suprema Administrativa de Alemania ha manifestado la posibilidad de legalmente aceptar la prohibición de la circulación de vehículos diésel, incluso para los relativamente nuevos EURO 5 a partir de septiembre de 2019. Ello dará pie a poder demostrar el posible efecto real de los vehículos teóricamente menos contaminantes Euro 6. También se plantea añadir una nueva ecoetiqueta que identifique los vehículos que realmente emiten bajos niveles de NO_x, incluidos los diésel que realmente lo hacen. También se plantea añadir una nueva eco-etiqueta que identifique los vehículos que realmente contaminan poco en NO_x, incluidos los diésel que realmente lo hacen.

Milán

La capital de la región de Lombardía en Italia y situada el valle del Po, tiene unas características orográficas y meteorológicas que determinan condiciones de dispersión, a menudo muy pobres. A pesar de una reducción progresiva de las concentraciones de contaminación, éstas exceden a menudo los valores límite normativos de calidad de aire de la UE para PM₁₀, PM_{2,5}, O₃, NO₂ y B(a)P. Es remarcable que, una vez más, los contaminantes secundarios tienden a superar a los primarios en cuanto a contribuciones a los niveles de PM_{2,5} y PM₁₀. Se han impulsado importantes acciones para reducir las emisiones, pero aún queda mucho por hacer. Para mejorar la calidad del aire, es fundamental reducir las emisiones primarias de PM, NO_x y B(a)P, pero también las de COVs y NH₃, por su contribución a la generación

de contaminantes secundarios. Los sectores clave son los vehículos diésel (automóviles, furgonetas, autobuses y camiones), la quema de biomasa y la generación de residuos ganaderos (estiércoles y purines) y de su aplicación como fertilizantes, además de las emisiones industriales. Para alcanzar los resultados esperados, es necesario trabajar en todos los niveles, a escalas europea, nacional, regional y local, con el fin de adoptar las mejores tecnologías disponibles, impulsar técnicas adicionales y cambiar las pautas de movilidad urbana, con el fin de alcanzar un desarrollo sostenible que mejore no solo la calidad del aire, sino la calidad de vida urbana.

México

Esta ciudad es un claro ejemplo donde las actuaciones en materia de política ambiental han permitido mejorar claramente la calidad del aire en las dos últimas décadas. De este modo, contaminantes como SO₂ y CO, ya no suponen un problema en cuanto al cumplimiento normativo de los respectivos valores límite nacionales. Sin embargo, como en todas las ciudades incluidas en este monográfico de calidad del aire, los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5} siguen siendo elevados, así como los de NO₂ y O₃, por lo que son necesarias nuevas actuaciones para continuar mejorando la calidad del aire. Las soluciones en el caso de la ciudad México y su zona metropolitana requieren replantear el ordenamiento territorial y buscar un desarrollo urbano que minimice los daños en la salud de los habitantes y en los ecosistemas. La zona metropolitana se debe configurar en

una urbe inteligente y baja en emisiones para lograr también un ahorro neto del consumo de energía, con sistemas de generación de energía renovable, contribuyendo de este modo a la acción contra la contaminación atmosférica y el cambio climático. Así pues, es necesaria una combinación de medidas tecnológicas (vehículos, generación eléctrica, industria) y no-tecnológicas (planificación urbana y de la movilidad) a corto, medio y largo plazo que permitan reducir la exposición a la contaminación de los 23 millones de habitantes de la zona metropolitana. Estas medidas deberían extenderse también a otras ciudades del país, donde el grado de implementación de actuaciones para la mejora de la calidad del aire es probablemente inferior a la de la capital.

Santiago de Chile

Esta ciudad se ubica en un valle cuyas características geográficas dificultan la circulación del viento y la renovación del aire, como ocurre en Milán y la cuenca del Po. En la década de los noventa, las causas de la contaminación se atribuían principalmente al uso de leña para calefacción, a las emisiones del transporte público y privado, así como a la actividad industrial en la región metropolitana y sus alrededores, que principalmente quemaba petróleo diésel y carbón. A partir de esa década se impulsan políticas públicas entorno a la contaminación ambiental que facilitaron la sustitución de parte de los citados combustibles por el gas natural. Paralelamente a ello y a otras medidas ambientales, en el período 1990-2016 se reportan reducciones del 39% para el PM_{10} y 58% para

el $PM_{2,5}$. Estudios específicos han demostrado que entre 1998 y 2012 las fuentes industriales redujeron sus contribuciones en $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media de $PM_{2,5}$, en gran parte atribuible a la reducción del contenido de azufre en el diésel y al cambio de diésel a gas natural como combustible industrial, entre otras medidas. A pesar de la mejora alcanzada, aún se exceden los promedios máximos de PM_{10} y $PM_{2,5}$ establecidos como niveles aceptables por la legislación chilena, por lo que se requieren con urgencia medidas adicionales para evitar dichas superaciones.

Bogotá

El crecimiento económico y el incremento de la población conllevan un consumo desmesurado de recursos naturales y fuertes impactos en el ambiente. El aire de la ciudad se deteriora con la emisión de miles de vehículos e industrias que consumen combustibles fósiles y arrojan partículas y gases contaminantes a la atmósfera. Una espesa capa oscura se levanta a diario sobre la ciudad, signo innegable de la contaminación y de la ausencia de medidas de control en las fuentes generadoras de emisiones. Este aire insalubre enferma a niños y adultos, especialmente en zonas de estratos económicos bajos, creando una situación de injusticia ambiental en la ciudad. El principal contaminante del aire en Bogotá es el PM, cuya composición química es mayoritariamente carbonácea y mineral. En los últimos años se ha logrado una reducción en la concentración de este contaminante en la atmósfera gracias a acciones tomadas

a nivel nacional y local, como la mejora de la calidad de los combustibles y la organización del transporte público. Sin embargo, aún faltan más acciones de prevención y control de la contaminación del aire. Una adecuada calidad del aire sólo será posible en la ciudad en el marco de una articulación interinstitucional, donde la autoridad ambiental pueda generar

un plan de descontaminación con la participación activa de diversos ámbitos y sectores (salud, movilidad, infraestructuras, energía, planeamiento urbano...). Ello debe ir acompañado de un compromiso por parte de los sectores generadores de las emisiones, y un seguimiento por parte de una ciudadanía, consciente y ambientalmente responsable.



www.fundaciongasnaturalfenosa.org