

ESTADO DE LA CUESTIÓN:

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD

n.2



OBSERVATORIO DKV DE SALUD Y MEDIO AMBIENTE EN ESPAÑA 2010

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD

EDITA Y REALIZA: DKV SEGUROS

COLABORA: **ECODES** FUNDACIÓN ECOLOGÍA Y DESARROLLO

DISEÑO GRÁFICO: EQUIPO DE DISEÑO DE DKV SEGUROS

IMPRESIÓN: TREBALLS GRÀFICS SA

DEPÓSITO LEGAL:



DKV SEGUROS ha calculado y compensado las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por su actividad durante el año 2009. También ha adquirido un compromiso de seguir reduciendo sus emisiones de GEI. La obtención del sello acredita un estatus "CeroCO₂" para DKV Seguros.



Este impreso está realizado sobre papel reciclado. DKV Seguros colabora en la conservación del medio ambiente, uno de los factores determinantes para el mantenimiento de la salud de la población.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	5
CAPÍTULO 1	
LAS CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	
Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS MÁS IMPORTANTES	9
CAPÍTULO 2	
LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	
SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS Y LAS POBLACIONES	21
CAPÍTULO 3	
ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE	
EN ZONAS URBANAS	35
CAPÍTULO 4	
ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN: LOS PROGRAMAS DE REDUCCIÓN	
DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA MEJORAN LA SALUD DE LA POBLACIÓN	53
BIBLIOGRAFÍA, REFERENCIAS Y DOCUMENTACIÓN BÁSICA	65
GLOSARIO DE TÉRMINOS	66
CURRÍCULA DE LOS AUTORES	69



PRESENTACIÓN

JOSEP SANTACREU BONJOCH. CONSEJERO DELEGADO DKV SEGUROS. OCTUBRE DE 2010

A lo largo de más de una década, la responsabilidad empresarial ha sido un eje estratégico en la actuación de DKV Seguros, una herramienta clave en la relación con nuestros grupos de interés para innovar y, por supuesto, para aportar nuestro grano de arena a la construcción de una sociedad más justa. Y, como parte activa de nuestro día a día, la responsabilidad empresarial en la compañía no ha dejado de evolucionar y adaptarse a la realidad del momento.

Este año, la compañía ha querido dar un paso más adoptando un nuevo enfoque de la responsabilidad empresarial mucho más orientado a iniciativas y acciones relacionadas con la salud: el plan Salud 360°. De esta forma, nos guiamos por la definición de salud como “un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente como la ausencia de afecciones o enfermedades”, tal y como proclama la OMS.

Con Salud 360°, la compañía pretende acercarse a las nuevas singularidades del mundo de la salud, el bienestar de la población y la calidad de vida. Una reorientación natural y obvia, ya que como expertos en seguros médicos, podemos aportar al ámbito de la responsabilidad empresarial nuestro conocimiento y experiencia en el campo que mejor conocemos.

De esta manera, el nuevo enfoque destaca el compromiso de DKV en tres ámbitos clave: la salud del profesional, la salud de la empresa y la salud de la sociedad. Cada uno se desglosa hasta formar distintos ejes de actuación, como son la Salud del Empleado, la Salud del Colaborador (mediadores y profesionales sanitarios), la Salud del Cliente, la Salud de la Empresa, la Salud del Planeta, Salud e Integración y Promoción de la Salud.

El Observatorio de Salud y Medio Ambiente encaja a la perfección en este escenario. Como parte de los programas de Salud del Planeta y Promoción de la Salud, esta colección pretende crear un espacio de reflexión e intercambio que permita identificar el estado de la cuestión y servir para la puesta en común entre los especialistas sobre salud y medio ambiente.

Adaptándonos a las nuevas inquietudes sociales, pretendemos proporcionar al público general una herramienta útil para promover una mejora en la calidad de vida de las personas. Asimismo, el sector sociosanitario encontrará en el Observatorio de Salud y Medio Ambiente un documento útil sobre los determinantes ambientales de la salud y los efectos sobre ella de la contaminación ambiental, así como los técnicos de medio ambiente y sostenibilidad sobre el control ambiental en la defensa y mejora de la salud humana.

En esta segunda edición, abordamos un tema de gran actualidad: la relación entre la calidad del aire que respiramos y la salud humana. Cada día una persona respira de media un volumen de aire de 12.000 litros (12 m³). La calidad de ese aire, que puede estar contaminado por el tráfico, el transporte, la industria y otras actividades, determina sin duda nuestra salud.

Los profesores Julio Díaz y Cristina Linares realizan en el primer artículo la necesaria introducción al tema, sentado las bases de qué es contaminación atmosférica y el alcance que le damos en esta publicación, así como otros conceptos básicos: emisión, inmisión, contaminantes primarios y secundarios, dispersión, etc. A continuación presentan un análisis de los principales contaminantes atmosféricos, sus principales fuentes y las reacciones atmosféricas implicadas en su presencia.

Los profesores Ferran Ballester y Elena Boldo abordan la cuestión a través de dos artículos, el segundo y el cuarto de esta publicación. El segundo trata directamente los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de las personas y las poblaciones, realiza un recorrido histórico sobre los episodios más importantes, describe los estudios epidemiológicos que pueden realizarse para conocerlos y apunta las evidencias y mecanismos de daño sobre la salud, así como los grupos más vulnerables.

El profesor Xavier Querol en el tercer artículo realiza un exhaustivo y sistemático esfuerzo para describir y analizar medidas preventivas de reducción de emisiones en dos ámbitos principales: el tráfico rodado urbano (primera causa de contaminación atmosférica) y las emisiones de la construcción y demolición, ámbito este último menos conocido y más novedoso, pero de gran importancia como causante de altos niveles de contaminación atmosférica en algunos lugares.

El cuarto artículo indaga en los estudios de intervención y cómo los programas de reducción de la contaminación atmosférica mejoran la salud de la población, que resumen en una contundente frase “Aire más limpio... ¿más salud? Indiscutiblemente, sí”. Con esta rotundidad, se repasan diversas intervenciones que consiguieron la reducción de la contaminación atmosférica e implicaron una mejora en la salud de las poblaciones.

Al hilo de esas intervenciones concretas se desgranar también algunas estrategias posibles en el ámbito del control de la contaminación de vehículos motorizados, y otros ámbitos, para acabar reseñando una herramienta de gestión, la Estrategia Temática de Reducción de la Contaminación Atmosférica en Europa, un reto de aquí a 2020, así como una llamada a la responsabilidad de todos para reducir las emisiones al aire.

Los artículos recogidos en la obra aportan conocimiento, rigor, soluciones y líneas de trabajo positivas e invitan a un cambio de actitud a nivel individual, colectivo y social que nos permita crear entre todos entornos más saludables, libres de contaminación atmosférica, que fomenten y promuevan la salud y protejan nuestro entorno.

Queremos darte las gracias por confiar en el Observatorio de Salud y Medio Ambiente DKV Seguros un año más. Deseamos que disfrutes y aprendas tanto con su lectura, como los editores en su preparación.



ESTADO DE LA CUESTIÓN:

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD

Cada día una persona respira de media un volumen de aire de 12.000 litros (12 m³). La calidad de ese aire que respiramos, y que puede estar contaminado por el tráfico, el transporte, la industria y otras actividades, determina sin duda nuestra salud. El Observatorio DKV de Salud y Medioambiente se edita por segundo año con el objetivo de contribuir a un mayor conocimiento de la relación existente entre medio ambiente y salud. En este segundo número se analiza cómo la contaminación atmosférica afecta a la salud de las personas.

CAP 1. CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS MÁS IMPORTANTES



CAP 2. EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS Y LAS POBLACIONES

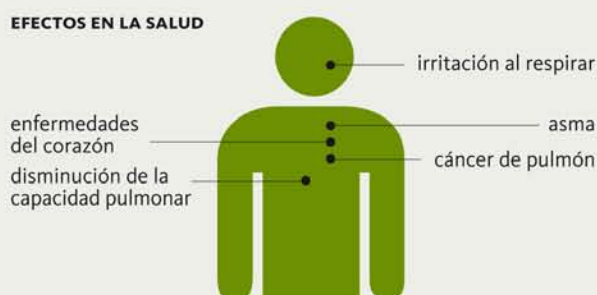
GRUPOS VULNERABLES



ORIGINA 2 millones de muertes/año en el mundo



EFECTOS EN LA SALUD



CAP 3. ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS URBANAS

TRÁFICO Y TRANSPORTE



- Restricciones de tráfico
- Renovación de vehículos
- Ampliación zonas peatonales
- Fomento de vehículos ecológicos (bici, travía...)

CONSTRUCCIÓN



- Comenzar la obra contra el viento dominante
- Cubrir zonas finalizadas con vegetación
- Evitar quema materiales
- Barreras contra el viento
- Controlar cantidad barro

DEMOLICIÓN



- Reducir la altura de desplome de materiales.
- Uso de aspersores de agua para reducir polvo.
- Camiones con caja bien cubierta con lona.

CAP 4. PROGRAMAS DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



- Planes de reducción del tráfico urbano
- Nuevos estándares de emisiones en los vehículos (EURO 5 y EURO 6)
- Inspección técnica de vehículos
- Cambios en la composición del combustible: reducción del plomo y del azufre
- Disminución de la presión del vapor REID
- Disminución del benceno

Modos de transporte menos contaminantes y más sostenibles



AIRE MÁS LIMPIO, MÁS SALUD

A CORTO PLAZO

- Disminuye la morbilidad
- Mejora la salud de los asmáticos

A LARGO PLAZO

- Disminuye tasa muertes, especialmente las respiratorias y cardiovasculares
- Aumenta esperanza vida



cap.1

9

LAS CAUSAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS MÁS IMPORTANTES

POR JULIO DÍAZ Y CRISTINA LINARES

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE NUESTROS DÍAS. ¿QUÉ PASA EN LA ATMÓSFERA?

La **calidad del aire** que nos rodea viene determinada principalmente por la distribución geográfica de las fuentes de emisión de contaminantes y las cantidades de contaminantes emitidas.

La Directiva 2008/50/CE del 11 de junio de 2008, define “**contaminante**” como toda sustancia presente en el aire ambiente que pueda tener efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente en su conjunto.

Los procesos físico-químicos que se producen en la atmósfera, la meteorología y la orografía condicionan enormemente los procesos de **dispersión y transporte** de estos contaminantes. De forma general, las concentraciones de cualquier contaminante en un punto de la superficie responden en cada momento a un balance entre diferentes procesos de **aporte y eliminación** de los contaminantes implicados.

Dentro de esta dinámica atmosférica, los aportes son producidos por emisiones **primarias**, bien desde fuentes naturales o bien desde fuentes antropogénicas (derivadas de las actividades humanas).

Entre las aportaciones procedentes de fuentes naturales se encuentran las emisiones de agentes contaminantes no causadas directa ni indirectamente por actividades humanas, lo que incluye los fenómenos naturales tales como erupciones volcánicas, actividades sísmicas, actividades geotérmicas o incendios, fuertes vientos, aerosoles marinos o resuspensión atmosférica o transporte de partículas naturales procedentes de regiones áridas.

Por otra parte, también hay que considerar en los aportes la formación in situ de compuestos **secundarios** como resultado de las transformaciones químicas que tienen lugar en la atmósfera (muchas de ellas activadas por la energía de la radiación solar).

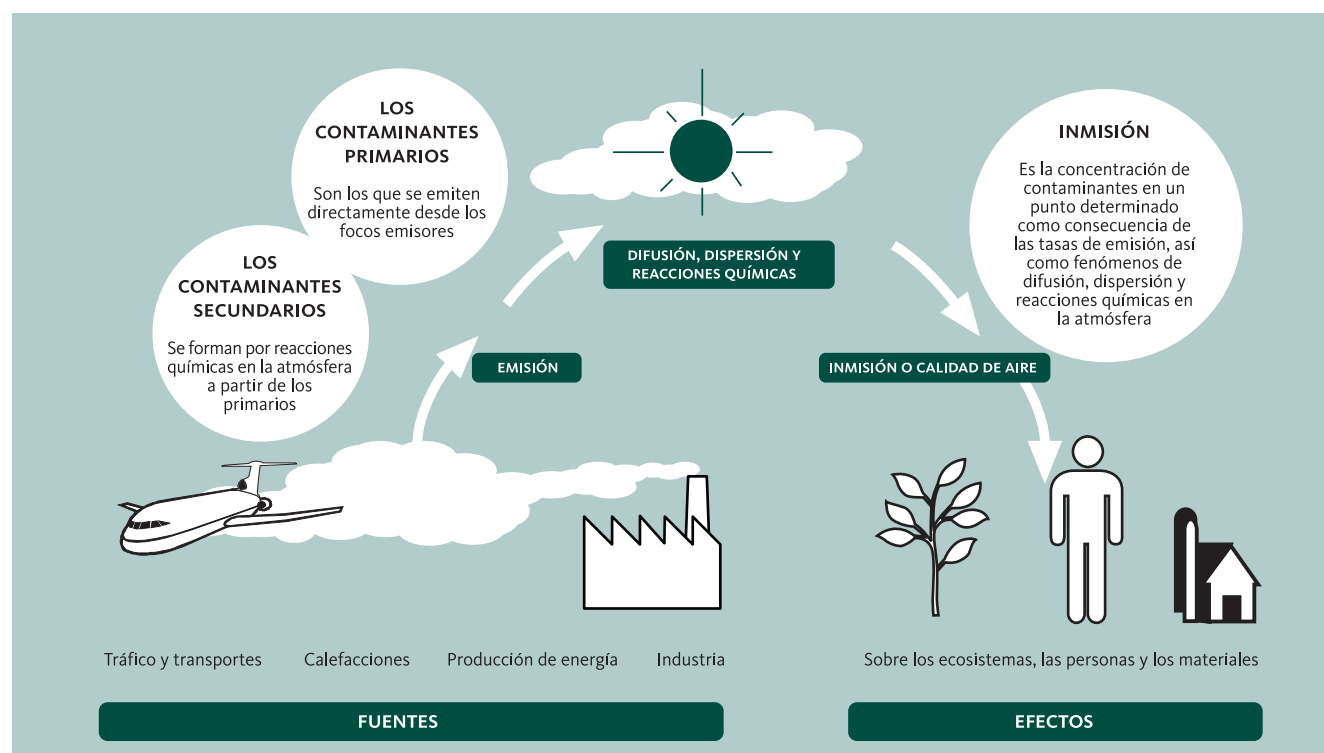


FIGURA 1. FUENTES, TIPOS DE CONTAMINANTES, PROCESOS Y EFECTOS GENERALES EN CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En cuanto a los procesos de **eliminación**, los más importantes son las reacciones químicas, que implican la formación de compuestos secundarios a partir de otros compuestos primarios que desaparecen. También los procesos de **deposición seca y húmeda** sobre la superficie y el **transporte** de contaminantes provocado por los movimientos atmosféricos, tanto en la dimensión *horizontal* (advección), como en la *vertical* (turbulencia mecánica y/o convectiva, e inyección / transporte vertical por interacción entre masas aéreas o por forzamiento orográfico).

Por tanto y en lo referente a la perturbación de la composición de la atmósfera en altitud se distinguen dos escalas: la **escala local, regional y de larga distancia**, en las que el deterioro de la calidad del aire o el aporte de determinados contaminantes puede tener repercusiones sobre los ecosistemas y sobre la salud humana. Y una **escala de tipo global**, donde el aporte de contaminantes específicos (caso de emisiones de gases de efecto invernadero o de aerosoles atmosféricos) o la destrucción de determinados componentes atmosféricos (caso de la destrucción del ozono estratosférico) pueden modificar el balance radiativo terrestre (diferencia entre la energía que llega y la que sale) y por ello inducir cambios en el clima.

La contaminación atmosférica se refiere también a la introducción en la atmósfera, directa o indirectamente, de sustancias o de energía que tengan una acción nociva de tal naturaleza que ponga en peligro la salud del hombre, que cause daños a los recursos biológicos y a los ecosistemas, que deteriore los bienes materiales y que dañe o perjudique las actividades recreativas y otras utilidades legítimas del medio ambiente.

Esta amplia definición de contaminación atmosférica introduce importantes matices que se refieren a que no sólo se consideran contaminantes atmosféricos a los de origen **químico**, sino que también existirá contaminación atmosférica por formas de ener-

gía **física**, como el ruido o las radiaciones, y contaminación de origen **biológico** como, por ejemplo, la debida al polen de diferentes especies.

No obstante, en esta publicación únicamente se hará referencia a la contaminación atmosférica de origen químico por ser de las más estudiadas en relación con la salud humana y, más concretamente, a la derivada de las actividades humanas.

NIVELES DE EMISIÓN Y DE INMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA Y CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

La **emisión** se refiere a la cantidad de sustancia contaminante que vierte a la atmósfera una determinada fuente. Suele expresarse en unidad de masa por unidad de tiempo (kg/h, tm/año).

La **inmisión** hace mención a la concentración en la atmósfera de ese contaminante, es decir, es la cantidad de contaminante que se respira o se mide y suele expresarse en unidad de masa por unidad de volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Es el comportamiento de la atmósfera, con sus fenómenos de transporte y difusión, y con las reacciones químicas que en ella tienen lugar, el que determina los niveles de inmisión existentes para unas emisiones determinadas.

Emisión es la cantidad de sustancia contaminante que vierte a la atmósfera una determinada fuente. Inmisión es la concentración en la atmósfera de ese contaminante.

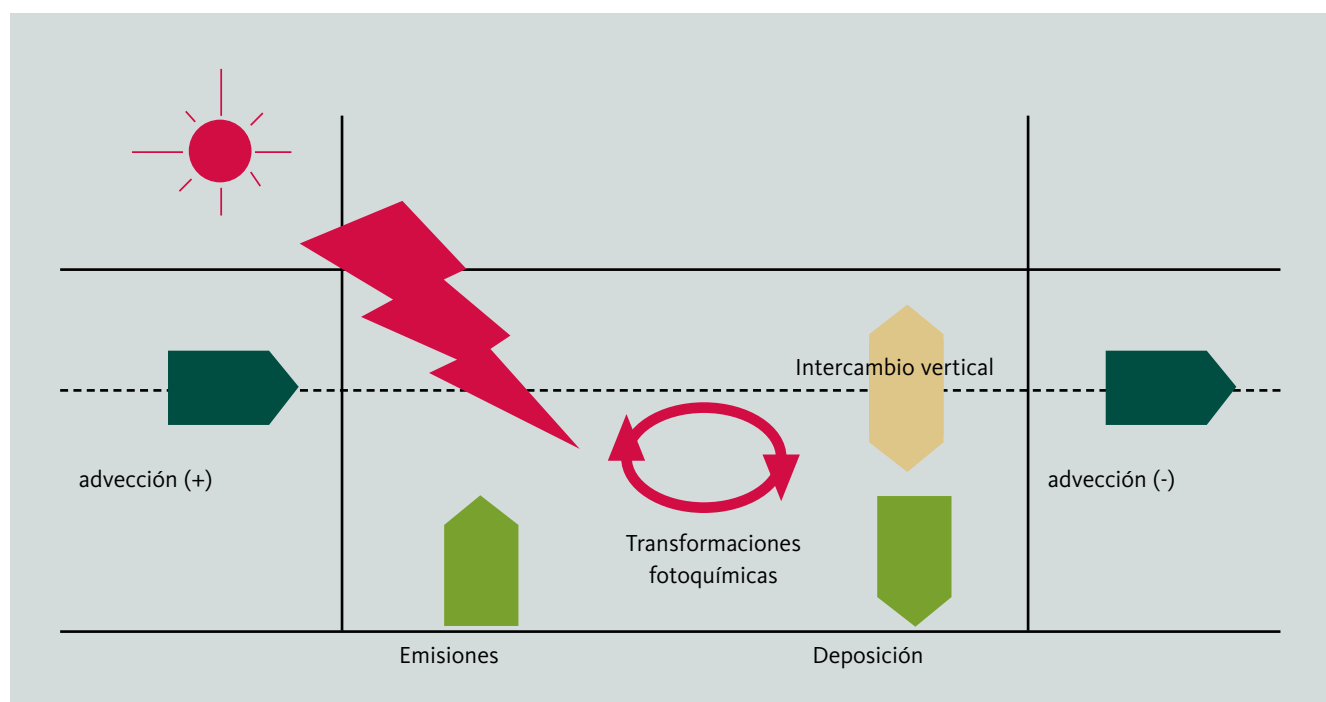


FIGURA 2. FACTORES QUE DETERMINAN LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES SOBRE LA SUPERFICIE. FUENTE: OPTIMIZACIÓN DE REDES, CAMPAÑAS EXPERIMENTALES E INTERPRETACIÓN DE DATOS. V SEMINARIO DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPAÑA. EXTRAÍDO DE CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES ESPAÑOLAS. OBSERVATORIO DE SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (2007).

Existen distintas clasificaciones posibles de los contaminantes. Una muy habitual es atendiendo a su **origen** (ver recuadro anexo). Atendiendo a su **estructura**, los contaminantes atmosféricos se subdividen en: partículas y gases. Aunque también se pueden agrupar en función de sus posibles efectos sobre la salud humana y el medio ambiente.

PARTÍCULAS

Son los contaminantes atmosféricos más complejos, ya que engloban un amplio espectro de sustancias, tanto **sólidas** como **líquidas**, procedentes de diversas fuentes, entre las que destacan las siguientes: **polvo** (producido por desintegración mecánica), **humos** (procedentes de combustiones), **brumas** (por condensación de vapor) y **aerosoles** (mezcla de partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en un gas).

Aunque los elementos que integran las partículas varían según las fuentes locales, en general, las **PM₁₀** suelen tener un importante componente de tipo natural, siendo contaminantes básicamente primarios que se generan por procesos mecánicos o de evaporación: minerales locales o transportados, aerosol marino, partículas biológicas (restos vegetales) y partículas primarias derivadas de procesos industriales o del tráfico (asfalto erosionado y restos de neumáticos y frenos generados por abrasión); de entre los pocos contaminantes secundarios que entran a formar parte de su estructura destacan los nitratos.

Por el contrario, la composición de las **PM_{2,5}** es más tóxica, ya que su principal origen es antropogénico, especialmente las emisiones de los vehículos diesel, estando fundamentalmente formadas por partículas secundarias: nitratos y sulfatos (originados por oxidación de NO_x y SO_x), aerosoles orgánicos secundarios, como el peroxiacetil nitrato (PAN) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA).

Por el contrario, son pocas las fuentes primarias de partículas finas, por ejemplo los procesos industriales de molienda y pulverización y los procesos rápidos de condensación de gases expulsados a altas temperaturas.

Las **PM₁₀** suelen tener un importante componente natural. La composición de las **PM_{2,5}** es más tóxica, ya que su principal origen es antropogénico, especialmente las emisiones de los vehículos diésel.

Por este motivo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) aconseja utilizar como indicadores de la calidad del aire las concentraciones de **PM_{2,5}** en vez de las de **PM₁₀**.

El diferente origen y composición del material particulado puede verse reflejado en las tablas del artículo y en la figura 3.

Los niveles de partículas pueden verse influenciados en España por las condiciones atmosféricas, debido a la menor precipitación y acción eólica con respecto a otros países de la zona norte de Europa, y a los aportes de partículas procedentes del norte de África (polvo sahariano) en el caso de las **PM₁₀** y **PM_{10-2,5}**.

Dado que en las **PM_{2,5}** la proporción de material mineral es sustancialmente menor, sus niveles no suelen verse afectados por las intrusiones de polvo sahariano. Mientras que las **PM₁₀** pueden permanecer en el aire durante minutos u horas, las partículas finas, debido a su menor tamaño y menor peso, si las condiciones meteorológicas son propicias, consiguen mantenerse suspendidas en el aire durante días o incluso semanas.

LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS QUÍMICOS SEGÚN SU ORIGEN

Contaminantes primarios: son los emitidos directamente a la atmósfera desde la fuente de contaminación por procesos tanto naturales como antropogénicos (uso de combustibles en los hogares o en los motores de combustión y las actividades industriales):

- óxidos de azufre (SO_x)
- óxidos de nitrógeno (NO_x)
- monóxido de carbono (CO)
- aerosoles
- hidrocarburos
- halógenos y sus derivados (Cl₂, HF, HCl, haluros)
- arsénico y sus derivados
- ciertos componentes orgánicos
- metales pesados (Pb, Hg, Cu, Zn,...)
- partículas minerales (asbesto y amianto)

Contaminantes secundarios: son los que se forman en la atmósfera mediante reacciones químicas de otros contaminantes que proceden en su mayor parte de fuentes antropogénicas: ozono (O₃), sulfatos, nitratos, aldehídos, cetonas, ácidos, peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y radicales libres.

Los niveles de ozono son, a menudo, más altos en los alrededores de las grandes ciudades que en el interior de las mismas.





UN MUNDO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

- Partículas micrométricas o sedimentables (diámetro $> 10 \mu\text{m}$)
- Partículas submicrométricas o en suspensión (diámetro $\leq 10 \mu\text{m}$) (PM)

Estas últimas se clasifican según su tamaño:

PM_{10} : partículas gruesas o de diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$

$\text{PM}_{10-2,5}$: fracción gruesa, cuyo diámetro aerodinámico está comprendido entre $10 \mu\text{m}$ y $2,5 \mu\text{m}$.

$\text{PM}_{2,5}$: partículas finas o de diámetro aerodinámico $\leq 2,5 \mu\text{m}$

$\text{PM}_{0,1}$: partículas ultrafinas o de diámetro aerodinámico $\leq 0,1 \mu\text{m}$

GASES

Un amplio abanico de sustancias, en forma gaseosa, de diversa naturaleza y con comportamientos y dinámicas químicas muy diferentes, constituyen los principales gases contaminantes atmosféricos.

Algunos se emiten de forma natural, además de por las actividades humanas. Mientras que unos son emitidos directamente a la atmósfera (contaminantes primarios), como los óxidos de azufre o de carbono, otros pueden surgir del fruto de reacciones químicas en la atmósfera, como algunos óxidos de nitrógeno, o la compleja generación del ozono, uno de los principales contaminantes atmosféricos secundarios y de mayor importancia en nuestro medio mediterráneo.

COMPUESTOS DE AZUFRE

Asociados con el contenido en azufre de los combustibles fósiles, están por tanto relacionados con la combustión del gasóleo en los

vehículos y producción de energía y carbón en las centrales térmicas, determinados procesos industriales y con las calefacciones domésticas. En la atmósfera urbana está representada una amplia gama de compuestos de azufre, pero desde un punto de vista práctico los más importantes son el **dióxido de azufre gaseoso**, el **ácido sulfúrico** y los **sulfatos**. Los cambios en tipos de combustibles en Europa Occidental han llevado a una disminución considerable de las emisiones de SO_2 aunque aún se pueden dar altas concentraciones puntuales a nivel local asociadas a emisiones ocasionales.

COMPUESTOS DE NITRÓGENO

Su principal fuente de emisión no natural proviene de los combustibles fósiles utilizados para el transporte, calefacción y generación de energía. La mayoría de combustiones producen **monóxido de nitrógeno** (NO) que, por procesos de oxidación da lugar al **dióxido de nitrógeno** (NO_2). Algunas veces la información que se suministra se refiere en términos de NO_x , indicando una mezcla de óxidos de nitrógeno.

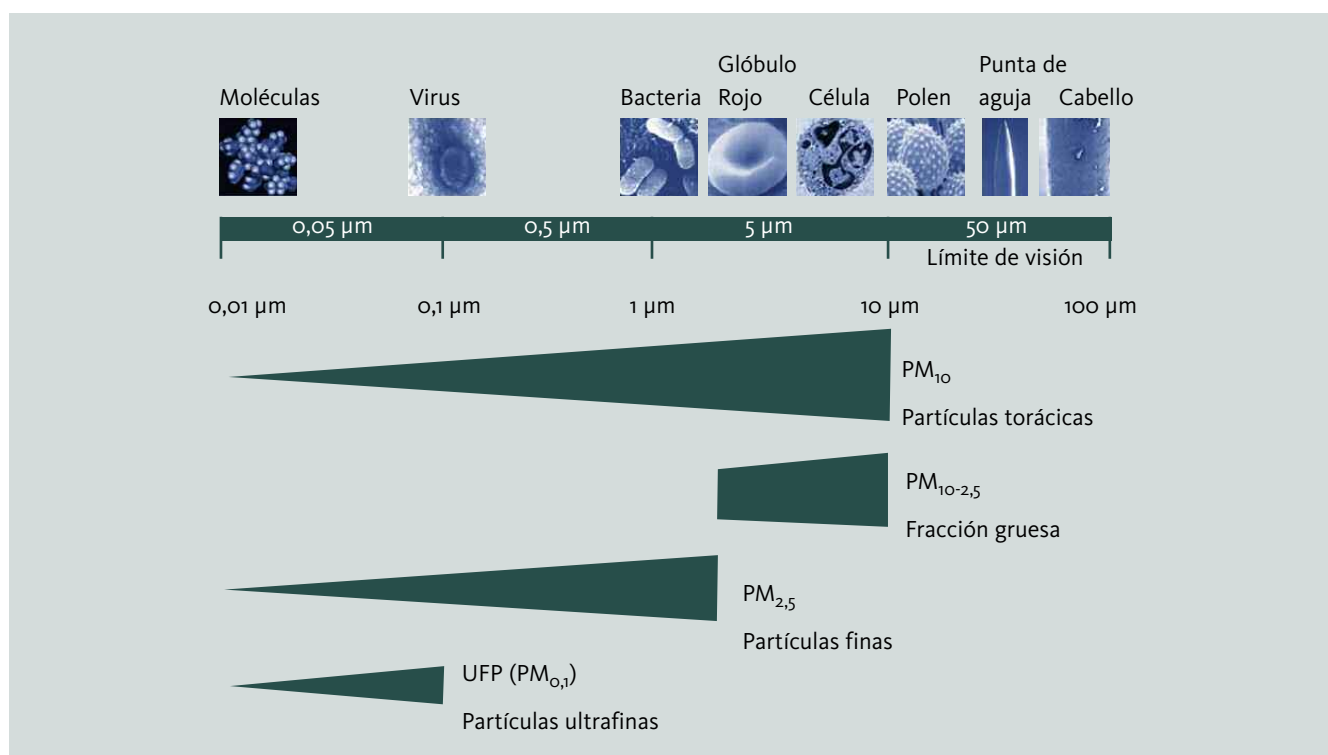


FIGURA 3. DISTINTOS TIPOS DE PARTÍCULAS SEGÚN SU TAMAÑO. FUENTE: SALUD AMBIENTAL Y CALIDAD DE VIDA URBANA. AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2005.

ÓXIDOS DE CARBONO

Fundamentalmente son el **monóxido de carbono** (CO) y el **dióxido de carbono** (CO₂). Se liberan a la atmósfera como consecuencia de las combustiones incompletas (CO) y completas (CO₂). La fuente principal del CO son los humos procedentes del escape de los vehículos a motor. Por otro lado, el CO₂ es uno de los principales contaminantes responsables del efecto invernadero.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)

Los COV son un grupo variado de compuestos presentes en la atmósfera que incluyen un amplio espectro de hidrocarburos como alcanos, alquenos, hidrocarburos aromáticos, cetonas, alcoholes, ésteres y algunos compuestos clorados. El **benceno** (C₆H₆) es un COV aromático que ha recibido mucha atención debido a su carcinogenicidad. El **tolueno** (C₆H₅CH₃) es un COV que actúa como importante precursor del ozono. En algunas ocasiones el **metano** (CH₄) se mide de forma independiente al resto de los COV y entonces se habla de los **compuestos orgánicos volátiles no metánicos** (COVNM).

OTROS COMPUESTOS

Además de las sustancias anteriormente citadas, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes que se presentan más raramente pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión a la atmósfera muy localizada. Entre otros, se encuentran como más significativos los siguientes: halógenos y sus derivados; arsénico y sus derivados; partículas de metales ligeros y pesados como el plomo, el mercurio, cobre y zinc; partículas de sustancias minerales como el amianto y los asbestos, así como sustancias radiactivas.

A título de ejemplo que aglutina cómo aparecen en la práctica estos contaminantes, en la tabla 1 se muestran los principales contaminantes primarios presentes en una atmósfera urbana, como es el caso de la ciudad de Madrid, las cantidades anuales que se emiten de cada contaminante y cuál es el sector que más contribuye a su emisión.

Como puede observarse es el tráfico rodado en principal causante de la contaminación en una atmósfera urbana, con una contribución superior al 75% en aquellos contaminantes que más preocupan en este tipo de atmósferas como son las partículas materiales (PM₁₀ y PM_{2,5}) y los óxidos de nitrógeno (NO_x).

15

LOS CONTAMINANTES SECUNDARIOS Y LA CONTAMINACIÓN FOTOQUÍMICA. EL OZONO TROPOSFÉRICO

La contaminación fotoquímica se produce como consecuencia de la aparición en la atmósfera de sustancias denominadas oxidantes. Éstas se originan al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de los rayos de sol. La formación de los oxidantes se ve favorecida en situaciones estacionarias de alta presión (anticiclones) asociados a una fuerte insolación y vientos débiles que dificultan la dispersión de contaminantes primarios.

El **ozono** (O₃) es, desde el punto de vista toxicológico, el más importante de estos contaminantes. Dado que los contaminantes primarios procedentes de las emisiones de los automóviles reaccionan con él, puede encontrarse a concentraciones considerables incluso en zonas alejadas de las fuentes de emisión, y son, a menudo, más altos los niveles en los alrededores de las grandes ciudades que en el interior de las mismas.

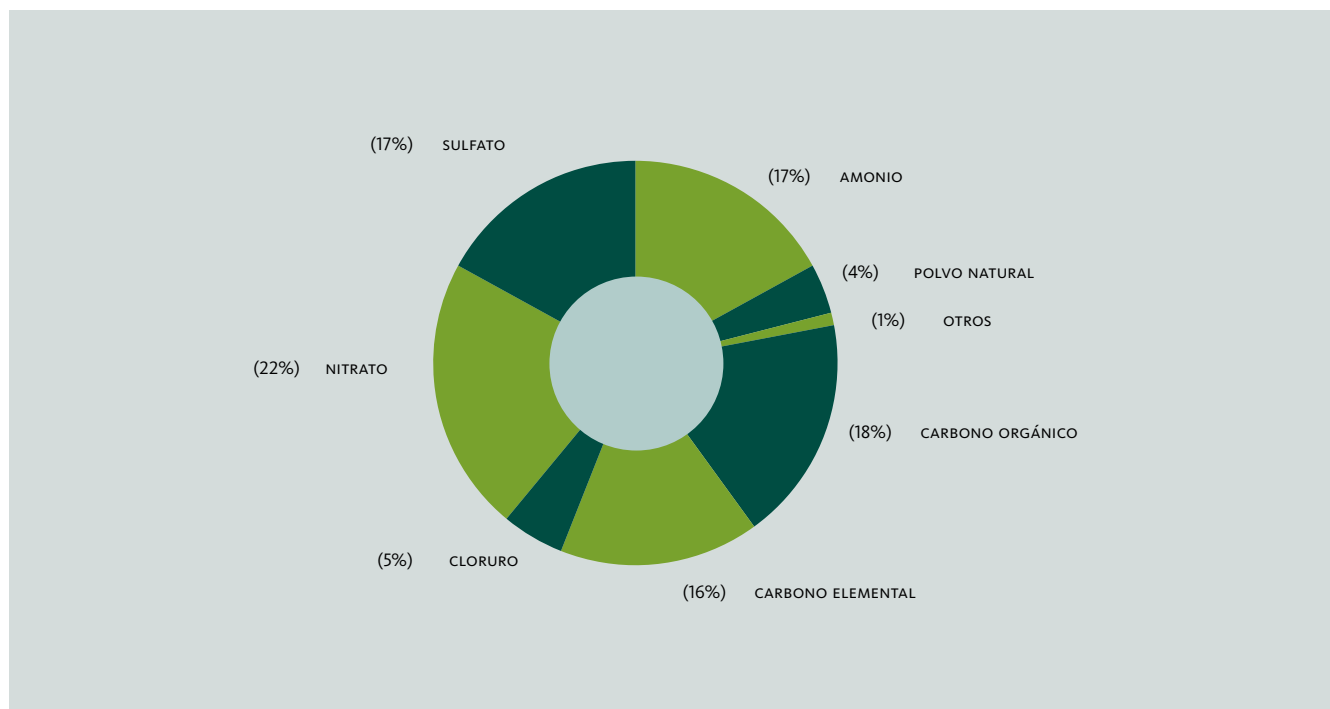


FIGURA 4. COMPOSICIÓN DE LAS PARTÍCULAS CONTAMINANTES. FUENTE: CONAMA RM-SESMA.CENMA

EL OZONO TROPOSFÉRICO. SU FORMACIÓN Y DIFUSIÓN

El **ozono troposférico**, denominado así porque se refiere al ozono existente en la baja atmósfera (0-20 km) denominada troposfera para distinguirlo del que existe en la alta atmósfera (20-40km) o estratosfera, puede tener un origen natural o ser producto de las actividades humanas.

El tráfico rodado es el principal causante de la contaminación en una atmósfera urbana, con una contribución superior al 75% en aquellos contaminantes que más preocupan

De *forma natural*, procede de las intrusiones del ozono presente en la estratosfera. También puede formarse a partir de las descargas eléctricas de las tormentas que alteran el oxígeno atmosférico o aparecer a partir de emisiones procedentes de actividades naturales como la vegetación (robledales), los volcanes y las fermentaciones.

Pero quizá la principal fuente del ozono troposférico sea la del *origen antropogénico* como *contaminante secundario*, es decir, no emitido directamente por ninguna fuente, sino producido a partir de otros contaminantes denominados precursores, en presencia de radiación solar.

A comienzos de la década de los 50 del siglo pasado fueron identificados los **óxidos de nitrógeno** (NO_x) y los **compuestos orgánicos volátiles** (COV), especialmente los hidrocarburos, como los dos precursores químicos clave en la formación del ozono troposférico.

Los niveles de ozono son, a menudo, más altos en los alrededores de las grandes ciudades que en el interior de las mismas.

Aunque el 66 % de los NO_x tiene un origen natural (emisión de los suelos, fenómenos tormentosos, emisiones desde el mar, etc) es evidente que en la atmósfera urbana los principales focos de emisión son de origen antrópico y se refieren a la combustión de materiales orgánicos tanto en fuentes estacionarias (calefactores, procesos industriales y centrales térmicas) como en fuentes móviles (vehículos de gasolina y de gasoil).

Los COV, fundamentalmente constituidos por hidrocarburos, también pueden tener un origen natural y otro antrópico. En el primero destacan como emisores los robles y los sicomoros; también pueden emitirse COV desde los pantanos o desde el océano. Entre los emisores antropogénicos destacan las emisiones procedentes por la de descomposición térmica de compuestos orgánicos, fundamentalmente por la combustión incompleta de éstos.

Estas reacciones químicas del ozono tienen varias implicaciones que explican su comportamiento espacial y temporal:

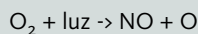
- en primer lugar la necesidad de luz solar hace que a **escala temporal de un día** el proceso se inicie a primera hora de la mañana, alcanzándose las máximas concentraciones de ozono en las primeras horas de la tarde comenzando a decaer a medida que disminuye la insolación.
- Por otro lado en entornos urbanos contaminados el monóxido de nitrógeno (NO) recién emitido puede combinarse inmediatamente con el ozono según la reacción (3) reduciendo sus concentraciones en el ambiente. Esto hace que, normalmente, los máximos de ozono no se den en el centro de la ciudad sino en los parques y en la periferia de las grandes urbes, donde son menores las emisiones a la atmósfera de NO_x . Debido a este proceso, una reducción de las emisiones de NO_x en las ciudades puede dar lugar a un aumento en las concentraciones de ozono. En estos casos son los COV los que deberían controlarse.
- En cuanto al **ciclo anual** los factores meteorológicos implicados como son la fuerte insolación, la estabilidad atmosférica, la ausencia de vientos y las altas temperaturas hacen que los niveles de inmisión máximos de este contaminante secundario se den, fundamentalmente, en los meses de verano como puede apreciarse.

PARÁMETRO	T/AÑO	SECTOR DE CONTRIBUCIÓN MÁS RELEVANTE
SO_2	3.159,00	Plantas de combustión no industrial (68,5%)
NO_x	29.337,00	Transporte por carretera (77,0%)
$\text{PM}_{2,5}$	1.694,00	Transporte por carretera (81,3%)
PM_{10}	2.127,00	Transporte por carretera (74,9%)
CO	94.291,00	Transporte por carretera (91,4%)
Pb	4,94	Transporte por carretera (52,9%)
CO_2	8.352.000,00	Transporte por carretera (51,1%)

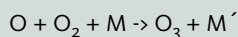
TABLA 1. EMISIONES ANUALES DE LOS CONTAMINANTES PRIMARIOS MÁS IMPORTANTES EN LA CIUDAD DE MADRID EN 2006. FUENTE: AYUNTAMIENTO DE MADRID

LA QUÍMICA DEL OZONO

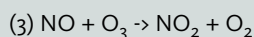
De manera simplificada, el proceso de producción de ozono se inicia al reaccionar los óxidos de nitrógeno con luz solar de longitud de onda inferior a 400 nm ($1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$) según el siguiente proceso:



El oxígeno atómico así formado reacciona rápidamente con el oxígeno del aire para formar ozono, según la siguiente reacción:



Para más tarde destruirse del siguiente modo:

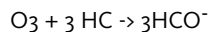


se en la figura 4, al contrario que ocurría con otros contaminantes primarios en los que las máximas concentraciones se producen en los meses de invierno coincidiendo con el encendido de las calefacciones y la peor dispersión de los contaminantes en la atmósfera por las situaciones de bloqueo o estancamiento atmosférico.

LA CONTAMINACIÓN FOTOQUÍMICA

Además de las reacciones de formación y destrucción del ozono a través del ciclo fotolítico del NO_2 , pueden formarse también **radicales libres**.

La presencia en el aire de hidrocarburos hace que el ciclo fotolítico se desequilibre al reaccionar éstos con oxígeno atómico y el ozono generado, produciendo radicales libres muy activos, del siguiente modo:



Estos radicales libres reaccionan con otros radicales dando lugar a la formación de otras sustancias como **aldehídos**, **cetonas** y **nitratos de peroxiacilo (PAN)**.

La mezcla de todas estas sustancias da lugar a la denominada **contaminación fotoquímica** o **smog fotoquímico**. Este tipo de contaminación se presenta cada vez con más frecuencia en las grandes ciudades de los países industrializados y al necesitar de la luz solar y por la naturaleza de las complejas reacciones químicas implicadas, suele ser máxima al mediodía.

CONTRIBUCIÓN DE LOS DIFERENTES SECTORES ECONÓMICOS A LAS EMISIONES DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES.

Según los últimos datos publicados en 2009 por el MARM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino) en el Inventario Nacional de emisiones de Contaminantes a la Atmósfera, en 2007, se apreció, en lo que se refiere a la emisión de partículas, un incremento de 2,4% para las $\text{PM}_{2.5}$ y del 1,9% para las PM_{10} con respecto al 2006.

Las emisiones de precursores del ozono troposférico descendieron un 7,8% en el mismo periodo. Los descensos fueron muy ligeros en lo referente a NO_x y CH_4 , apreciables en COVNM (6,3%) y muy destacables en el caso del CO (17,3%). En 2007 el transporte fue responsable de la mayor emisión de partículas, seguido de las plantas de combustión no industrial y de la producción y transformación de energía.

A continuación se muestra la contribución en porcentaje de los diferentes sectores económicos a las emisiones de los principales contaminantes primarios en la figura 5.

Por extensión, al igual que ocurría en una atmósfera urbana, actualmente a nivel estatal, el deterioro de la calidad del aire en las ciudades está directamente relacionado con la movilidad y las actividades productivas de sectores económicos tales como el transporte, sector que es responsable principal de las emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno y otros precursores del ozono troposférico que constituyen las necesidades de reducción más relevantes debido al amplio porcentaje de población expuesta y que comporta serios riesgos para la salud además de importantes costes sociales, ambientales y económicos. En menor medida también son importantes las contribuciones del sector energético a las emisiones de estos mismos contaminantes.

En la tabla 2 se recogen los principales contaminantes atmosféricos presentes en una atmósfera urbana así como sus principales características y fuentes de emisión.

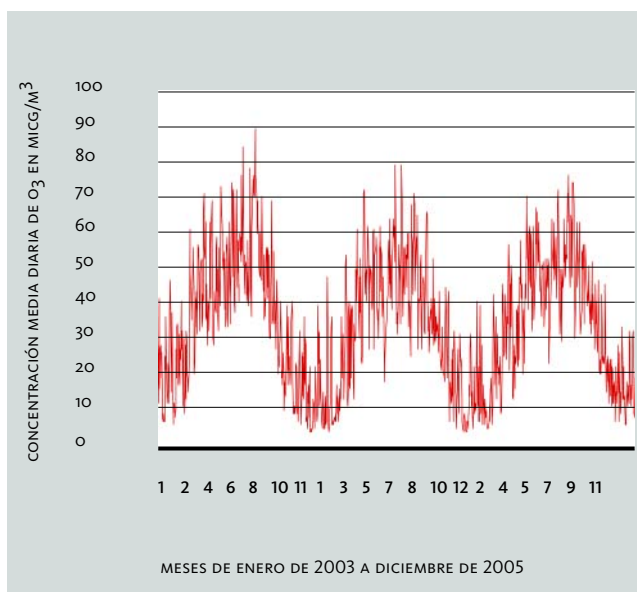


FIGURA 4. NIVELES DE INMISIÓN DEL OZONO TROPOSFÉRICO A LO LARGO DE VARIOS AÑOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE DATOS DEL AYUNTAMIENTO DE MADRID.

El deterioro de la calidad del aire en las ciudades está directamente relacionado con la movilidad y las actividades productivas de sectores económicos tales como el transporte, sector que es responsable principal de las emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno y otros precursores del ozono troposférico

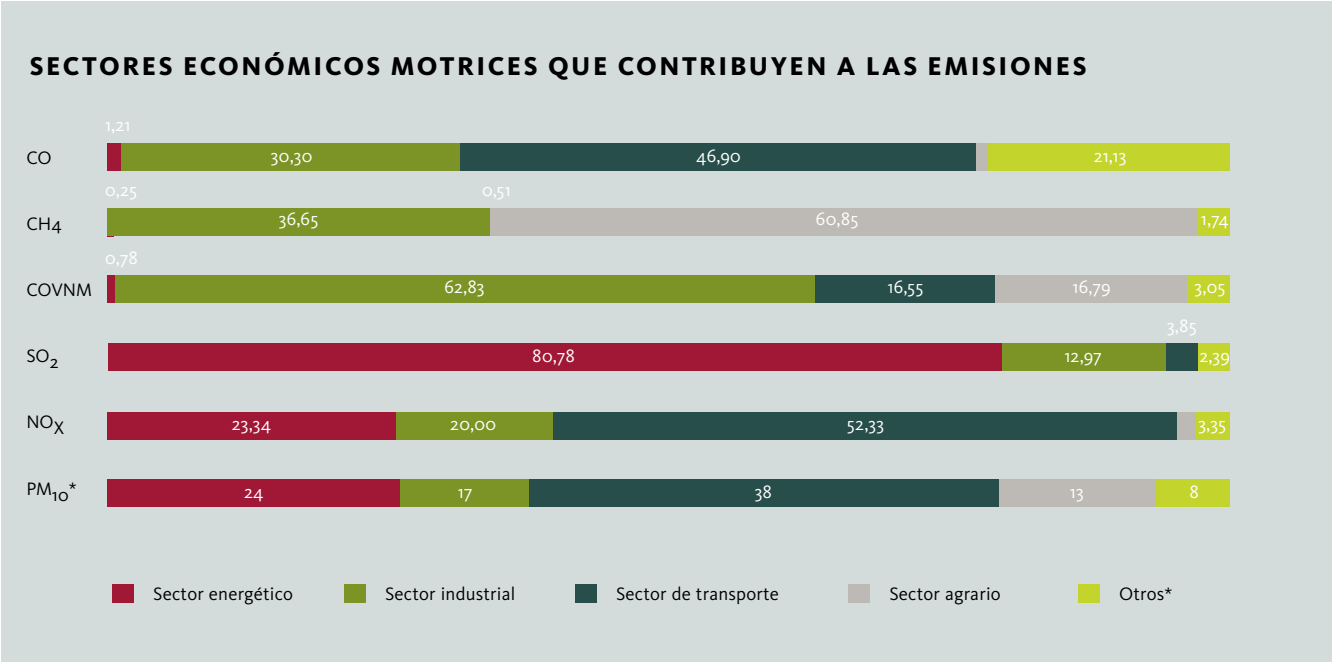
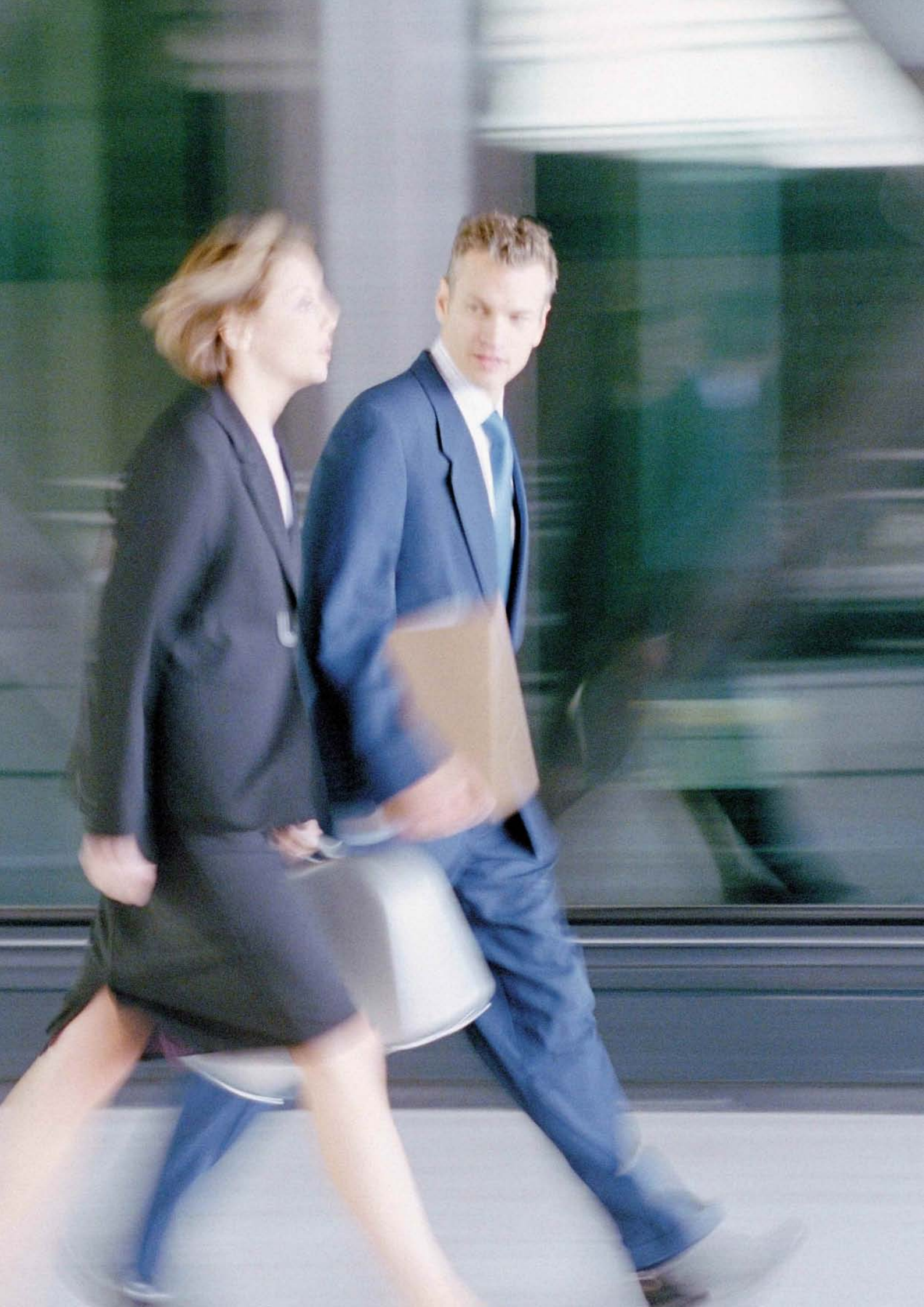


FIGURA 5. SECTORES ECONÓMICOS MOTRICES QUE CONTRIBUYEN A LAS EMISIONES EN ESPAÑA EN 2005 Y UE 1999 DE LOS CONTAMINANTES CONSIDERADOS (%). (EN OTROS*, EL * PARA SO₂, NO_x, COVNM, CH₄ Y CO SE REFIERE AL SECTOR DOMÉSTICO Y SERVICIOS (ESPAÑA 2005), MIENTRAS QUE PARA LAS PM₁₀ LOS DATOS SE REFIEREN A RESIDUOS EMISIONES POR FUGAS Y OTROS (UE-1999)). FUENTE: EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES. OBSERVATORIO PARA LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA 2007.

La contaminación atmosférica comporta serios riesgos para la salud además de importantes costes sociales, ambientales y económicos

CONTAMINANTE	TIPO	ESTADO FÍSICO	PROCESOS Y FUENTES
Partículas en suspensión (PM): PM ₁₀ , PM _{2,5}	Primario y secundario	Sólido, Líquido	- Combustión de materiales fósiles en el transporte (gases de escape de vehículos diésel) y desgastes. - Actividades industriales como siderurgia, incineración, áridos, cementeras... - Resuspensión de partículas.
Óxidos de azufre SO ₂	Primario	Gas	- Quema de combustibles fósiles que contienen azufre (carbón, petróleo, gasóleos) por las calefacciones, las centrales térmicas y otros procesos industriales.
Óxidos de nitrógeno NO _x NO y NO ₂	Primario y secundario	Gas	- Procesos de combustión a gran temperatura y/o presión (el nitrógeno es el componente más abundante en la atmósfera) - Tráfico y procesos industriales (centrales térmicas de producción de energía).
Monóxido de carbono CO	Primario	Gas	- Combustión incompleta de motores de explosión, sobre todo en vehículos de gasolina y en procesos industriales.
Compuestos orgánicos volátiles (COV) (hidrocarburos como metano, etano, propano, acetileno, alcanos, bencenos, tolueno, butano...)	Primario y secundario	Gas (muy volátiles a temperatura ambiente)	- Quema de combustibles como gasolina, madera, carbón, gas natural en vehículos e industria. - Uso de disolventes, pinturas, pegamentos, colas, tintes, cosméticos...
Benceno (COV)	Primario	Gas	- Combustión de petróleo. - Uso como materia prima en numerosos procesos industriales (fabricación de plásticos, resinas, fibras, cauchos, lubricantes, detergentes, plaguicidas...) - Emisiones de vehículos. - Evaporación en gasolineras y almacenamiento.
Ozono troposférico O ₃	Secundario	Gas	- Transformación química en la atmósfera a partir de NO_x y COV por la radiación solar. Las concentraciones más elevadas se dan en las horas centrales del día durante el verano y son mayores en las zonas rurales que en las aglomeraciones urbanas.
Metales pesados: mercurio, plomo, cadmio, arsénico y níquel	Primario	Sólido/gas (mercurio)	- Procesos industriales como la metalurgia, cerámica, combustión...
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP): Benzo[a]pireno	Primario y Secundario	Gas	- Combustión incompleta de materiales fósiles (carbón, petróleo, gas), madera, basura...

TABLA 2. SÍNTESIS DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CON SUS CARACTERÍSTICAS MÁS IMPORTANTES EN CUANTO A NATURALEZA Y ORIGEN.



cap.2

21

LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS Y LAS POBLACIONES

POR FERRAN BALLESTER Y ELENA BOLDO

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: UN RIESGO PARA LA SALUD CONOCIDO DESDE HACE DÉCADAS

En el campo de la salud, la contaminación atmosférica es un fenómeno conocido y estudiado desde antiguo. Tanto en el **mundo clásico** (Grecia, Roma), como en los albores de la sociedad industrial, se encuentran descripciones de que los efectos de la exposición a humos se relacionaban con problemas de salud.

En el mundo contemporáneo cobra una gran importancia a partir de una serie de episodios que tuvieron lugar en los países industrializados durante la **primera mitad del siglo XX**. Los casos ocurridos en el Valle de Mosa (Bélgica) en 1930, en Donora (Pennsylvania, USA) en 1948 y, sobre todo, la catástrofe de Londres, en Diciembre de 1952, serían tal vez los más destacables

y característicos. Estas situaciones excepcionales se tradujeron en un aumento de la mortalidad y la morbilidad que no dejaron dudas acerca de que los niveles altos de contaminación atmosférica se asociaban causalmente con un aumento de muertes tempranas (Ware et al., 1981) y un incremento en el número de ingresos hospitalarios y enfermedades, sobre todo respiratorias.

Estas evidencias llevaron a la adopción de políticas de control de la contaminación, especialmente en Europa Occidental y Norteamérica, que condujeron a una importante reducción de los niveles de contaminación atmosférica en la mayor parte de países desarrollados durante las décadas de los 70 y los 80 (Figura 2). A partir de esa década las emisiones de las industrias y de las calefacciones, fuentes principales de contaminación hasta entonces, comenzaron a ser complementadas por las emisiones procedentes de los vehículos a motor.

EL EPISODIO DE LONDRES DEL INVIERNO DE 1952

El 5 de diciembre de 1952 se desarrolló en Londres una gruesa capa de niebla a temperaturas cercanas a 0°C. La niebla persistió sin disminuir durante varios días y se generó una preocupación importante entre la población.

Ese mismo día y los siguientes hubo una gran demanda de camas hospitalarias y el 8 de diciembre los hospitales del Centro de Londres emitieron un comunicado de emergencia por falta de camas, declarando que sólo tenían camas suficientes para el 85 % de la demanda.

El 8 de diciembre los diarios informaron que había gente que se había muerto debido a la niebla y que la razón es que ésta tenía contaminantes químicos peligrosos. Las investigaciones para valorar el impacto de la contaminación atmosférica en la salud se prolongaron durante más de un año.

El episodio ocurrió debido a que una masa de aire estacionaria de alta presión se situó encima de la Europa Occidental originando una **inversión térmica** en el Valle del Támesis.

La contaminación, procedente principalmente de la combustión de carbón en industrias y sistemas de calefacción públicos (por ejemplo, centrales de calefacción como la que había en la planta que hoy ocupa la Galería Tate), así como en sistemas de calefacción domésticos no se dispersaron y alcanzaron **concentraciones muy elevadas** (alrededor de 10 veces los estándares de la época y 100 veces los actuales). (Figura 1).

Junto con el incremento de contaminación se observó un incremento muy acusado en el número de defunciones, así como en el número de personas que acudían de urgencias a los hospitales.

A pesar de que los niveles de contaminación se normalizaron al cabo de unos días, las tasas de mortalidad permanecieron altas durante varias semanas.

Oficialmente el número de muertes en exceso atribuidas a este episodio fue entre 3.500 y 4.000 (Ministry of Health, 1954). Estudios posteriores, sin embargo, han cuestionado dicha valoración y han estimado unas 12.000 personas fallecidas entre diciembre de 1952 y febrero de 1953 a causa de los efectos persistentes del episodio de contaminación de diciembre de 1952 (Bell y Davis, 2001).

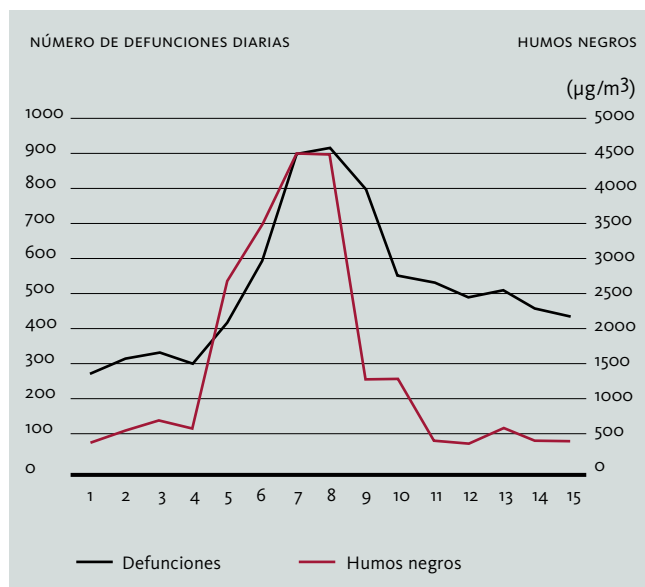


FIGURA 1. EL EPISODIO DE LA NIEBLA DE LONDRES. NÚMERO DE DEFUNCIONES DIARIAS Y NIVELES DE PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (HUMOS NEGROS) EN LONDRES, 1 AL 15 DE DICIEMBRE DE 1952. FUENTE DE LOS DATOS: MINISTERIO DE SALUD (1954).

ELABORACIÓN PROPIA

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA CONTI-NÚA SIENDO UN RIESGO PARA LA SALUD DE LA POBLACIÓN

En la actualidad, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que alrededor de dos millones de defunciones prematuras pueden ser atribuidas a la contaminación atmosférica cada año. La mayor parte de dicho impacto ocurre en los **países en desarrollo**.

En los **países más desarrollados**, dada la reducción de los niveles de SO_2 y de CO por mejoras en los procesos de combustión en industrias, calefacción y automóviles, los contaminantes cuyos efectos sobre la salud preocupan más en la actualidad son las **partículas en suspensión**, el **ozono** y el **dióxido de nitrógeno** (Brunekreef y Holgate 2002).

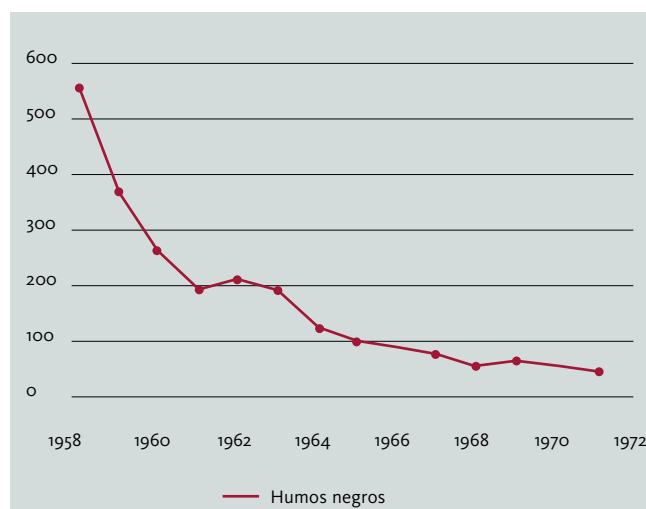


FIGURA 2. EVOLUCIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE HUMOS NEGROS (EN $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

LONDRES 1958-1971. FUENTE DE LOS DATOS: SCHWARTZ Y MARCUS (1990).

ELABORACIÓN PROPIA.



IMAGEN OBTENIDA EN: WWW.FORUMS.RANDI.ORG; 30 DE DICIEMBRE DE 2009

La Organización Mundial de la Salud estima que alrededor de dos millones de defunciones prematuras pueden ser atribuidas a la contaminación atmosférica cada año.

A pesar de los avances en el control de la contaminación atmosférica, el impacto de la exposición a contaminación atmosférica en Europa sigue siendo muy importante, como se ve en el cuadro de la siguiente página.

DOS TIPOS DE ESTUDIOS DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA SALUD

La interpretación de las reacciones que produce la contaminación atmosférica en la salud humana se fundamenta en estudios de dos clases: los toxicológicos o experimentales y los epidemiológicos. Ambos tipos de estudios se consideran complementarios cuando se trata de valorar los efectos de la contaminación atmosférica en la salud.

ESTUDIOS TÓXICOLÓGICOS O EXPERIMENTALES: EXPOSICIÓN CONTROLADA

Son aquellos realizados en el hombre o los animales, en los que la concentración, duración y condiciones de la exposición son controladas por el investigador. Su principal ventaja radica precisamente en el control de las condiciones de exposición, por lo que la medida de ésta es más precisa que en el caso de otros estudios, como los epidemiológicos, en los que el investigador recoge información ("observa") sobre lo que ocurre en la vida real.

En cuanto a los inconvenientes, radican fundamentalmente en el hecho de someter a los sujetos en experimentación a una situa-

ción artificial, ya que se utiliza un reducido número de contaminantes, en situación ideal, a grandes dosis y en circunstancias ambientales especiales.

Es de destacar que en los últimos años ha habido grandes avances en el desarrollo de estudios de los efectos a exposiciones controladas de contaminantes, en especial se ha avanzado sustancialmente en la comprensión de los efectos y mecanismos biológicos relacionados con la exposición a partículas y a ozono.

ESTUDIOS EPIDEMIOLÓGICOS: OBSERVAR LO QUE SUCEDE

Son aquellos que se refieren a la observación de los sucesos que se desarrollan en las poblaciones humanas bajo condiciones reales, circunstancia en la que radica su ventaja más significativa.

Como medida de la exposición a la contaminación atmosférica muchos estudios han utilizado los datos de las redes de vigilancia de la contaminación atmosférica, pero también se utilizan, cada vez más, otros tipos de aproximaciones a la medida de la exposición que van desde la valoración de la residencia como medida del grado de contaminación, los cuestionarios de exposición, hasta la utilización de captadores personales o la determinación de biomarcadores. A medida que se avanza en sofisticación, la medición de la exposición es más fiable pero se aumenta en costo.

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA INCREMENTA EL RIESGO DE ENFERMAR Y DE MORIR POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS Y CARDIOVASCULARES

Los principales efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud van desde **alteraciones de la función pulmonar**, problemas **cardíacos** y otros síntomas y molestias hasta un aumento del número de **defunciones**, de **ingresos hospitalarios** y de visitas a **urgencias**, especialmente por causas **respiratorias y cardiovasculares**.

El efecto de la contaminación atmosférica mantiene una gradación tanto en la gravedad de sus consecuencias como en la población a riesgo afectada (Figura. 3). Así, a medida que los efectos son menos graves, el porcentaje de población afectada es mayor.

En los últimos años ha habido un importante avance en el conocimiento y comprensión de los efectos de la contaminación

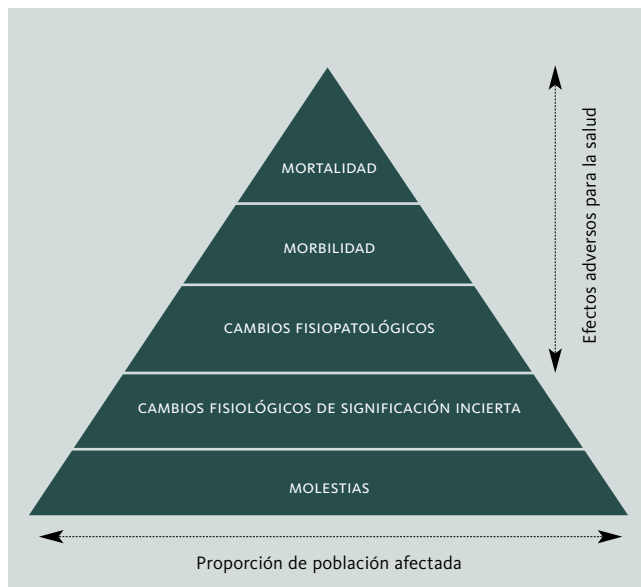


FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA SALUD. FUENTE: TENÍAS Y BALLESTER, 2009.

atmosférica sobre la salud proporcionado por un gran número de trabajos científicos en todo el mundo.

Los efectos de la exposición crónica superan en magnitud a los efectos agudos debidos a exposiciones en el corto plazo.

Estos estudios han puesto de manifiesto la importancia de la calidad del aire en la salud de la población y han permitido identificar los principales mecanismos de acción por los cuales la exposición a contaminación atmosférica causa daños en la salud.

A finales de los años 70 y durante la década siguiente, la mayoría de expertos pensaban que, con los niveles que se registraban en la mayoría de ciudades de los países más desarrollados, la contaminación atmosférica no representaba un peligro importante para la salud.

Hoy en día, menos de 30 años después, las principales instituciones internacionales, como la OMS o la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA), reconocen que la inhalación de contaminantes, especialmente partículas finas, representa un incremento de riesgo de defunción prematura.

ESTIMACIONES DE LA OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD) DE LA REGIÓN EUROPEA EN CUANTO AL IMPACTO DE LA EXPOSICIÓN A CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EUROPA

- > las elevadas concentraciones de **partículas en suspensión** en Europa se asocian con alrededor de 300.000 defunciones prematuras anuales, de manera que disminuyen la esperanza de vida de cada europeo en al menos un año, como promedio;
- > la contaminación por **ozono** causa irritación al respirar, desencadena síntomas de asma, es causa de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y está asociada con cerca de 21.000 defunciones prematuras al año;
- > los **agentes biológicos** del aire del interior de los edificios, relacionados con la humedad y el moho de las paredes, incrementan en un 50% el riesgo de enfermedades respiratorias, tanto en niños como en adultos;
- > el **humo ambiental del tabaco** causa problemas respiratorios graves en niños, como asma y disminución de la función pulmonar, y es también peligroso para los adultos, incrementando el riesgo de defunción prematura.

Este cambio tan importante, comenzó con el análisis de los efectos agudos, o a corto plazo, de los incrementos de la contaminación atmosférica. Con el tiempo, y los resultados de estudios posteriores, se sabe que los efectos debidos a la exposición crónica (efectos a largo plazo), pueden ser considerablemente más importantes.

LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN PUEDEN APARECER INMEDIATAMENTE, TRAS EXPOSICIONES AGUDAS, O A MÁS LARGO PLAZO, EN RELACIÓN CON EXPOSICIONES CRÓNICAS

ESTUDIOS DE LOS EFECTOS AGUDOS O A CORTO PLAZO

Entre los diseños epidemiológicos más utilizados para el análisis de los efectos agudos, o en el corto plazo, destacan los **estudios de series temporales**. En ellos se analizan las variaciones en el tiempo de la exposición a contaminación atmosférica y su relación con el indicador de salud en una población (número de defunciones, ingresos hospitalarios, etc.).

En Europa, el **proyecto APHEA** (Air Pollution and Health: A European Approach) (Katsouyanni et al 2001) y en Estados Unidos el **estudio NMMAPS** (National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study) (Samet et al 2000) se encuentran entre los estudios de series temporales que han aportado más al conocimiento del impacto agudo de la contaminación en la salud. En España, el **proyecto EMECAM-EMECAS** ha estudiado la relación a corto plazo de la contaminación atmosférica en la población de 16 ciudades españolas (EMECAM 1999, Ballester et al 2006).

En relación a las **partículas**, un incremento diario de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los niveles de PM_{10} supone un aumento en el número de defunciones diarios de alrededor del 0,6% en los estudios europeos y algo menor en el estudio NMMAPS. La magnitud de dicha relación es incluso mayor para causas cardiovasculares y respiratorias. Para los ingresos hospitalarios por causas respiratorias en personas mayores de 65 años, los resultados indican un incremento entre el 1 y el 1,5 % (Atkinson et al, 2001) (Samet et al, 2000) por un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los niveles de PM_{10} . En España se ha descrito un incremento de 1,5 % en el número de ingresos por causas cardíacas para dicho incremento de PM_{10} (Ballester et al, 2006).

Los resultados para el **ozono** en los estudios APHEA y NMMAPS han descrito una asociación de los incrementos de este contaminante con el riesgo de morir por todas las causas, y en mayor medida para los grupos de causas respiratorias y cardiovasculares (Gryparis et al, 2004) (Bell et al, 2004). Los efectos encontrados para el ozono se han mostrado independientes del ajuste por los otros contaminantes.

Este no es el caso para el NO_2 o el SO_2 en los que sus estimaciones son sensibles a la introducción en los modelos de otros contaminantes, indicando que quizás el efecto encontrado se deba a su relación con las partículas. En el caso del NO_2 , su importancia para la salud podría derivar de su papel como precursor de O_3 y por su contribución a la formación de partículas secundarias (Katsouyanni, 2003).

ESTUDIOS DE LOS EFECTOS A LARGO PLAZO

Los estudios de series temporales aportan pruebas sólidas respecto a la relación entre incrementos de los niveles de contaminación atmosférica y efectos agudos. Sin embargo, la cuestión que quedaba por resolver era si dichas asociaciones representaban un riesgo de pérdida de la esperanza de vida, así como si las exposiciones crónicas causaban otros riesgos adicionales para la salud.

Para poder contestar a estas preguntas es necesario llevar a cabo un tipo de estudios conocidos como “**de cohortes**”, en los que se sigue a las personas a estudio a lo largo del tiempo y se compara el riesgo de enfermar, o morir, en relación al grado de exposición. Aunque estos estudios presentan un diseño más complejo y costoso que las series temporales, cada vez se dispone de más resultados de este tipo de estudios en los que se evalúa el impacto a largo plazo de la contaminación en la salud. En el recuadro de la siguiente página se reseñan los estudios más importantes en este ámbito.

CUANTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE SOBRE LA SALUD: LA IMPORTANCIA DE LA EXPOSICIÓN CRÓNICA

Como resultado de los centenares de estudios epidemiológicos que evalúan los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud se dispone de una serie de estimaciones sobre la asociación entre las exposiciones a contaminantes y diferentes efectos en salud.

Las **partículas en suspensión** son el contaminante más comúnmente utilizado como indicador de contaminación, especialmente las PM_{10} , para efectos a corto plazo, y las $\text{PM}_{2,5}$ o partículas finas como indicadores de la exposición a largo plazo.

La relación entre ambos tipos de partículas difiere según las fuentes, la meteorología y la estación del año, pero, en general, se acepta que aproximadamente un 50% de las PM_{10} corresponde a las $\text{PM}_{2,5}$. Siguiendo dicha equivalencia, un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} se correspondería con un incremento de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2,5}$.

En la Tabla 1 se resumen los resultados de estudios internacionales respecto a los efectos de la exposición, aguda y crónica, a las partículas en suspensión. Como puede observarse en los resultados, los efectos de la exposición crónica superan en magnitud a los efectos agudos debidos a exposiciones en el corto plazo (Figura 4).

LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE SE ASOCIA CON UN AUMENTO DE LA ESPERANZA DE VIDA

En un estudio reciente, Pope y colaboradores (2009) recogieron los datos sobre esperanza de vida, nivel socioeconómico y características demográficas de 211 condados de 51 áreas metropolitanas en EE.UU. y los relacionaron con los niveles de partículas finas (o $\text{PM}_{2,5}$) en los últimos años de la década de los 70 y primeros de la de los 80, así como de finales de los 90 y principio del 2000.



FIGURA 4. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA MAGNITUD DE LA MORTALIDAD ASOCIADA A EXPOSICIÓN CRÓNICA EN RELACIÓN CON LA MORTALIDAD ASOCIADA A EXPOSICIONES AGUDAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

ESTUDIOS MÁS IMPORTANTES DE EFECTOS A LARGO PLAZO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

1. El estudio de las “seis ciudades” de la Universidad de Harvard (EEUU)

En él se siguen, desde 1974, a 8.111 adultos de 6 ciudades de los Estados Unidos (Dockery et al, 1993). Sus resultados indican que, una vez controlado por el hábito de fumar y otros factores de riesgo, las tasas de mortalidad están asociadas con la contaminación del aire. El riesgo de morir en las ciudades más contaminadas fue un 26 % más alto comparado con las menos contaminadas.

2. Estudio de seguimiento de la Sociedad Americana del Cáncer

En este estudio, Pope y colaboradores (Pope et al, 1995) evaluaron los efectos de la contaminación atmosférica por partículas sobre la mortalidad en los participantes en el estudio de seguimiento de la Sociedad Americana del Cáncer. En total se recogieron datos sobre factores de riesgo y contaminación atmosférica para unos 500.000 adultos de 151 áreas metropolitanas de los Estados Unidos desde 1982. En marzo de 2002 se publicaron los resultados del seguimiento de dicha cohorte hasta el año 1998 (Pope et al, 2002). Las partículas finas ($PM_{2.5}$) y los óxidos de azufre se asociaron con la mortalidad por todas las causas, por causas cardiovasculares y mortalidad por cáncer de pulmón. Por cada incremento de $10 \mu g/m^3$ en las partículas finas la mortalidad se incrementó en un 4%, 6%, y 8% respectivamente. También se ha asociado la exposición crónica con una mayor morbilidad cardiorrespiratoria y con una disminución de la función pulmonar, tanto en niños como en adultos.

3. El estudio de cohortes holandés

En Europa, los primeros resultados de un estudio de cohortes sobre efectos por exposición a contaminación atmosférica corresponden a una cohorte holandesa de 5.000 adultos. En los siete primeros años de seguimiento se ha descrito una asociación entre vivir cerca de vías con tráfico intenso y el riesgo de morir por causa cardiorrespiratoria, pero no se encuentra asociación significativa con los niveles de contaminantes (Hoek et al 2002). Estos resultados son consistentes con otros estudios europeos en los que vivir cerca de vías con elevada intensidad de tráfico se asocia con mayor riesgo de enfermedades respiratorias (Bayer-Oglesby et al 2006), o cardíacas (Hoffman et al, 2006).

4. El estudio de las 7 ciudades francesas

En un estudio realizado en 24 áreas de 7 ciudades francesas los resultados fueron consistentes con los de las cohortes de EE.UU.; un incremento de $10 \mu g/m^3$ en los niveles de humos negros se asoció con un aumento del 7% de la mortalidad por causas orgánicas (Filleul et al 2005).

5. Otros estudios

En algunos casos, la información de los efectos a largo plazo proviene de estudios de cohortes que se iniciaron con otros propósitos, como el estudio EPIC (European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition), cuyo objetivo era valorar la relación de la dieta y los estilos de vida con el riesgo de cáncer. Combinando la información proporcionada por dicho estudio con la de registros de niveles de NO_2 del aire, los investigadores de EPIC han estimado que entre el 5 y el 7% de los cánceres de pulmón en no fumadores serían atribuibles a la contaminación atmosférica (Vineis et al 2007).

Con todo lo anterior, se considera prioritario llevar a cabo un estudio multicéntrico amplio de cohortes bien planificado en Europa que evalúe los efectos a largo plazo en la población europea.

EFECTOS EN SALUD	EXPOSICIONES AGUDAS	EXPOSICIONES CRÓNICAS
	Cambio porcentual en el indicador de salud por incremento de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10}	Cambio porcentual en el indicador de salud por incremento de $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$
Aumento de la mortalidad*	*Estudios de series temporales	*Estudios de cohortes
- Todas las causas menos las externas (accidentes, etc.)	según estudios: 0,2 - 0,6 - 1,0	2 - 3
- Cardiovascular	entre 0,7 y 1,4	3 - 6
- Respiratoria	entre 1,3 y 3,4	
- Cáncer de pulmón		4
Incremento en ingresos hospitalarios		
- Todas las enfermedades respiratorias	entre 0,8 y 2,4	
- EPOC	entre 1,0 y 2,5	
- Asma	entre 1,1 y 1,9	
- Enfermedades cardiovasculares	entre 0,5 y 1,2	
Enfermedades: bronquitis		7
Disminución de la función pulmonar (FEV_1)		
- Niños	0,15	1
- Adultos	0,08	1,5

TABLA 1. RESUMEN DE LOS EFECTOS DE LA EXPOSICIÓN A PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Los investigadores construyeron modelos de regresión para estimar la asociación entre las reducciones de la contaminación y los cambios en la esperanza de vida, ajustando por las variables socio-demográficas y por variables indicadoras de prevalencia de hábito tabáquico.

Los resultados del estudio indican que las reducciones en los niveles de contaminación por partículas finas se asociaron con mejoras en la esperanza de vida durante las más de dos décadas a estudio.

En Europa, la OMS estima que las elevadas concentraciones de partículas en suspensión se asocian con alrededor de 300.000 defunciones prematuras anuales. Ese aumento en la mortalidad hace que, en promedio, la esperanza de vida de cada europeo disminuye en, al menos, un año.

Después de controlar por los cambios socioeconómicos, demográficos o los indicadores de exposición a tabaco, una disminución de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de partículas finas se asoció con un aumento en la esperanza de vida de, aproximadamente, 0,6 años.

Los resultados del estudio sugieren que las reducciones en la contaminación contribuyeron en alrededor de un 18% del incremento total en la esperanza de vida durante el periodo a estudio. Las áreas que consiguieron mayores reducciones del nivel de partículas presentaron mayor incremento en la esperanza de vida.

Como comentan los autores, los resultados de este estudio no son malos, sino buenas noticias. Una serie de factores han contribuido en las últimas décadas a mejorar la salud de la población y a alargar la esperanza de vida. Las evidencias aportadas por este estudio indican que la reducción de la contaminación atmosférica se encuentra entre los factores más importantes que han llevado a esta mejora en los Estados Unidos.

El estudio de Pope y colaboradores tiene limitaciones, que los propios autores reconocen, como su naturaleza ecológica o la no disponibilidad de información completa sobre hábito tabáquico. Sin embargo, los resultados son robustos al ajuste por variables socioeconómicas, demográficas e indicadoras de exposición al tabaco y los resultados son comparables a los obtenidos con predicciones de reducción de esperanza de vida debidos al riesgo asociado a exposición por $\text{PM}_{2,5}$.

En términos de salud pública, la estimación de que el 18% de la mejora en la esperanza de vida puede ser debida (en EEUU) a la mejora en la calidad del aire aporta elementos que pueden ser de gran utilidad a la hora de la toma de las decisiones políticas y de gestión.

MECANISMOS DEL DAÑO EN SALUD DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En los últimos años ha habido grandes avances en el desarrollo de estudios de los efectos a exposiciones controladas de contaminantes, en especial se ha avanzado sustancialmente en la comprensión de los efectos y mecanismos biológicos relacionados con las partículas y el ozono.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

En el caso de las partículas, a pesar de la consistencia de los resultados de los estudios epidemiológicos sobre su impacto en salud, la falta de una explicación del mecanismo fisiopatológico (el proceso íntimo por el que causa enfermedad o daño) ha hecho que se cuestionara dicha asociación como causal.

Ello generó un interesante debate entre unos autores que consideraban suficientes las pruebas científicas existentes y abogaban por una intervención más decidida, por un lado, y otros que cuestionaban que el impacto en salud estuviera causado por las partículas.

Todo esto ha constituido un impulso para la investigación toxicológica y para más estudios epidemiológicos que han aportado evidencias más firmes acerca de la coherencia biológica y la robustez de los resultados.

PARTÍCULAS Y FUNCIÓN PULMONAR

Dada la vía de entrada de las partículas existen menos dudas acerca de los mecanismos que podían causar problemas respiratorios, como **daño oxidativo** o **inflamación pulmonar**. Los contaminantes además interfieren con el **aclaramiento ciliar** en las vías respiratorias, lo que conlleva un incremento de riesgo de infección bacteriana o vírica.

El incremento de los niveles de partículas aumenta el riesgo de ingresos por causas cardiovasculares y respiratorias.

En un artículo reciente, Nino Kuenzli y Laura Pérez (2009) nos ofrecen un ejemplo del efecto de exposiciones crónicas, como el tabaco y la contaminación atmosférica, sobre la capacidad pulmonar. Una función pulmonar deficiente (medida, por ejemplo como disminución del **VEF₁**) se relaciona con inflamación sistémica y con enfermedades crónicas inflamatorias; de hecho, la función pulmonar es un marcador de esperanza de vida.

La Figura 5, adaptada de dicho artículo, proporciona un modelo de función pulmonar a lo largo de la vida en “poblaciones normales” y entre aquellos expuestos a factores que afectan el crecimiento funcional y el decaimiento a medida que aumenta la edad.

PARTÍCULAS Y SISTEMA CARDIOVASCULAR

Al contrario de lo ocurrido con las enfermedades respiratorias, la plausibilidad biológica de la asociación de la contaminación atmosférica por partículas con el sistema cardiovascular ha sido cuestionada durante décadas.

En los últimos años se han propuesto varios mecanismos fisiopatológicos (Figura 6). Una de las principales hipótesis es que las partículas inducen una activación de algunos mediadores que provocan un **incremento de la coagulabilidad sanguínea**. Otros mecanismos estudiados están relacionados con el control autonómico cardíaco, en los que se ha demostrado una asociación significativa de las partículas con un **aumento de la frecuencia cardíaca** y con la **disminución de la variabilidad** de la misma. También se ha encontrado una asociación de la exposición a partículas con **hipertensión arterial**.

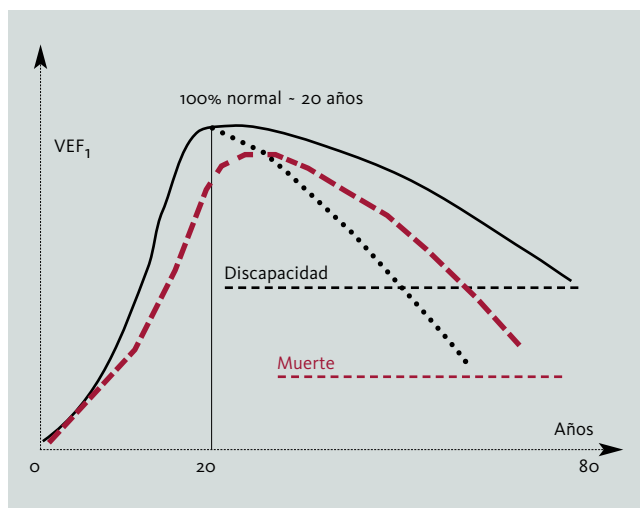


FIGURA 5. EVOLUCIÓN DE LA FUNCIÓN PULMONAR (MEDIDA COMO EL VOLUMEN ESPIRATORIO MÁXIMO EN EL PRIMER SEGUNDO –VEF₁) EN POBLACIÓN SANA (LÍNEA CONTINUA); EN POBLACIÓN FUMADORA (LÍNEA DE PUNTOS) Y EN POBLACIÓN EXPUESTA A CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (LÍNEA DISCONTINUA). FUENTE: ADAPTADO DE KUNZLI Y PÉREZ, 2009.

La exposición a partículas finas (PM_{2,5}) afecta gravemente la salud, incrementando el riesgo de morir por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como por cáncer de pulmón.

Por último, en estudios experimentales en humanos se ha encontrado **cambios inflamatorios** a nivel alveolar e incremento de niveles de fibrinógeno, leucocitos y plaquetas a nivel alveolar.

Un número creciente de estudios apoya la hipótesis de que la composición de las partículas ultrafinas y su contenido en **metales de transición**, podrían explicar su capacidad tóxica en el sistema cardiovascular. Por otro lado, un papel aditivo de otros contaminantes gaseosos no puede descartarse.

GASES

Existen pocas dudas acerca de la capacidad tóxica del **monóxido de carbono (CO)** sobre el sistema cardiovascular. Además se conoce que el CO puede producir disnea e hipoxia al provocar la formación de **carboxihemoglobina**.

Sin embargo, el mecanismo por el cual el **dióxido de nitrógeno (NO₂)** puede producir daño que desemboque en la muerte es poco conocido, aunque se ha argumentado que posiblemente se deba a la respuesta **inflamatoria** por la activación de vías **oxidativas** de este contaminante o a su capacidad para dañar la función de los **macrófagos alveolares**, provocando un incremento del riesgo de infección pulmonar.

Por último, en relación a los mecanismos tóxicos por los que actúa el **ozono**, los resultados de algunos estudios sugieren que, además de su capacidad **oxidante** para causar inflamación pulmonar, la exposición al ozono puede incrementar el trabajo del **miocardio** y alterar el **intercambio de gases** en los pulmones hasta un grado que podría ser clínicamente importante en perso-





La contaminación por ozono causa irritación al respirar, desencadena síntomas de asma, es causa de enfermedades respiratorias y del corazón, y está asociada con el riesgo de defunción prematura.

nas con daño cardiovascular preexistente, con o sin enfermedad pulmonar concomitante.

Con todo lo anterior, y dada la mezcla compleja que representa la contaminación atmosférica urbana, con fuentes comunes y alta correlación entre contaminantes, es difícil atribuir los efectos a un único contaminante. Más bien hay que considerar las **partículas como un marcador de los niveles de contaminación en una ciudad**. De todos modos, el conocimiento sobre los mecanismos biológicos de esta asociación sigue siendo limitado y requiere mucha investigación adicional desde diferentes campos.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD INFANTIL

En comparación con los adultos, los **niños** pequeños presentan una **vulnerabilidad especial a los tóxicos ambientales**. Esto se debe, principalmente, a inmadurez fisiológica y a diferencias en la exposición. Además hay que tener en cuenta que, por ser la exposición en edades tempranas, los posibles efectos en salud van a tener más tiempo de vida para manifestarse, y, caso de ocurrir, el daño será mayor en términos de años de vida perdidos o años con discapacidad.

En el caso de los contaminantes atmosféricos en que la exposición ocurre vía inhalación, la vulnerabilidad es mayor debido a que las **vías aéreas y los alvéolos se están desarrollando** todavía. Junto a lo anterior, los **mecanismos de defensa** son todavía **inmaduros**. Por otro lado, el niño suele pasar más tiempo en el exterior que los adultos y, además, hay que tener en cuenta que los niños, en términos relativos, inhalan el doble de aire que los adultos (Schwartz, 2004).

Un trabajo llevado a cabo con el objeto de proporcionar información de base para el desarrollo del **Plan de Acción sobre Medio Ambiente y Salud Infantil en la Región Europa** (Valent et al, 2004) informa que en Europa, entre el 1,8 y el 6,4% de las muertes en niños de 0 a 4 años son debidas a contaminación atmosférica en ambiente exterior y un 3,6% a la contaminación atmosférica interior. Aunque el impacto es mayor en los países de Europa Oriental, los autores destacan que un efecto de los riesgos ambientales en la salud de los niños es detectable en todos los países de Europa.

Estudios epidemiológicos han demostrado la asociación de la **exposición prenatal** a contaminación atmosférica con diversos efectos relacionados con el desarrollo fetal. Para el bajo peso al nacimiento y retraso en el crecimiento intrauterino, los resultados son compatibles con una relación causal. Para parto pretérmino, es necesario contar con mayor número de estudios, aunque las pruebas existentes sugieren que podría existir un vínculo causal. Para las malformaciones congénitas, no existen pruebas concluyentes que indiquen causalidad de la contaminación atmosférica (Sram et al 2005).

Existe suficiente evidencia que indica que la exposición a contaminación atmosférica durante el **primer año de vida** se ha asociado con un incremento del riesgo de mortalidad infantil de magnitud mayor que el riesgo encontrado para adultos (Lacasaña et al, 2005; Sram et al, 2005).

La exposición a contaminación por partículas afecta el desarrollo de la función pulmonar, agrava el asma y causa otros síntomas respiratorios tales como la tos y la bronquitis en niños.

En una reciente monografía de la OMS (WHO, 2005) (Figura 7) se ha revisado la literatura científica sobre el impacto de la contaminación atmosférica en diferentes aspectos de la salud de los niños. Los trabajos científicos revisados indican que existe evidencia suficiente para inferir **causalidad** en la relación entre la **contaminación atmosférica** y un aumento en la prevalencia e incidencia de **tos y bronquitis**. Existe menos evidencia para poder asegurar una relación causal entre incidencia de asma y la contaminación del aire en general.

Sin embargo, sí existen pruebas más consistentes respecto a su relación con el aumento en la frecuencia de urgencias e ingresos por **asma**. También existen pruebas suficientes para la relación causal de la contaminación con la exacerbación de síntomas como las **sibilancias** y la **tos**. La mayoría de estos efectos se relacionan con contaminantes derivados de las emisiones del **tráfico**, como las partículas y el dióxido de nitrógeno, así como con el ozono.

En la citada revisión de la OMS, se han evaluado también los estudios que abordan otras hipótesis como la posible relación de la contaminación atmosférica con el riesgo de **cáncer infantil** y con el **desarrollo neurológico de los niños**. El conjunto de la literatura científica analizada indica que no existen evidencias consistentes para la relación causal entre la contaminación originada por el tráfico que llega a la vivienda y la incidencia de cáncer infantil.

No obstante, se reconoce que el número de estudios disponibles hasta ahora es bajo y que existen limitaciones metodológicas importantes como la dificultad de disponer de medidas adecuadas de la exposición durante diferentes periodos de la vida (Raaschou-Nielsen y Nelson, 2006).

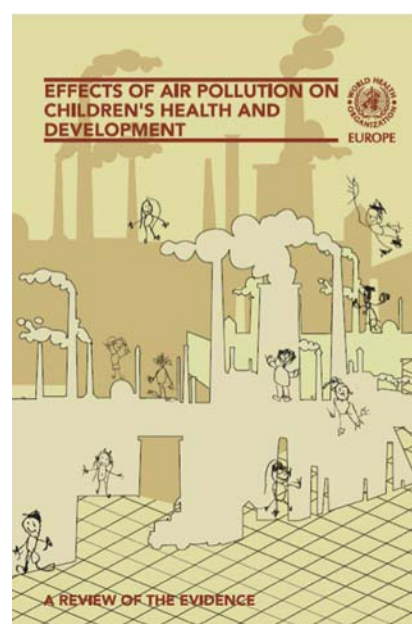


FIGURA 7. PORTADA DEL LIBRO DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD CON LOS RESULTADOS DE LA REVISIÓN CIENTÍFICA DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA SALUD Y EL DESARROLLO DE LOS NIÑOS.

En España, el **Proyecto INMA “Infancia y Medio Ambiente”** se desarrolla por una red de grupos de investigación que pretende, mediante una metodología en común, relacionar las exposiciones pre y postnatales a contaminantes ambientales, en el aire, el agua y los alimentos, con los posibles efectos en la salud de los niños, incluyendo su crecimiento y desarrollo.

El proyecto consiste en un estudio de cohortes de base poblacional, en el que participan unos 4.000 pares de mujeres y sus hijos a los que se sigue durante la gestación y la infancia de los niños (Figura 8). Las mujeres se reclutan en varios lugares, formando un conjunto de cohortes, lo que permite tener representación de diferentes puntos de la geografía española. Las áreas que participan con cohortes de madres y niños son: Flix (Ribera de L'Ebre), Menorca, Granada, Valencia, Sabadell, Asturias y Gipuzkoa. De todas ellas, las tres primeras ya se habían formado en el momento de iniciar la Red INMA (cohortes previas), mientras que el resto comenzó con posterioridad (cohortes nuevas).

Entre las exposiciones ambientales a estudio en el proyecto se encuentra la evaluación de la exposición a contaminantes atmosféricos durante el embarazo y la infancia y su posible repercusión sobre la salud (Esplugues et al, 2006).

Los primeros resultados sobre los efectos de la contaminación atmosférica indican que la exposición a contaminación atmosférica durante el embarazo se asocia con un **menor peso al nacer** (Aguilera et al, 2009), así como con un **retraso en el crecimiento fetal** (Ballester et al, en prensa).

GRUPOS DE POBLACIÓN MÁS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Junto los niños y las mujeres embarazadas existen otros grupos de población que tienen un riesgo mayor de padecer los efectos causados por la contaminación atmosférica.

Entre ellos se encuentran las **personas con enfermedades respiratorias**, como el asma, la bronquitis crónica o el enfisema, los que padecen **enfermedades cardiovasculares** o **diabetes** y, en general, las personas de edad avanzada que padezcan alguna **enfermedad crónica**.

En relación a la contaminación del aire, también se ha encontrado un riesgo mayor en las personas que **trabajan al exterior** o en lugares donde se está más expuesto a emisiones de contaminantes, como por ejemplo, en calles muy contaminadas o determinadas industrias.

Por otro lado, diferentes estudios han descrito que las personas de **nivel socioeconómico más bajo** padecen más los efectos de la contaminación atmosférica.

Existen grupos de población que son más vulnerables a padecer los efectos de la contaminación atmosférica. Entre ellos destacan, los niños, las mujeres embarazadas y las personas con patología respirato-

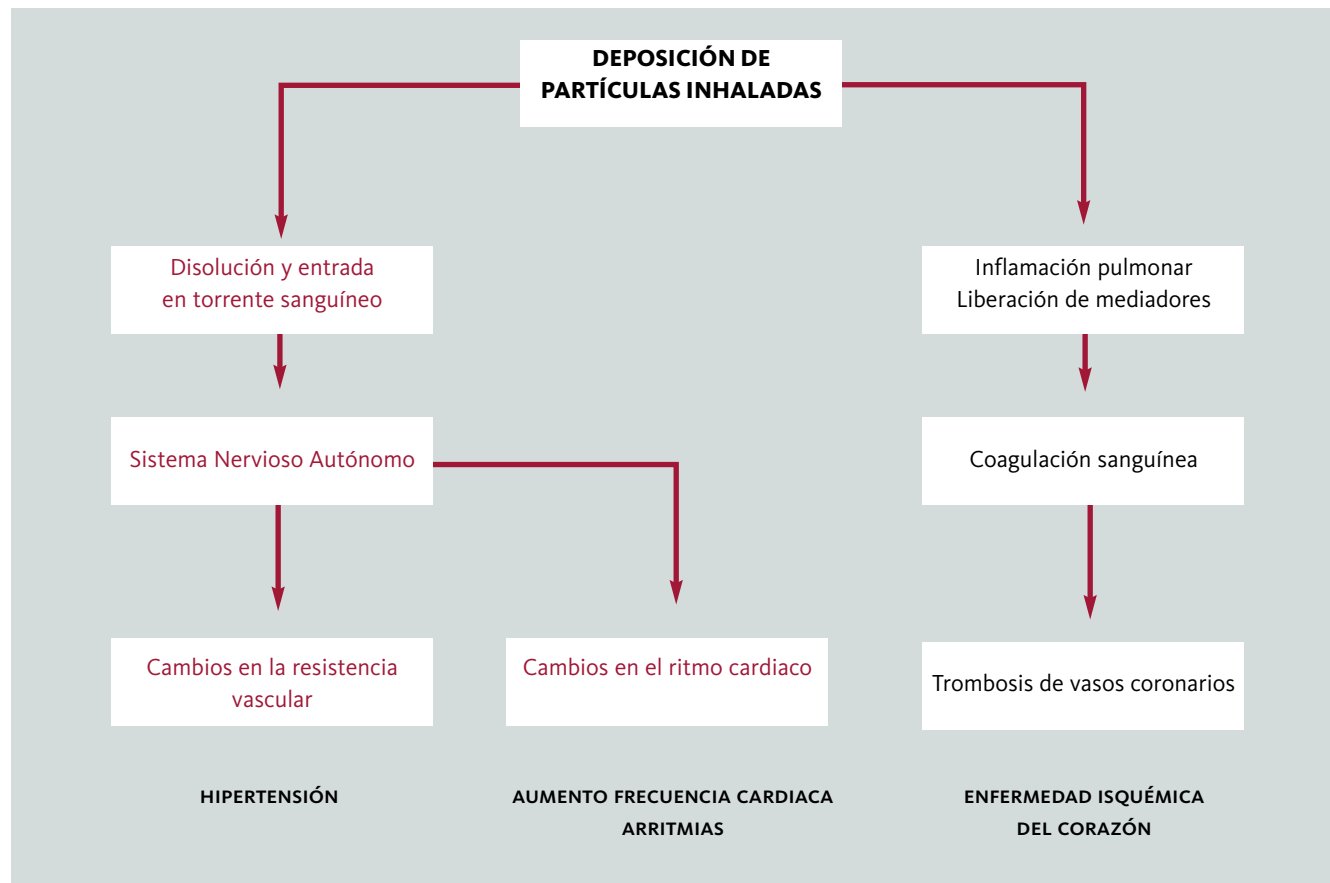


FIGURA 6. POSIBLES MECANISMOS FISIOPATOLÓGICOS IMPLICADOS EN LA RELACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR PARTÍCULAS Y LAS ENFERMEDADES CARDÍACAS. FUENTE: ADAPTADO DE TENÍAS Y BALLESTER, 2002.



FIGURA 8. PÁGINA DE PORTADA DEL PROYECTO INMA (WWW.PROYECTOINMA.ORG).

ria, cardiovascular y diabetes, así como las personas de edad avanzada

No está totalmente dilucidado si el mayor riesgo se debería a una mayor exposición (por el trabajo, por vivir en zonas más contaminadas, por características de la vivienda), o si se debería a un mayor efecto debido a una interacción con otros factores como una peor alimentación u otros hábitos de vida (menor actividad física, consumo de alcohol y/o tabaco).

¿QUÉ PUEDO HACER PARA PROTEGERME DE LOS PELIGROS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA?

Con el fin de protegerse de los peligros relacionados con la contaminación dichos grupos de riesgo deben tomar precauciones especiales. Diferentes Agencias, asociaciones de profesionales, de grupos de pacientes, o de grupos de defensa del medio ambiente proporcionan consejos a través de sus páginas web y medios de comunicación. El Departamento de Salud y Servicios Sociales de Quebec, en Canadá, proporciona las recomendaciones recogidas en el recuadro de esta página.

En algunos países o ciudades existen **Índices de Calidad del Aire y Salud** que ayudan a planificar y tomar decisiones respecto a las actividades y viajes que se realizan.

Junto a todo lo anterior, que puede representar una ayuda para la toma de decisiones encaminadas a prevenir problemas agudos de salud, todos podemos contribuir a la disminución de los niveles de los contaminantes atmosféricos y, por tanto, a mitigar sus efectos, especialmente los efectos a largo plazo, debidos a exposiciones crónicas.

Dichos esfuerzos ayudarán a mejorar nuestra salud y, de manera solidaria, prevenir los efectos sobre la población más vulnerable.

Paralelamente a las medidas reglamentarias y a las actividades de planificación urbana y del transporte y al desarrollo de tecnologías que se abordan en otros capítulos de esta monografía, los comportamientos individuales pueden contribuir a disminuir los niveles de contaminación.

RECOMENDACIONES PARA PROTEGERSE DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS SOCIALES DE QUEBEC, EN CANADÁ

- Limitar el tiempo que se está en zonas altamente contaminadas como calles con mucho tráfico y zonas industriales, especialmente al practicar algún deporte.
- Hacer ejercicio cuando los niveles de contaminación son más bajos.
- Mantenerse activo, ya que el ejercicio físico mejora la salud y previene la enfermedad.
- En el caso de las personas con patologías crónicas, especialmente del aparato respiratorio o cardiovascular, tomar la medicación y seguir las recomendaciones de sus médicos.
- Recordar que la contaminación del interior de los edificios también puede afectar la salud. Por ello, se ha de reducir al máximo los contaminantes en ambientes interiores, como el humo del tabaco o los compuestos orgánicos volátiles.

Desplazarse en bicicleta o a pie, es una alternativa nada contaminante y en la que además se realiza una actividad física muy saludable.

Por ejemplo, podemos preferir utilizar un vehículo menos contaminante, mantenerlo en buen estado para reducir las emisiones, evitar dejar el motor en marcha mientras no se circula y conducir sin aceleraciones bruscas ni a golpes.

Más eficiente y responsable aún, podemos viajar varias personas en un coche, utilizar más a menudo los transportes colectivos, circular en bicicleta o desplazarnos a pie.

Desplazándonos en bicicleta y a pie, además, realizaremos una actividad física muy saludable. En la casa, en el trabajo y en aquellas actividades que realicemos cotidianamente, podemos optar por los aparatos y usos más eficientes de la energía.

Además, en nuestra comunidad y en los ámbitos de participación pública podemos colaborar y animar a la toma de acciones por un ambiente más limpio y saludable y por un futuro realmente sostenible.



cap.3

35

ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS URBANAS

XAVIER QUEROL

LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE SIGUE SIENDO UN IMPORTANTE RETO

La sociedad europea ha demostrado siempre una elevada concienciación social en lo concerniente a la **contaminación atmosférica y sus efectos adversos sobre la salud**. Ello ha llevado en los últimos 50 años a aplicar medidas de reducción progresiva de las emisiones industriales y urbanas (como, por ejemplo, la limitación del uso del carbón en las calefacciones) y a dar la imagen de que la calidad del aire de las ciudades era ya aceptable. Por ello en los últimos años se ha producido una focalización del interés social en el cambio climático en lugar de la calidad del aire.

Sin embargo, las evidencias de causa-efecto probadas por trabajos epidemiológicos en la década de los noventa (Pope y Dockery, 2006; WHO, 2005) han demostrado que **incluso a niveles de contaminación relativamente bajos respecto a los de la década de los setenta, existe un impacto significativo de la contaminación en la mortalidad**. Ello ha reactivado nuevamente el interés social por la calidad del aire y, con ello, se ha propiciado la reciente aprobación de mencionada Directiva 2008/50/CE, que además de integrar las anteriores, se plantea unos objetivos adicionales bastante exigentes. El cumplimiento de dichos objetivos exige el perfeccionamiento y aplicación de **estrategias tecnológicas y no tecnológicas** que permitan reducir marcadamente las emisiones antropogénicas de contaminantes.

Como ya se indicaba en el capítulo 1, existe un gran número de **contaminantes atmosféricos** con distintas repercusiones en la atmósfera. Entre ellos destacan el **dióxido de carbono** (CO_2), el **monóxido de carbono** (CO), el **óxido de azufre** (SO_2), los **óxidos de nitrógeno** (NO y NO_2), el **amoníaco** (NH_3), el **ácido sulfhídrico** (H_2S), el **material particulado atmosférico**, PM, (o “partículas sólidas en suspensión”, incluyendo metales, compuestos inorgánicos secundarios y una gran cantidad de compuestos orgánicos, algunos persistentes) y un elevado número de **compuestos orgánicos volátiles** (COV).

Además el **ozono** (O_3), el cual actúa positivamente en la estratosfera ya que reduce la radiación ultravioleta, pero en la troposfera tiene efectos negativos sobre la salud humana y la vegetación, debido a su elevado poder oxidante.

El **dióxido de carbono** (CO_2) siempre debe ser tratado de forma separada a los demás contaminantes pues sus efectos no se dejan sentir a nivel local o regional sino en su contribución planetaria al efecto invernadero y al calentamiento global de la atmósfera. Sin embargo a la hora de diseñar estrategias tecnológicas de reducción de emisiones deben contemplar el posible efecto colateral sobre el potencial incremento sobre las emisiones de otros contaminantes con impacto negativo en calidad del aire.

Incluso a niveles de contaminación relativamente bajos respecto a los de la década de los setenta, existe un impacto significativo de la contaminación en la mortalidad

En las ciudades (donde habita la mayoría de la población europea), las emisiones del tráfico rodado, las residenciales (calefacciones, cocinas), y actividades como la construcción y demolición, además de las posibles emisiones industriales o de generación eléctrica, dictan el grado de contaminación atmosférica. Además de estas fuentes, pueden coexistir también emisiones de buques (motores principalmente), actividades portuarias (carga, descarga y manipulación de graneles), aeropuertos, minas y canteras, y actividades agropecuarias, entre otras. Aun reconociendo la diversidad de fuentes de emisión, el tráfico rodado es una de las principales fuentes que afectan a los niveles de exposición de la población urbana a los contaminantes atmosféricos. Ello se debe a que la emisión se produce a gran proximidad de la población y de forma muy extendida en la urbe.

Si consideramos el inventario de las emisiones nacionales o europeas del tráfico rodado (Figuras 1 y 2), quizás su papel sea menos relevante que si nos referimos a su contribución a los niveles de exposición humana (Figura 3), pues hay que considerar que aunque la generación eléctrica o las emisiones industriales en tonelaje pueden ser muy importantes, los puntos de emisión están generalmente alejados de la población y la altura a la que se producen favorece su dilución y dispersión, mientras que las emisiones del tráfico se producen en la proximidad de los ciudadanos.

A la hora de considerar los niveles de emisiones de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas españolas es necesario tener en

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se basa en el resultado de estudios realizados por el CSIC para el Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire que el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino está desarrollando.

36

cuenta, además, algunas peculiaridades que este país presenta y que pueden influir en las concentraciones de contaminantes atmosféricos. Así el diseño y arquitectura de las ciudades españolas difieren de los de otros países europeos, en cuanto a la mayor densidad de edificios de apartamentos y a la altura de éstos, lo que provoca un efecto de pantalla en las emisiones producidas por el tráfico. Ello dificulta la dispersión de contaminantes e incrementa marcadamente los niveles en aire ambiente respecto a otras estructuras urbanas europeas que se caracterizan por mayores espacios verdes, menor densidad y construcciones bajas.

Otro fenómeno con el mismo efecto es la baja tasa de precipitación, especialmente en el centro, sur y este de España, lo que impide el lavado atmosférico e influye en la importancia de procesos de resuspensión por el tráfico rodado del material particulado depositado en los firmes de carretera. Asimismo, la elevada radiación solar en los meses estivales se traduce en un incremento de los niveles de partículas (como sulfato y nitrato) generadas en la atmósfera a partir de gases precursores, NO_2 y O_3 . Estos incrementos se ven aún más acentuados por la baja capacidad dispersiva de la atmósfera en verano. Dicho de otra manera, la topografía

urbana característica y el clima del sur de Europa hacen que la misma emisión del tráfico produzca un mayor impacto en los niveles de contaminantes en aire ambiente respecto al centro y norte de Europa.

LAS EMISIONES: FUENTES Y CONTAMINANTES

Debido a la disminución marcada de las emisiones de contaminantes atmosféricos de origen industrial y al incremento del parque de vehículos, el **tráfico rodado** aporta una gran parte de la exposición humana a contaminantes atmosféricos en zonas urbanas. Las necesidades de movilidad de los ciudadanos y el transporte de mercancías han contribuido notablemente a incrementar los niveles de contaminantes atmosféricos.

Los principales contaminantes emitidos directamente por el tráfico son el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), y material particulado (PM). Además de estas emisiones directas del

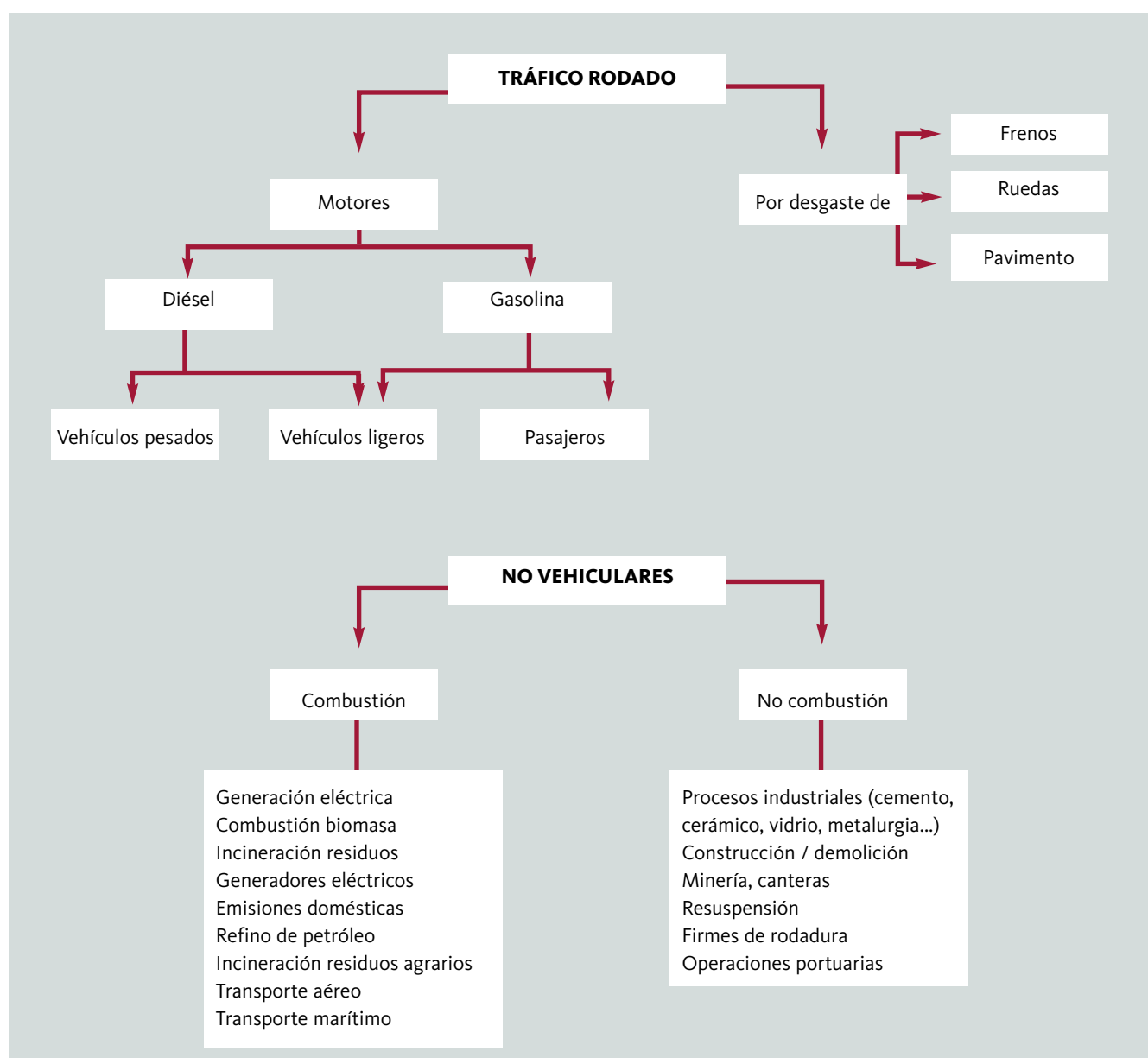


FIGURA 1. PRINCIPALES FUENTES EMISORAS DE PM Y NOx EN Y ALREDEDOR DE ZONAS URBANAS (MARM, 2010).

motor, el desgaste de frenos y neumáticos así como la erosión del firme de rodadura y la resuspensión del material depositado en la calzada contribuyen a la emisión de material particulado a la atmósfera (Figura 1).

La topografía urbana y el clima del sur de Europa hacen que la misma emisión de tráfico produzca un mayor impacto en los niveles contaminantes en el aire respecto al centro y norte de Europa

En zonas urbanas, aproximadamente el 50% de emisiones de **NO_x** se produce por combustión en los motores de los vehículos, mien-

tras que otras fuentes de emisión son las centrales eléctricas y demás fuentes industriales (Figuras 1 y 2). Los niveles elevados de NO_x además de influir en los niveles de **ozono** (contaminante secundario que se genera en la atmósfera por reacción de NO₂ y precursores gaseosos orgánicos), y la formación de lluvia ácida, pueden perjudicar la salud pública afectando especialmente el sistema respiratorio al dañar el tejido pulmonar causando muertes prematuras (Mauzerall et al., 2004).

En cuanto al **material particulado**, estudios realizados en diferentes ciudades de España y Europa muestran al tráfico como responsable de hasta un 50% de los niveles medios anuales de PM₁₀ y PM_{2,5} (concentración en aire ambiente de partículas con un diámetro inferior a 10 y 2,5 µm, respectivamente, expresada en µg/m³). PM10 puede dividirse a su vez en tres categorías de acuerdo a su

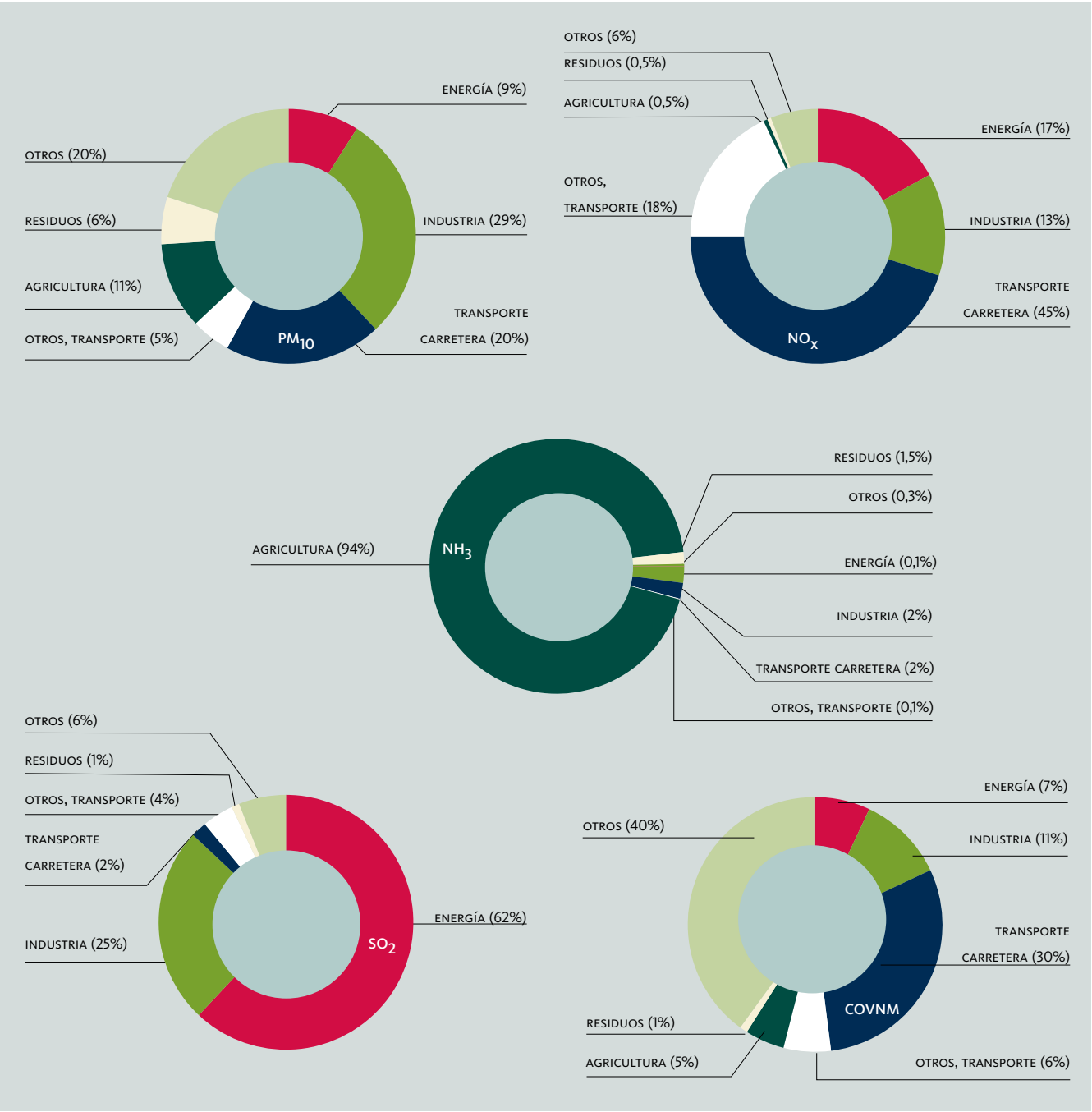


FIGURA 2. PORCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN AL INVENTARIO EUROPEO DE EMISIONES DE PM₁₀ PRIMARIO, ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y AZUFRE (NO_x Y SO₂), AMONÍACO (NH₃) Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES NO METÁNICOS (COVNM). ESTOS CUATRO ÚLTIMOS CONTAMINANTES SON GASEOSOS PERO SON PRECURSORES DEL PM SECUNDARIO (COMISIÓN EUROPEA, 2004).

tamaño, incluyendo una fracción gruesa (2.5-10 μm , deposición extra-torácica), fina (0.1-2.5 μm ; deposición bronquial) y ultrafina (<0.1 μm ; deposición alveolar).

Entre las emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes del tráfico rodado y de otros motores estacionarios es necesario destacar las emisiones de los **motores diésel**. En nuestros días, la tecnología diésel está sufriendo una transformación importante para dar respuesta a las demandas ambientales. Así, la industria del automóvil ha realizado un gran esfuerzo para llegar a poder cumplir los nuevos límites de emisión de contaminantes atmosféricos; sin embargo el gran incremento del parque de vehículos, la dieselización de dicho parque y la masificación urbana con tráfico muy denso no han permitido reflejar dicho esfuerzo en un incremento notorio de calidad del aire en lo referente a partículas en suspensión ni en lo referente a NO_2 .

Mientras **algunos** metales son emitidos en grandes volúmenes por emisiones naturales (erupciones volcánicas, tormentas de polvo, alteración de rocas y suelos, fuegos forestales), muchos otros tienen un origen antropogénico. Por ejemplo el vanadio (V), el cobalto (Co), el molibdeno (Mo), el níquel (Ni), el antimonio (Sb), el cromo (Cr), el hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el estaño (Sn) son emitidos durante la combustión de hidrocarburos (Pacyna, 1986), y el arsénico (As), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el manganeso (Mn) y el zinc (Zn) en industrias metalúrgicas (Pacyna, 1986). La contaminación del tráfico (principalmente desgaste de frenos y ruedas) incluye un amplio rango de emisiones de elementos metálicos

como el hierro (Fe), el bario (Ba), el plomo (Pb), el cobre (Cu), el zinc (Zn) y el cadmio (Cd), antimonio (Sb) (Amato et al., 2009a).

Óxidos de nitrógeno, partículas y ozono presentan los principales problemas de cumplimiento de valores límite

Aunque la tendencia en las últimas décadas es situar las instalaciones industriales en las afueras de las ciudades, existen aún focos industriales ubicados en los entornos urbanos. Además, las ciudades en su rápido crecimiento se aproximan, o incluso engloban, a los polígonos industriales. La contaminación de origen industrial se caracteriza por la gran cantidad de contaminantes producidos en las distintas fases de los procesos de producción y por la variedad de los mismos. Los tipos de contaminantes emitidos dependen fundamentalmente del tipo de proceso de producción empleado, y de la tecnología y materias primas utilizadas. Por otra parte, en los focos de emisión industriales se suelen combinar las emisiones puntuales y canalizadas (principalmente a través de chimeneas), fácilmente controlables, con emisiones difusas, de difícil control. Las actividades industriales que producen contaminantes atmosféricos son muy variadas, pero los principales focos están en los procesos productivos utilizados en las industrias básicas. Entre los sectores que dan lugar a la mayor emisión de contaminantes atmosféricos podemos destacar la generación eléctrica, la metalurgia, la industria química, las refinerías de petróleo y la industria cerámica y cementera.

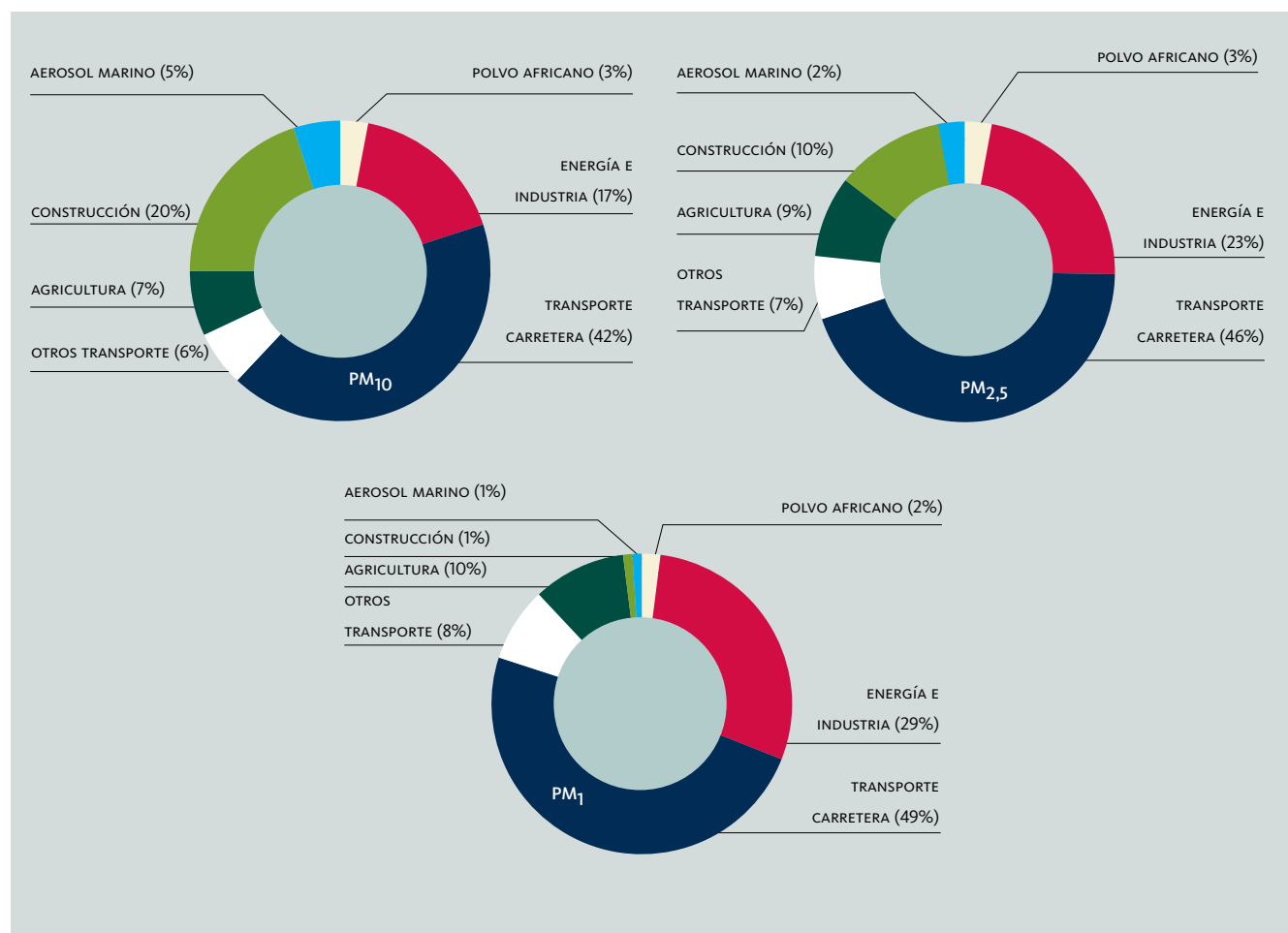


FIGURA 3. PORCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN A LOS NIVELES EN AIRE AMBIENTE DE PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ Y PM_1 , EN EL FONDO URBANO DE LA CIUDAD DE BARCELONA (AMATO ET AL., 2009b).

MEDIDAS PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE

En el pasado, la utilización de combustibles con alto contenido en **azufre** (S) tanto en plantas industriales y de generación de electricidad, como en actividades domésticas, dio lugar al desarrollo de episodios de contaminación extremadamente intensos (como el de Londres de 1952). A raíz de estos episodios se implementaron diferentes directivas relativas al contenido en S en los combustibles y a la mejora de las instalaciones de combustión con objeto de reducir los niveles de emisión de SO₂ y que han resultado en una disminución drástica de los niveles en aire ambiente de este contaminante primario y de los contaminantes secundarios derivados. Actualmente, exceptuando casos muy concretos, los niveles de SO₂ registrados en áreas urbanas son sólo ligeramente superiores en las estaciones de tráfico respecto a las industriales. El progresivo uso de combustibles con bajo contenido en azufre es responsable de las relativamente bajas emisiones de SO₂ del tráfico rodado.

De entre todos los contaminantes citados hasta ahora y regulados por las directivas 2008/50/CE y 2004/107/CE, son NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y O₃, los que presentan los principales problemas de cumplimiento de los valores límite (Tabla 1). De ellos, los tres primeros presentan problemas de superación de los niveles normativos en la mayor parte de las grandes áreas urbanas españolas. Ello conlleva que una gran parte de la población española está sometida a niveles de exposición de contaminantes atmosféricos superiores a lo permitido por la legislación común europea. En tales problemas,

la CE exige el desarrollo y aplicación de planes de mejora de calidad del aire que incluyan las medidas necesarias para reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos, o de sus precursores, con el fin de cumplir los citados objetivos de calidad del aire. A continuación se aporta una revisión resumida de dichas medidas.

Como se ha comentado anteriormente, en el caso de NO₂, el problema de las superaciones es casi exclusivo del tráfico rodado en zonas urbanas, debido a la alta densidad del tráfico y a la elevada proporción de vehículos diésel de la flota española. La elevada densidad de motores diésel ha causado que el problema del NO₂ primario (emitido por el motor, y no producido a partir de la conversión de NO a NO₂) sea el causante de las superaciones de los valores límite.

En el caso del PM las contribuciones del tráfico a los niveles en aire ambiente de PM₁₀ y PM_{2.5} son generalmente de entre el 35% y el 50%. En el caso de PM₁ son superiores al 50% (Figura 3). Existen además hotspots de construcción-demolición e industriales en donde estas fuentes son también causantes de las superaciones de los valores límite. Ello indica que son el tráfico, la construcción-demolición y la industria las fuentes objeto de planes para mejorar la calidad del aire; sobre todo el tráfico y las demás fuentes del centro urbano.

En el caso de las **emisiones industriales** la Directiva IPPC (Directiva para la Prevención y Control Integrados de la Contaminación, 2008/01/CE) establece ya una serie de mejores técnicas disponibles a utilizar en procesos industriales. La aplica-

RD 1073/2002, 18 Oct 2002, BOE 260, 30 Oct 2002 y 2008/50/EC del 11/06/2008		
Horario	350 µg/m³ SO ₂	24 ocasiones por año
Diario	125 µg/m³ SO ₂	3 ocasiones por año
Anual prot. ecos.	20 µg/m³ SO ₂	no superar ni anual ni media 1 Oct-31 Mar
Horario	200 µg/m³ NO ₂	18 ocasiones por año
Anual	40 µg/m³ NO ₂	no superar
Anual prot. vegetación	30 µg/m³ NO _x	(expresado como NO ₂) no superar
Anual	5 µg/m³ Benceno	no superar
Media 8-h máx. en un día	10 mg/m³ CO	no superar
Anual	500 ng/m³ Pb	no superar
Anual	40 µg/m³ PM ₁₀	no superar
Diario	50 µg/m³ PM ₁₀	n<35 por año
Anual	25 µg/m³ PM _{2.5}	no superar límite 2015
Anual	20 µg/m³ PM _{2.5}	no superar límite 2020
Indicador exposición PM _{2.5} 2008-2010 a 2018-2020	reducir 20% PM _{2.5} trienal en estaciones de fondo urbano	
Anual	25 µg/m³ PM _{2.5}	no superar obligación 2010
Anual	20 µg/m³ PM _{2.5}	no superar obligación 2015
RD 8012/2007 del 22 de Junio de 2007, BOE, 23 Junio 2007		
Anual	6 ng/m³ As	no superar
Anual	20 ng/m³ Ni	no superar
Anual	5 ng/m³ Cd	no superar
Anual	1 ng/m³ Benzo[α]pireno	no superar

TABLA 1. VALORES LÍMITE Y OBJETIVO, Y UMBRALES, DE ACUERDO CON LAS DIRECTIVAS DE CALIDAD DEL AIRE.

ción progresiva de los valores límite fijados para cada tipo de proceso ha permitido y permitirá reducciones sustanciales de las emisiones de contaminantes atmosféricos. Sigue siendo sin embargo un problema muy importante el control y reducción de emisiones industriales fugitivas o difusas, no canalizadas.

Dado el ámbito en el que se enmarca la presente publicación, nos centraremos solamente en las **estrategias para la mejora de la calidad basadas en actuaciones sobre el tráfico rodado y la construcción/demolición**. Pues como muestra las Figura 3, suponen dos de las fuentes principales que contribuyen a incrementar los niveles de contaminación de PM y NO_x en áreas urbanas de nuestro país. La revisión aquí presentada está basada en los estudios realizados por el CSIC para el **Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire** que el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino está desarrollando (MARM, 2010).

MEDIDAS PARA EL TRÁFICO RODADO URBANO

Existen medidas tecnológicas y no tecnológicas que aplicadas al tráfico rodado permiten mejorar la calidad del aire urbano. Las primeras van dirigidas a reducir emisiones de combustión por unidad de motor y kilómetro recorrido (por el momento no de abrasión, ni fugitivas del depósito de combustible) y aunque es aconsejable su aplicación, tanto para medidas con efecto a corto, medio y largo plazo, las medidas más efectivas son siempre las no tecnológicas.

El objetivo de estas últimas es reducir el uso del transporte privado dentro de la ciudad, mediante:

- la mayor explotación de otros sistemas de transporte, como el público, la bicicleta o incentivar los vehículos con varios pasajeros;
- diseño de ciudades y áreas periféricas con infraestructuras de transporte adecuadas;
- diseño de ciudades que incorpore la distribución espacial de los posibles niveles de exposición de contaminantes, para evitar solapar áreas de tráfico denso con centros de ocio, escolares, locales públicos, u otros tipos de centros en los que los ciudadanos ocupen una proporción importante del día.

MEDIDAS NO TECNOLÓGICAS

De entre las medidas no tecnológicas las que tienen mayor efecto sobre la mejora de la calidad del aire son aquellas encaminadas a reducir la densidad del tráfico rodado en zonas céntricas urbanas. Para conseguir mejoras apreciables de la calidad del aire, la reducción del tráfico ha de ser notable. Así Nagl et al. (2007) calculan que para conseguir cumplir los valores límite de calidad del aire en zonas urbanas de diferentes ciudades la reducción del tráfico urbano ha de alcanzar valores del 30 al 40%.

Obviamente, antes de aplicar una serie de medidas disuasorias del uso del transporte privado individual debe de haberse optimizado al máximo el transporte público, de manera que los ciudadanos tengamos una opción de transporte atractiva. De otra manera las actuaciones de restricción del tráfico podrían tener un impacto muy negativo sobre la movilidad urbana.

Para conseguir mejoras apreciables de la calidad del aire, la reducción de tráfico ha de ser notable, en torno al 30 o el 40%

Nagl et al. (2007) exponen que es muy importante que precediendo al plan de mejora se aplique una primera medida no tecnológica: la **divulgación** social del problema y la **comunicación** clara a los ciudadanos de que hay acciones a tomar que pueden influir en su movilidad, pero que son imprescindibles para mejorar la calidad del aire. Sin esta campaña intensiva preliminar de concienciación ciudadana, el cumplimiento de las medidas que posteriormente entrarán en vigor puede verse seriamente reducido. Además, la experiencia de la aplicación de muchos planes muestra que los clubes de automovilistas reaccionan negativamente frente a muchas de las acciones, e incluso llegan a orquestar campañas de oposición a las mismas.

Probablemente no hay una medida única que pueda conseguir la citada reducción del tráfico urbano, sino que ésta se alcanza mediante la implementación de diversas estrategias. Entre las medidas a destacar figuran las siguientes:

RESTRICCIONES DE TRÁFICO CONTINUADAS

Las restricciones continuadas del tráfico rodado se han aplicado en Europa mediante dos estrategias:

- La aplicación de **peajes urbanos** que restrinjan el acceso de vehículos a las **zonas céntricas**. Esta estrategia se ha aplicado en Londres (mediante el peaje urbano a una zona central por acceso diario y tarifa fija) y Estocolmo (mediante tarifa variable según hora del día). Ello se consigue mediante cámaras que se encargan de identificar y activar el cobro del peaje mediante lectura de la matrícula.
- La definición de una **zona de bajas emisiones (ZBE)** en el casco urbano a la cual no se permite el acceso a vehículos muy contaminantes. Esta opción ha sido elegida por Berlín y las principales ciudades alemanas. Para ello el Gobierno Central establece un sistema de clasificación estatal de vehículos en función de las emisiones por etiquetas adhesivas. La Tabla 2 muestra la clasificación alemana de vehículos, así como las fases de limitación de circulación de la ZBE. Posteriormente, la Administración Regional incorpora a la legislación los requisitos específicos para que la Administración Local puede restringir el paso a la ZBE a determinados vehículos, basándose en criterios ambientales. Finalmente, la Administración Local delimita y aplica la restricción de vehículos, según calendario y exigencias ambientales (en base a la composición y edad del parque de vehículos de las ciudades).

El establecimiento de peajes puede presentar socialmente impactos negativos, de manera que se permita el acceso selectivamente a una parte de los ciudadanos con mayor poder adquisitivo. Además, se paga por contaminar pero se sigue contaminando si se puede permitir el pago de la tasa. El efecto de discriminación social puede darse también de forma menos marcada en las ZBEs, pero al menos la medida conlleva obligatoriamente una reducción de las emisiones. Por otra parte las ZBEs tienen como efecto directo la renovación del parque de vehículos con criterios ambientales.

OTRAS MEDIDAS QUE FAVOREZCAN LA RENOVACIÓN DEL PARQUE DE VEHÍCULOS

Determinados planes como el ‘Plan E’ o el ‘Plan Prever’ han resultado muy efectivos en cuanto a la renovación del parque automovilístico, y por tanto han permitido retirar de la circulación a los vehículos más contaminantes.

DISEÑO DE ESTRUCTURAS LOGÍSTICAS URBANAS QUE INCORPOREN CRITERIOS AMBIENTALES

Esta es también una de las medidas esenciales. Consiste en incluir en la ordenación del territorio criterios de movilidad, emisiones y calidad del aire. Ejemplos de tales medidas son:

- a) El diseño logístico del transporte comercial y público de las ciudades con criterios ecológicos (transporte comercial y público ferroviario evitando la creación de zonas intra-urbanas o ‘ciudades’ de recepción y distribución de productos comerciales basados en el transporte por vehículos pesados y comerciales ligeros, en su mayoría diésel).
- b) Crear infraestructuras de transporte público en paralelo al crecimiento urbano periférico.
- c) En un mismo escenario de calidad del aire, existen zonas muy próximas a arterias de tráfico con elevados niveles de contaminación, y otras más alejadas de éste y con mejores índices de calidad ambiental. Con los mismos niveles de emisión de contaminantes atmosféricos podemos reducir la exposición huma-

Adhesivo rojo (con el indicativo ‘2’)

Diésel EURO2 o EURO1 con filtro de partículas, sin este distintivo quedan los diésel anteriores a 1992

Adhesivo amarillo (con el indicativo ‘3’)

Diésel EURO3 o EURO2 con filtro de partículas, sin este distintivo quedan los diésel anteriores a 1996

Adhesivo verde (con el indicativo ‘4’)

Diésel EURO4 o EURO3 con filtro de partículas, sin este distintivo quedan los diésel anteriores a 2000. Además se etiquetan con color verde todos los coches gasolina, con el requerimiento mínimo de Euro 1 con convertidor catalítico

Fase I: Se permite acceso a ZBE si el vehículo diésel está etiquetado con uno de los tres adhesivos citados (rojo, amarillo o verde), además para los coches gasolina, han de ser Euro 1 o posteriores

Fase II: Solamente se permite el acceso a los vehículos con el adhesivo verde (4); además los vehículos de reparto han de ser acondicionados (filtros de partículas y SCR) si son EURO1, 2 y 3 para cumplir valores de emisión de EURO4

TABLA 2. CLASIFICACIÓN ALEMANA DE VEHÍCULOS SEGÚN EMISIONES ATMOSFÉRICAS, ASÍ COMO LAS FASES DE LIMITACIÓN DE CIRCULACIÓN DE LA ZBE.

na a los mismos si ubicamos centros escolares y de ocio citados en zonas poco afectadas por la contaminación.

DELIMITACIÓN DE AMPLIAS ZONAS PEATONALES

Algunas ciudades europeas han apostado firmemente por la peatonalización de áreas extensas del núcleo urbano. El acceso a las mismas es permitido a los vehículos de residentes o a formas de transporte ecológico (bicicleta, vehículos eléctricos,...) y público. Aunque al principio parte de la población puede mostrar reticencias a la peatonalización de zonas, a medio plazo los beneficios (mejora de calidad del aire, disminución de la contaminación sonora, entre otros) superan a los inconvenientes.

FAVORECER EL USO DE VEHÍCULOS ECOLÓGICOS

Muchas ciudades europeas están apostando fuertemente por favorecer el uso del transporte en **bicicleta** o por potenciar el transporte por **metro** y **tranvía**.

ESTABLECIMIENTO DE CARRILES BUS Y V.A.O.

Los **carriles bus** instaurados en zonas de acceso a grandes ciudades en España han sido muy efectivos en cuanto a que acortan considerablemente el tiempo de desplazamiento desde la periferia a la ciudad. Ello ha hecho que muchos usuarios del vehículo privado, para desplazarse a la ciudad, hayan aparcado su vehículo durante la semana y se desplacen con autobús.

Algunas ciudades europeas han apostado firmemente por la peatonalización de áreas extensas del núcleo urbano

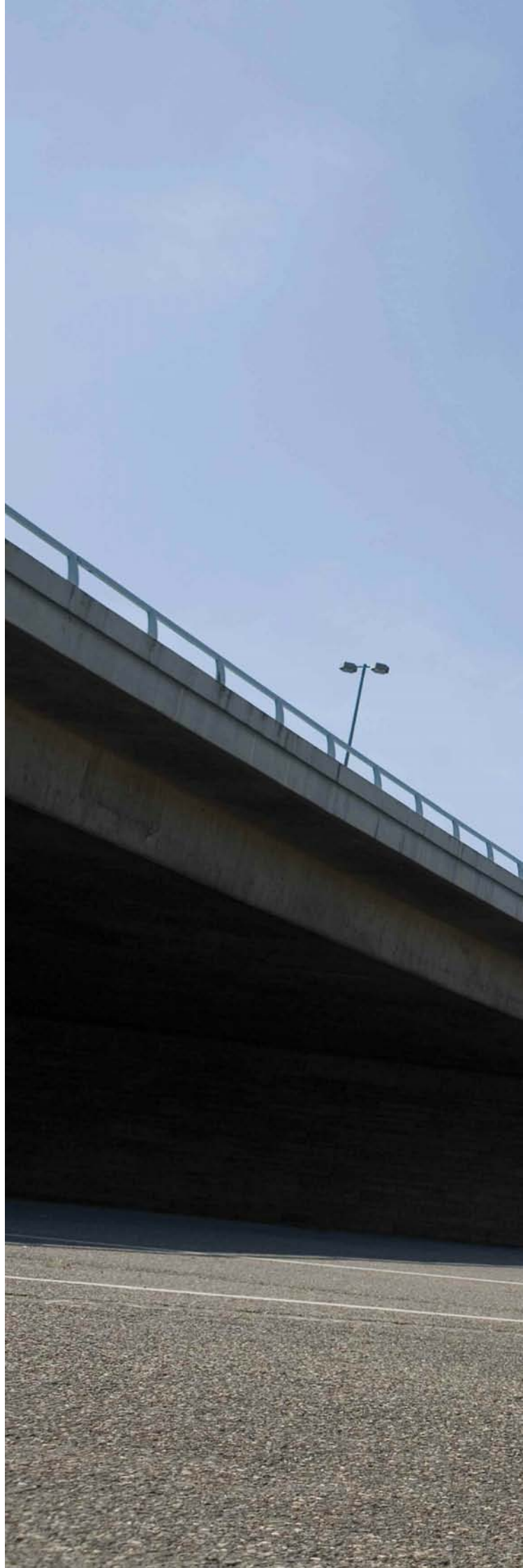
Los **carriles para vehículos de alta ocupación (V.A.O.)** suelen estar en los tramos de autovías o autopistas más próximos a los núcleos urbanos. Están destinados a los vehículos que cumplen unas determinadas características según su carga o capacidad de ocupantes. La circulación por estos carriles de los turismos y motocicletas está autorizada siempre que cumplan las condiciones de ocupación establecidas para dicho carril, también por el transporte público y de urgencias.

MEJORA DEL TRANSPORTE PÚBLICO

En una gran proporción de planes de mejora de calidad del aire las primeras medidas a tomar, antes de modificar la movilidad de los vehículos particulares, se centran en la mejora del transporte público. Entre estas medidas destacan:

- > Incremento de la frecuencia de autobuses, trenes y metro;
- > mejora de la cobertura espacial de las líneas, especialmente complemento con líneas adicionales en casos de restricción a vehículos particulares a zonas ambientales;
- > delimitación de vías bus en las autovías de acceso a la ciudad;
- > incentivos económicos mediante la reducción del coste del billete para pasajeros que viajan fuera de horas punta, o en zonas o periodos de restricciones de tráfico;

La reducción de la velocidad límite de circulación en autovías periféricas urbanas ha sido aplicada en un gran número de ciudades europeas





- información sobre disponibilidad de transporte público, apoyada por campañas intensivas de divulgación, especialmente para empresas con empleados que habiten en la ciudad y viceversa; en Colonia, Alemania, se ha realizado una prueba piloto en 2009 de 10000 billetes diarios de ida y vuelta gratuitos 'job tickets' para trabajadores;
- diseño eficiente y energético de la red de transporte, evitando concentración de líneas en sentido radial en zonas céntricas, pues ello contribuye a incrementar las emisiones justo en el centro de la aglomeración urbana;
- excluir los autobuses más contaminantes de las zonas críticas, destinándolos a zonas menos contaminadas; entre otras.

AMPLIACIÓN DE "ZONAS VERDES" DE APARCAMIENTO DE PAGO

El incremento de **zonas verdes** de aparcamiento de pago (zonas de baja tarifa de aparcamiento para los residentes y tarifa normal para vehículos externos) actúa de forma disuasoria frente al uso del vehículo privado para el desplazamiento urbano. Asimismo algunas ciudades, como Madrid, optan por incentivar el aparcamiento en zonas verdes céntricas para vehículos más ecológicos. Otras medidas consisten en el fomento del aparcamiento en origen (estaciones de transporte público periféricas) y penalización en destino (casco urbano).

LIMPIEZA DEL FIRME DE RODADURA EN VÍAS DE TRÁFICO

La limpieza periódica de las calles y firmes de rodadura, con agua no potable, puede reducir los niveles de resuspensión del material depositado sobre la superficie. La limpieza puede realizarse tanto a través de barrido mecánico (en húmedo o en seco), lavado con agua a presión. Estas operaciones son bastante comunes en las ciudades aunque se llevan a cabo casi exclusivamente con fines higiénico-sanitarios y con poca frecuencia en la mayoría de los casos. Existen pocos estudios sobre la eficacia de estas prácticas sobre la mejora de calidad del aire, pero los pocos trabajos existentes muestran que dicha efectividad varía enormemente (incluso alcanzando valores negativos) dependiendo del método de limpieza. Los estudios existentes parecen indicar que la combinación de aspiración y lavado a presión es la técnica más efectiva.

RESTRICCIONES DE LÍMITES DE VELOCIDAD

La reducción de la velocidad límite de circulación en autovías periféricas urbanas ha sido aplicada en un gran número de ciudades europeas (Graz, Viena, Berlín, Munich, París, Rotherdam-Amsterdam, Barcelona, Linz, Erfurt, Halle, Frankfurt/Oder, Hannover, Braunschweig, Estrasburgo, Dunkerque y Nancy). Su efecto sobre la reducción de emisiones ha sido demostrado por (Nagl et al., 2007, Dijkema et al., 2008 y Gonçalves et al., 2008).

La reducción del límite de velocidad (120 o 130 a 80 km/h) consigue mayores reducciones de emisiones para vehículos (sobre todo diésel) en autovías/autopistas. Para velocidades inferiores a 80 km/h no se consigue una reducción significativa por las emisiones del motor, sino solamente por la reducción de las emisiones conseguidas al fluidificar el tráfico y evitar atascos. Estas medidas de reducción de la velocidad de circulación deben tomarse como medidas adicionales a las de disminución de la densidad del tráfico, ya que de por sí suelen reducir las emisiones en áreas concretas, pero

deben cubrir zonas muy amplias para tener efectos muy patentes en la calidad del aire. En algunos planes es esta la primera medida a aplicar, ello no se debe a que sea la de mayor eficacia sino a que en muchos casos, es la que con mayor facilidad los gobiernos regionales pueden aplicar. Otras medidas más efectivas (como la reducción de la densidad de tráfico en zonas céntricas) requieren de la participación de entes de movilidad, ayuntamientos y gobiernos regionales, lo cual siempre es complejo y conlleva un retraso importante en la aplicación de las medidas.

Antes de modificar la movilidad de los vehículos particulares es necesario mejorar el transporte público

RESTRICCIONES DE TRÁFICO TEMPORALES

Algunas ciudades europeas han aplicado medidas temporales de reducción de emisiones durante episodios muy propicios a la superación de los valores límite de calidad del aire debido a condiciones meteorológicas adversas. Así, algunas ciudades han aplicado restricciones a vehículos privados basándose en matrículas pares e impares. Sin embargo, el volumen de tráfico afectado por estas limitaciones se reduce considerablemente si se tiene en cuenta que estas limitaciones no pueden afectar a vehículos de transporte público y privado, al reparto de mercancías, taxis, recogida de residuos urbanos y vehículos sanitarios, entre otros. Además, en algunas ciudades del sur de Europa estas restricciones han llevado al incremento del uso de la motocicleta con motores de dos tiempos, y al consiguiente incremento de los niveles de benceno en aire ambiente. En la actualidad otras ciudades, como Bolzano en Italia, han implantado restricciones temporales exclusivamente dirigidas a los vehículos más contaminantes. Aunque estas restricciones afectan a un número de vehículos reducido, se evita que aquellos más contaminantes circulen por el núcleo del casco urbano, cuando las condiciones ambientales son propicias a la superación de los valores límite de calidad del aire.

OPTIMIZACIÓN DEL FLUJO DE TRÁFICO

El objetivo consiste en lograr que el tráfico sea más fluido por medio de la optimización de los semáforos y la reducción de las obstrucciones en las vías (vehículos incorrectamente estacionados, trabajos de construcción, etc). Las emisiones de los vehículos en circuito urbano se incrementan marcadamente en tramos de congestión, por la continua parada y arranque de los vehículos. Existen dos tipos de actuaciones en este campo:

- Evitar que coincidan los trabajos de recogida de residuos urbanos, limpieza de los firmes, carga y descarga en obras públicas y privadas, reparto o recogida de bienes de consumo de cualquier naturaleza, con las horas de tráfico más intenso. Esta medida es muy positiva ya que produce una mayor fluidez del tráfico.
- El diseño de la circulación en planes de movilidad que favorezca el flujo del tráfico sin atascos en zonas urbanas donde estos son frecuentes. Aunque esta es una medida exigida por la mayoría de los clubes automovilistas de Europa, es necesario considerar que el tráfico más fluido generalmente implica un menor tiempo de circulación, lo cual podría incentivar el uso del vehículo privado y de este modo incrementar a medio plazo el volumen de tráfico en las ciudades.

DESVÍO DEL TRÁFICO DE ZONAS URBANAS

En muchas ciudades existe aún un margen importante de desplazamiento o desvío del tráfico rodado de arterias de circulación que atraviesan zonas centrales del núcleo urbano mediante la construcción de cinturones que liberen estas zonas de una parte del tráfico. Sin embargo, estas estrategias solamente pueden llegar a conseguir reubicar espacialmente las emisiones. La eficacia de reducción de emisiones en valores absolutos residirá en la reducción de la congestión, contando con volumen de tráfico constante. Esta medida no es muy aconsejable pues puede inducir a hacer el tráfico fluido, durante un periodo de tiempo (el que tarde en colapsarse también las vías de circunvalación), y a que se vuelva a utilizar el vehículo privado en vez del público. Además, el resultado final es transportar la contaminación a otra parte de la ciudad.

Las emisiones de PM de los motores diésel en vehículos de pasajeros y comerciales ligeros se han reducido drásticamente gracias a cambios de diseño de los motores

ACONDICIONAMIENTO DEL FIRME DE RODADURA

Las condiciones físicas del firme de rodadura y el grado de limpieza del mismo tienen una gran influencia sobre las emisiones de PM por abrasión mecánica y resuspensión de material sedimentado y acumulado. Aunque se han propuesto diversos tipos de firme de rodadura que teóricamente pueden reducir las emisiones de PM procedentes de abrasión del mismo, no hay estudios conclusivos sobre ello ni sobre la eficacia cuantitativa real de las medidas.

MEDIDAS TECNOLÓGICAS

Las medidas tecnológicas van dirigidas a reducir emisiones de combustión por unidad de motor (por el momento no de abrasión, ni fugitivas del depósito de combustible) y, como se comentó anteriormente, aunque es aconsejable su aplicación, las medidas más efectivas son siempre las no tecnológicas. Se ha de resaltar además que el efecto de gran parte de las medidas tecnológicas es a largo plazo, puesto que, desde que se incentivan hasta que su aplicación alcance un porcentaje importante de la flota de vehículos, pueden transcurrir lapsos de tiempo muy grandes. Hemos de tener en consideración que en algunas ciudades gran parte de la flota cumple requisitos de normas relativamente antiguas. Es por ello que como se ha expuesto anteriormente, algunas ciudades han aplicado medidas de reducción de emisiones basadas en impedir la circulación de vehículos anteriores a EURO2 (1996) o EURO3 (2000), con el fin de evitar la circulación de los vehículos más contaminantes. Estas medidas pueden tener un efecto patente en la reducción de PM, pero no en NO₂, ya que los motores diésel actuales siguen emitiendo niveles altos de NO₂ en circuito urbano.

MOTORES

Las emisiones de PM de los motores diésel en vehículos de pasajeros y comerciales ligeros se han reducido drásticamente gracias a cambios de diseño de los motores. Sin embargo, los objetivos que ha impuesto la norma EURO5 exigen medidas de reducción adicionales a las del diseño del motor (como filtros y catalizadores), que

pueden llegar a disminuir en algunos casos adicionalmente un 30-50% de las emisiones.

La aplicación de los **sistemas de recirculación de gases de combustión (EGR)** reduce las emisiones de NO_x por reducción de la temperatura a la que se quema el gasóleo en la cámara de combustión. Estos sistemas reciclan una proporción de los gases de combustión que se mezclan con aire nuevo de la entrada de gases.

Los **motores de gas natural** permiten también reducir marcadamente las emisiones de PM primario en cuanto a masa, no tanto en cuanto a número de partículas (Holmán y Ayala, 2002), aunque no es muy notable la reducción de emisiones en lo referente a NO_x, de no ser que se equipen con tecnología de tratamiento de gases postcombustión. Los vehículos de gas natural equipados con sistema de tratamiento de gases de combustión para reducir emisiones de NO_x son una buena opción para las flotas de vehículos pesados urbanos. La Unión Europea ha planteado el objetivo de que en 2020 el gas natural alcance una cuota del 10% entre los carburantes de automóvil.

El **gas licuado de petróleo (GLP)**, mezcla de propano y butano es también un combustible alternativo. Su mayor aceptación es en la transformación de vehículos de gasolina en GLP, especialmente en flotas de taxis urbanos. La flota de autobuses públicos de Valladolid apostó por el GLP y tiene toda la flota constituida por este tipo de vehículos. Las emisiones de CO₂ del GLP respecto al gas natural son posiblemente superiores debido al mayor poder energético de este último.

Una solución posible para reducir emisiones son los **motores eléctricos** y los híbridos. Los primeros se están introduciendo con bastante éxito a escala de vehículos de pequeño tamaño para transporte privado. Una limitación de su expansión es la disponibilidad de puntos de recarga, aunque una posible solución para el futuro puede ser el alquiler de baterías, y el establecer una red de estaciones que permitan realizar los cambios de baterías agotadas por otras recargadas.

En cuanto a los **motores híbridos**, estos se han introducido con éxito en el mercado internacional. En el caso del Toyota Prius es de resaltar su frecuente uso como taxi en muchas ciudades españolas. Ello se debe a que permite obtener consumos y emisiones inferiores a los de los motores diésel. Existen también, aunque pocas, flotas de autobuses o vehículos pesados de recogida de residuos urbanos híbridos. Esta tecnología presenta un gran potencial de desarrollo, ya que puede llegar a permitir circular con el motor eléctrico en zonas problemáticas y con el de combustión en zonas menos contaminadas.

Las características ambientales de los diversos modelos de vehículos comerciales pueden consultarse mediante el Ecotest elaborado por el Club de Automovilistas Alemán ADAC para la Federación Internacional del Automóvil (Fundación FIA): www.adac.de

Los **motores de hidrógeno** son también una posible opción para reducir emisiones, aunque su expansión en la flota de transporte público es muy limitada, fuera de algunos vehículos trabajando casi a escala de demostración. Esta opción debe considerarse como una alternativa a largo plazo.

Además de los motores ecológicos citados, existen tanto vehículos de gasolina como diésel con sistemas **"stop & start"** que permiten reducir bastante las emisiones urbanas, sobre todo en congestiones.

CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

Según la Fundación Gas Natural (2006) la disminución del contenido en azufre en el diésel permite reducir considerablemente las emisiones de PM. La introducción en el mercado del diésel de bajo contenido en azufre (S) (max. 10 ppm) de acuerdo con los requerimientos de DIN EN 590 agota ya la posibilidad de reducir las emisiones de PM de motores diésel mediante la mejora de la calidad del combustible. El contenido elevado de compuestos aromáticos en el diésel conlleva también un incremento de las emisiones de PM, bien de forma directa o por el incremento de gases precursores de PM secundario. El uso de biodiésel puede, por una parte reducir las emisiones de PM hasta un 40%, y por otra incrementar las de NO_x hasta un 20-40%. Por ello el efecto de este combustible sobre la mejora de la calidad no es de momento importante.

CALIDAD DEL ACEITE LUBRICANTE DEL MOTOR

Las impurezas inorgánicas del aceite, tales como óxidos de zinc, calcio y sulfato incrementan las emisiones de PM en motores diésel (Fundación Gas Natural, 2006). Estos componentes además no pueden ser oxidados en los filtros de partículas. Un bajo contenido en ceniza en los aceites lubricantes favorecería por tanto una ligera reducción de las emisiones de PM. Por tanto sería muy conveniente exigir una mayor calidad de los aceites lubricantes.

POST-TRATAMIENTO DE GASES

Este concepto engloba todos aquellos sistemas que consiguen reducir las emisiones contaminantes una vez que los gases han salido del motor y antes de llegar a la atmósfera. Algunos sistemas se basan en catalizar las reacciones químicas que no han alcanzado el equilibrio a baja temperatura, otros sistemas en retener las partículas sólidas o líquidas, retener de forma química los NO_x o en favorecer reacciones químicas que conviertan a las moléculas contaminantes en otras no contaminantes.

Entre estos sistemas destacan por su eficacia y amplia aplicación los siguientes sistemas:

- > La **reducción catalítica selectiva (SCR)**: Permite reducir las emisiones de NO_x, mediante la adición de un agente reductor (amoníaco o urea) al flujo de emisión, el cual convierte NO_x en N₂, H₂O y O₂ (sustancias de nulo impacto ambiental). En la aplicación de esta medida hay un factor muy a tener en cuenta. Éste es la necesidad de eliminar posibles pérdidas de amoníaco, pues de producirse éstas en entornos de tráfico con elevados NO_x, el amoníaco daría lugar a la nucleación o condensación de grandes cantidades de nitrato amónico, y al consecuente incremento de los niveles de PM_{2.5}.
- > **Filtros de partículas**: Estos sistemas se basan en el tratamiento en sistema cerrado de los gases de combustión. En la actualidad casi todos los fabricantes de automóviles instalan de forma rutinaria filtros de partículas en los vehículos diésel de sus gamas más altas. Además, ciudades como Londres, París o Berlín han equipado la flota de autobuses urbanos con filtros de partículas. Existe una gama de filtros regenerables que combina el efecto físico de un filtro de partículas con el de un catalizador oxidante. El óxido de nitrógeno (NO₂) generado por el catalizador a partir de NO permite la combustión del PM retenido en el filtro a temperaturas relativamente bajas. Así pues este sistema incrementa las emisiones de NO₂ primarias. La aplicación masiva de este tipo de filtros a flotas de autobuses ha dado lugar a un incremento de la proporción NO₂/NO en las emisiones, siendo NO₂ el contaminante regulado en calidad del aire.

Para vehículos en circulación producidos en serie, aunque la instalación de filtros de partículas es tecnológicamente posible, los costes de tal transformación son elevados y difícilmente aplicables a gran escala. Sin embargo, la aplicación de filtros es una buena alternativa para vehículos pesados urbanos.

EMISIONES		
DEMOLICIÓN	PRE-CONSTRUCCIÓN	CONSTRUCCIÓN
PM₁₀		
Demolición y carga	Movimientos tierra	Transporte y manipulación de materiales
Transporte y manipulación de residuos	Extracción materiales	Acopios de materiales (resuspensión)
NO_x + PM₁₀		
Motores maquinaria pesada	Motores maquinaria pesada	Motores maquinaria pesada
Motores camiones transporte	Motores camiones transporte	Motores camiones transporte
Generadores eléctricos	Generadores eléctricos	Generadores eléctricos
PM₁₀		
Resuspensión polvo sedimentado	Resuspensión polvo sedimentado	Resuspensión polvo sedimentado
Resuspensión solares demolición	Transporte y manipulación de materiales	Corte de material en seco

FIGURA 4. PRINCIPALES FUENTES EMISORAS DE PM Y NO_x DERIVADAS DE LOS TRABAJOS DE DEMOLICIÓN Y CONSTRUCCIÓN (MARM, 2010).

COMBINACIÓN DE SISTEMAS

Algunos fabricantes combinan los sistemas anteriormente citados para reducir varios contaminantes. Así, hay fabricantes que combinan un sistema catalítico de adsorción de NO_x y un filtro de partículas con un catalizador oxidante final y refrigerador EGR. Por otra parte, actualmente se está iniciando la aplicación del sistema SCRT (EMINOX), constituido por un filtro de partículas y un sistema de SCR, con lo cual se reducen drásticamente las emisiones de NO_2 y PM. TMB-Barcelona ha comenzado la aplicación generalizada de este sistema en autobuses diésel en circulación. Esta es una aplicación pionera, pues aunque existen pruebas anteriores, la aplicación de este sistema no ha pasado del estado de prueba.

Es importante volver a resaltar que, para abordar independientemente los problemas de emisiones de CO_2 derivadas del tráfico rodado por una parte, y NO_2 y PM por otra (como se viene haciendo en muchos estados miembro, entre ellos España), han de tenerse en cuenta los efectos colaterales que pueda tener una medida en el (los) otro(s) contaminante(s). Así, el favorecer la compra de vehículos con menores emisiones de CO_2 , no tiene por qué traducirse también en el descenso de emisiones de NO_2 y PM, sino que puede llegar incluso a incrementarlas.

MEDIDAS FRENTE A LAS EMISIONES DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEMOLICIÓN

Las actividades de construcción y demolición son una fuente importante de contaminación del aire en zonas urbanas (Figura 5 y 6). Ello ha llevado a la administración de diversos países a establecer normativas más o menos estrictas sobre la manipulación y

transporte de material de obra pública y privada, así como sobre los procesos de construcción y demolición. Países como Holanda dan mucha importancia al impacto atmosférico de las emisiones de obras públicas a la hora de conceder las autorizaciones ambientales de proyectos específicos. Otros países del ámbito sur de Europa no dan tanta importancia a dichas emisiones.

El principal contaminante atmosférico procedente de la construcción y demolición es PM_{10} , pero estas actividades no solo emiten altas concentraciones de polvo (típicamente de cemento, madera, piedra y suelo) de forma difusa o fugitiva, sino que además pueden llegar a concentrar importantes flujos de tráfico de vehículos pesados que transportan material o residuos de o a la obra. Además, existe maquinaria pesada de la propia obra y generadores eléctricos de fuel-oil, cuyas emisiones pueden causar un claro deterioro de la calidad del aire. Estas emisiones de vehículos pesados y maquinaria diversas se caracterizan también por elevadas concentraciones de PM_{10} , pero también de NO_x (Figura 4).

Este tipo de emisiones además de poder alcanzar elevadas concentraciones de contaminantes, presentan el inconveniente que generalmente se producen en áreas pobladas o cercanas a la población, y por tanto tienen el potencial de afectar frecuentemente a la exposición humana.

Entre las guías, recomendaciones y ordenanzas que existen en la legislación Europea se han de destacar:

- > Greater London Authority (2006): Best Practice Guidance. The control of dust and emissions from construction and demolition. November 2006. www.london.gov.uk. ISBN 10: 1 85261 942 2



FIGURA 5. IZQUIERDA: EMISIÓN DE POLVO DE TRABAJOS CORTE DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EN SECO. DERECHA: FIRME DE RODADURA DE UNA CALLE CUBIERTO POR BARRO DEBIDO A LA PÉRDIDA DE CARGA DEL TRANSPORTE DE RESIDUOS EN UNA EXCAVACIÓN. OBRAS PÚBLICAS REALIZADAS EN LA CIUDAD DE BARCELONA.



FIGURA 6. POLVO SEDIMENTADO SOBRE UN VEHÍCULO APARCADO EN LA ZONA UNIVERSITARIA DE BARCELONA DEBIDO A LAS EMISIONES DE OBRAS PÚBLICAS.

- Gobierno Regional de Estiria (2006): Manual de obras, Estiria, Austria. www.feinstaub.steiermark.at.
- Stäubli, A., Kropf, R. (2004): Air pollution control at construction sites – construction guideline air. Environment in practice. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape BUWAL, Berna.

A nivel español, y dadas las características climáticas y orográficas de nuestro país, la legislación debería ser muy estricta en este ámbito. En zonas con baja pluviometría las probabilidades de que las emisiones de polvo de obras afecten a la calidad del aire son elevadas, debido a la intensificación de procesos de resuspensión. Este no es el caso, así aunque existen muchas ordenanzas municipales que afectan al transporte y manipulación de material o a procesos de obras que emitan contaminantes atmosféricos, la realidad es que, fuera de algunas excepciones, el control del cumplimiento de las mejores prácticas sugeridas es poco exhaustivo. Ello da lugar a que en los últimos años haya habido claros ejemplos en España de incumplimiento de los valores límite de PM_{10} debido a las emisiones de determinadas obras civiles.

Prueba de la ineficiencia de dichas ordenanzas es que el Ajuntament de Barcelona ha publicado recientemente (Ajuntament de Barcelona, 2009) una guía para la ambientalización de los trabajos de construcción.

A continuación se resumen en los siguientes cuadros diversas prácticas disponibles que permiten reducir de forma considerable las emisiones de contaminantes atmosféricos de las obras de construcción y demolición (Figura 4). No se incluye en esta revisión el tema de asbestos, por no poder ser este considerado como un tema de calidad del aire propiamente dicho.

PRÁCTICAS GENERALES PARA REDUCIR LAS EMISIONES EN OBRAS

1. Es muy importante realizar primero una evaluación del área potencialmente afectada por las futuras emisiones de las obras a realizar, así como de las emisiones que va a comportar. La aplicación de medidas para la disminución de emisiones puede conllevar un incremento de los costes del proyecto y ellos deben tenerse en cuenta desde el inicio. La normativa holandesa incluye dichos impactos como muy relevantes en los estudios de impacto ambiental de los proyectos de construcción.
2. Es importante que el personal que vaya a trabajar en ella esté concienciado del problema, y que esté informado sobre las posibles emisiones, el impacto que éstas pueden tener y las medidas correctoras.
3. La construcción/demolición debe comenzar en la zona de obra en contra del viento predominante, y a partir de ahí ir progresando por fases que permitan que las zonas que ya se han finalizado puedan cubrirse con vegetación.
4. En los casos en que la cubierta con vegetación sea imposible se pueden emplear otros materiales como grava, materiales geotextiles, hidrosiembra, etc.
5. Se debe evitar la quema de materiales en las zonas de obras para eliminar residuos o para modular la temperatura de trabajo.
6. Se deben construir barreras contra el viento en todo el perímetro de la obra que reduzcan al máximo la resuspensión en la zona de obra, y por tanto las emisiones al exterior.
7. La carga y descarga de material debe confinarse a la zona contra el viento, cubriendo los apilamientos parcial o totalmente. También se pueden utilizar sacas cerradas para almacenar los materiales que puedan resuspenderse.
8. Es necesario controlar la cantidad de barro que se produce en la zona de obra ya que aumenta considerablemente las emisiones especialmente en carreteras pavimentadas (Figura 5). Hay varias formas de reducir la cantidad de este material con medidas que incluyen:
 - 8.1. El lavado frecuente de las calles próximas a la obra.
 - 8.2. Pavimentación o cubierta con grava de las vías de las obras más transitadas, siendo esta medida acompañada del lavado frecuente de las mismas (una vía pavimentada cubierta por barro produce las mismas emisiones que una vía no pavimentada).
 - 8.3. Lavado de las ruedas, bajos y bañeras de los camiones al abandonar el área en la zona de acceso a la obra, cada vez que salgan de la zona de obra, controlando el agua sucia producida. El lavado de las ruedas y bajos no es suficiente.
 - 8.4. Reducción al mínimo de la altura desde la que se carga el material en los camiones.
 - 8.5. Cobertura obligatoria y completa de la bañera de carga de los camiones con lonas, con independencia de si está cargado o no. Si el material que se lleva es muy fino es preferible emplear siempre camiones cisterna.
 - 8.6. Mantenimiento de la estanqueidad de la bañera de carga, que debe estar en buenas condiciones de manera que no haya pérdidas de polvo durante el transporte.

9. Es importante reducir el tráfico de vehículos dentro de la obra y mantenerlo relegado lo más posible a las zonas necesarias para cada actividad. La velocidad de los vehículos debe estar limitada, de manera que no se excedan los 15-25 km/h en carreteras y los 10 km/h en otras zonas, teniendo señales de velocidad en numerosos puntos dentro de la obra.
10. Vehículos y maquinaria. En la zona de obra trabajan vehículos que incluyen camiones, excavadoras, palas, apisonadoras y generadores eléctricos, entre otros. El motor de estos vehículos y maquinaria representa una fuente de emisión de PM, SO₂, NO_x, VOC y CO₂. Las soluciones para minimizar estas emisiones incluyen:
 - 10.1. La utilización de filtros de partículas, catalizadores y conversores catalíticos.
 - 10.2. Utilización de combustibles alternativos al diésel o fuel-oil.
 - 10.3. Reducir al máximo el tiempo que los vehículos están en marcha.
 - 10.4. Reducir al máximo el número de viajes de vehículos al mínimo necesario, y establecer una velocidad máxima de circulación en la zona de obra.
11. Por lo general las grandes obras públicas llevan asociado un intenso flujo de tráfico de vehículos pesados para el transporte de tierras y materiales de construcción. Si estas obras se realizan en las proximidades de zonas urbanas o industriales con elevados niveles de NO₂ y PM, las emisiones derivadas de dicho tráfico pueden causar la superación de los límites normativos. Para prevenir dichos problemas es importante diluir al máximo las emisiones de dicho tráfico. Con tal fin se pueden diseñar las vías de acceso y salida a la obra en las zonas más alejadas de la población, o bien distribuir el tráfico entre varias vías de acceso y salida.

PRÁCTICAS ESPECÍFICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES EN CONSTRUCCIÓN

12. Durante la obra hay numerosos trabajos de fabricación que pueden producir polvo, como puede ser el corte (Figura 5) y perforación de materiales, en estos casos es necesario aplicar agua al mismo tiempo que se produce la actividad, así como llevarlas a cabo siempre que sea posible en zonas contra el viento para minimizar las emisiones dentro y fuera de la zona de obra.
13. Elección de materiales en construcción para reducir emisiones. La utilización de materiales prefabricados es siempre preferible, ya que se transportan a la obra ya terminados reduciendo la producción de polvo durante su construcción.

PRÁCTICAS ESPECÍFICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES EN DEMOLICIÓN

14. Las construcciones deben demolerse intentando reducir la altura desde la que se desploma el material, si esto no es posible entonces debería hacerse una demolición por partes. Es importante aplicar aspersores de agua de manera simultánea a la demolición a la zona de manera que las partículas sedimenten de forma rápida dentro de la zona de obra. La utilización de explosivos debe evitarse al máximo debido a la enorme cantidad de polvo producido.

15. Al transportar el material de demolición deben cargarse idealmente los materiales más finos al comienzo y cubrirlos con los materiales más gruesos. Cobertura obligatoria y completa de la bañera de carga de los camiones con lonas, con independencia de si está cargado o no, si el material que se lleva es muy fino es preferible emplear siempre camiones cisterna.
16. Utilización de agua, productos químicos supresores de polvo, e hidro-siembra en los solares de demolición es muy aconsejable.
17. En renovación del firme de rodadura de vías urbanas se aplica muy frecuentemente un rascado superficial del firme antiguo, seguido de un transporte en cinta transportadora del material arrancado y posterior descarga de la cinta sobre la bañera del vehículo mecanizado. Esta operación emite grandes cantidades de polvo, tanto durante el rascado como la descarga de la cinta. De aplicarse tal proceso debería ser obligatorio el uso de sistemas de adición de agua para reducir las emisiones.



cap.4

53

ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN: LOS PROGRAMAS DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA MEJORAN LA SALUD DE LA POBLACIÓN

ELENA BOLDO Y FERRAN BALLESTER

LA INTERVENCIÓN HUMANA MODIFICA LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El consumo energético provoca un aumento de la emisión de sustancias contaminantes y la ruptura del equilibrio del aire, una mezcla de gases que constituyen la atmósfera terrestre y que es esencial para la vida en el planeta. Desde la última década del siglo XX, se ha puesto de manifiesto la sobreexplotación de los recursos naturales, el aire entre ellos.

En los artículos anteriores se han analizado cuáles son los contaminantes atmosféricos más importantes y los efectos que producen en la salud. Cada vez se conoce más sobre el impacto que la contaminación atmosférica provoca sobre la salud humana, al que va asociado un elevado coste económico.

Cabe ahora preguntarse si una reducción de esa contaminación supone una mejora en la salud de la población. En este sentido, un número creciente de estudios ilustra los beneficios potenciales en la salud de las políticas y acciones orientadas a disminuir la exposición a los contaminantes atmosféricos.

AIRE MÁS LIMPIO... ¿MÁS SALUD? INDISCUTIBLEMENTE, SÍ

Reducir la exposición de la población a sustancias nocivas presentes en el ambiente supone un **aumento** en términos de **salud**. Después de la adopción de **medidas legislativas** sobre la calidad del aire que conllevaron una reducción de la concentración de contaminantes en el ambiente, se observaron **impactos positivos sobre la salud pública**.

Este hecho puede analizarse mediante los llamados **estudios de intervención**, que valoran los beneficios que se producen en la salud como consecuencia de mejoras en la calidad del aire, proporcionando una información muy valiosa para la toma de decisiones de los gestores y políticos. Mediante estos estudios epidemiológicos se valora la evidencia experimental o semi-experimental de los efectos de la eliminación o de la actuación sobre el hipotético agente causal, en el caso que nos ocupa, la contaminación atmosférica.

El impacto de las intervenciones sobre la salud poblacional ha sido examinado en un número limitado de estudios epidemiológicos. Los datos procedentes de la **experimentación** con humanos y de los estudios toxicológicos juegan un papel muy importante en la evaluación de los efectos de la contaminación atmosférica

sobre la salud. No obstante, su desarrollo está obviamente limitado debido a la imposibilidad ética de investigar los efectos en aquellas personas que más probablemente están afectadas por la contaminación de la atmósfera, como las que padecen enfermedades cardíacas y respiratorias.

Por otra parte, la exposición a la que se someten los participantes de los estudios experimentales está limitada típicamente a un constituyente de la mezcla de la contaminación del aire ambiente. Esto implica que los efectos observados pueden no ser relevantes de lo que sucede en el marco natural, donde se encuentra una mezcla de diversos contaminantes con un potencial efecto en la salud distinto del contaminante ensayado. Por todo ello, nos centraremos en los **estudios semi-experimentales**, en los que se modifica la exposición de la población mediante una intervención.

LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA A CORTO PLAZO SUPONE UNA MEJORA DE LA SALUD DE LA POBLACIÓN

La evidencia científica muestra que los cambios a corto plazo en los niveles de los contaminantes del aire suponen una mejora significativa en términos de salud pública. Como es sabido, los Juegos Olímpicos son eventos deportivos multidisciplinarios en los que participan atletas de diversas partes del mundo. La organización de unas Olimpiadas supone un gran reto para la ciudad donde se celebran y una excelente oportunidad para estudiar el impacto que sobre la salud produce una mejora de la calidad del aire a corto plazo.

LOS JUEGOS OLÍMPICOS DE VERANO EN ATLANTA, EEUU (1996)

Durante la celebración de los Juegos Olímpicos de Verano de 1996, la ciudad de Atlanta implantó una modificación de la estrategia de transporte que condujo a una reducción en la congestión del tráfico. Durante más de 10 semanas (4 semanas antes, 17 días durante y 4 semanas después de las Olimpiadas) se registraron los datos del número de visitas médicas urgentes, número de hospitalizaciones por asma y otros eventos en salud, calidad del aire, condiciones meteorológicas, tráfico y transporte público. La calidad del aire incluyó mediciones de PM_{10} , dióxido de nitrógeno y ozono.

Los resultados de los análisis mostraron un significativo descenso en el número (41,6%) de ataques agudos de asma durante los Juegos Olímpicos. En ese período, la calidad del aire mejoró ostensiblemente, con una reducción significativa de las concentraciones de ozono (28%, desde 163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 117 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media del máximo diario de 1 hora), monóxido de carbono (22%, desde 1,80 mg/m^3 a 1,47 mg/m^3 de media de ocho horas) y PM_{10} (16%, desde 36,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 30,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media diaria). Los picos de tráfico por las mañanas durante los días laborables fueron reducidos en un 22,5%, considerando como referencia el periodo anterior al inicio de los Juegos Olímpicos. Los picos diarios de las concentraciones de ozono estuvieron significativamente correlacionados con los niveles de tráfico.

Estos resultados sugieren que las reducciones en las emisiones de tráfico, como consecuencia de cambios en los sistemas de transporte de las ciudades, pueden prevenir enfermedades y reducir el número de exacerbaciones de asma que requieren una atención médica. Este estudio también apoya la percepción general de que los cambios en las emisiones de los vehículos contribuyen a la mejora de la calidad del aire más que las condiciones meteorológicas, que permanecieron relativamente constantes durante el periodo de observación.

LOS JUEGOS OLÍMPICOS DE VERANO EN PEKÍN, CHINA (2008)

El gobierno chino prometió unos Juegos Olímpicos “verdes”, pese a que la ciudad es una de las más contaminadas del mundo y los atletas albergaban temores a que la excesiva contaminación de la ciudad afectara a su rendimiento físico. Para ello, se implantaron estándares muy estrictos para mejorar la calidad del aire durante la celebración de los Juegos.

Se estima que se invirtieron millones de dólares en iniciativas tales como la sustitución de vehículos de transporte público por otros con menor emisión de gases, mejoras en las líneas de tren que llegan a la ciudad, cierre de industrias muy contaminantes o el aumento de zonas verdes. Durante la celebración de los Juegos, el transporte público era gratuito para los participantes acreditados y los espectadores que acudían a algún evento olímpico, las carreteras de acceso a la ciudad eran regadas con agua, los vehículos que no cumplían con la reglamentación vigente no podían circular y varias industrias de los alrededores de la ciudad detuvieron su actividad.

La puesta en marcha de todas las medidas supuso que la emisión de contaminantes tales como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, o las partículas descendiera en un 60,8%, 39,4%, 10,8% y 19,8% respectivamente. Finalmente, se consiguieron unos Juegos “verdes”. La organización del evento supuso claras mejoras en la reducción de la contaminación atmosférica, en el transporte público y en el uso de energías renovables.

Un estudio científico mostró la reducción de visitas por asma en el hospital Chaoyang de Pekín paralela a la bajada de los niveles de contaminantes. La media de estas visitas fue de 12,5 adultos al día del 1 al 30 de junio, es decir, antes de que se aplicaran medidas de control de la contaminación atmosférica. En cambio, con las medidas de control implantadas durante los Juegos, estas visitas se redujeron hasta 7,3 en el mismo hospital.

Este tipo de estudios son importantes para mostrar como los cambios producidos en el tráfico y en las emisiones industriales mejoran la calidad del aire y reducen la morbilidad asociada con la contaminación atmosférica a corto plazo.

LA REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA A LARGO PLAZO TAMBIÉN SUPONE UN BENEFICIO CLARO EN EL ESTADO DE SALUD DE LA POBLACIÓN

Algunos estudios han examinado directamente si los beneficios en la salud pública pueden ser mostrados como resultado de un descenso planificado o no de la contaminación atmosférica a largo plazo. Veamos algunos de ellos.

HUELGA EN UNA ACERERÍA SITUADA EN EL VALLE DE UTAH (EEUU)

En el Valle de Utah se produjo un conflicto laboral que paró la actividad de una gran acerería durante más de un año, entre agosto de 1986 y septiembre de 1987. Las concentraciones de partículas en el ambiente descendieron desde 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los ingresos hospitalarios por causa respiratoria también disminuyeron claramente durante la huelga, y sólo se incrementaron hasta los niveles anteriores a la huelga después de que el conflicto acabara. La mortalidad descendió y se redujo el absentismo escolar de los niños. Los estudios realizados antes, durante y después de la huelga proporcionaron una fuerte evidencia en favor de la relación causal entre el descenso en los niveles de las partículas y los efectos beneficiosos en la salud (morbilidad y mortalidad).

La particularidad de este estudio proviene del área donde se desarrolla, ya que el Valle de Utah reúne unas características especiales, que proporcionan una oportunidad excepcional para la investigación epidemiológica. Por un lado, aproximadamente el 90% de los habitantes del Condado son miembros de la Iglesia de Jesucristo de los Santos del Último Día (mormones), con muy alto índice de no fumadores entre ellos. Por otro lado, la orografía y las condiciones climáticas del valle contribuyen a que las inversiones térmicas sean comunes durante el invierno, provocando episodios de contaminación elevada. Una última característica del área se debe a que la principal fuente de contaminación por partículas procede de la citada fábrica, construida durante la II Guerra Mundial. Estas características han llevado a realizar una serie de estudios en el valle para valorar los efectos de la contaminación sobre la salud de sus residentes, tanto en cuanto a la mortalidad como a la morbilidad por enfermedades respiratorias.

Esta investigación incluyó el estudio de dos condados vecinos, en los que no se observó la misma reducción en las hospitalizaciones durante el mismo periodo. Esto descartaría que la explicación del descenso de los efectos adversos en la salud fuera debida a otros factores epidemiológicos o climáticos.

PROHIBICIÓN DEL CARBÓN EN DUBLÍN (IRLANDA)

El gobierno irlandés prohibió la venta de carbón en la ciudad de Dublín en 1990. Se valoró el efecto del programa sobre la concentración de contaminantes en el aire, partículas y dióxido de azufre. También se estudiaron las tasas de mortalidad por causa respiratoria y cardíaca durante los 72 meses anteriores y posteriores a la fecha de la prohibición de la venta de carbón. Se comparó el cambio de los niveles de contaminantes con la mortalidad.

Los efectos sobre la contaminación atmosférica fueron una reducción inmediata y permanente en la media mensual de las concentraciones de dióxido de azufre y de partículas. La media en las concentraciones de los humos negros descendió en $35,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (70%) después de prohibir la venta de carbón. La media de los humos negros durante los años 1984-90 era de $50,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y, tras la intervención, la media durante los años 1990-96 era de $14,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Figura 1).

Las tasas de mortalidad también sufrieron un descenso importante coincidiendo con la prohibición de la venta de carbón. Para

la mortalidad por todas las causas, el descenso fue del 5,7 %, para la mortalidad por causa respiratoria del 15,5%, y para la mortalidad por causa cardíaca del 10,3%. En consecuencia, se observó una reducción de 116 muertes por enfermedades respiratorias y 243 muertes por enfermedades cardiovasculares al año siguiente de la intervención llevada a cabo para controlar la contaminación atmosférica (ver Figura 2).

Los resultados de este estudio sugieren que las partículas, o el dióxido de azufre o una combinación de ambos contaminantes, tienen un efecto deletéreo sobre el sistema cardiopulmonar. El control de los contaminantes podría reducir sustancialmente la mortalidad diaria.

Los investigadores realizaron además dos observaciones de elevado interés. Por una parte, concluyeron que el beneficio neto de la reducción en las tasas de mortalidad fue mayor que el predicho por los resultados de estudios de series temporales. Por otra parte, los estudios a corto plazo o de episodios podrían no ser adecuados para conocer los efectos acumulativos de la exposición a la contaminación atmosférica a largo plazo.

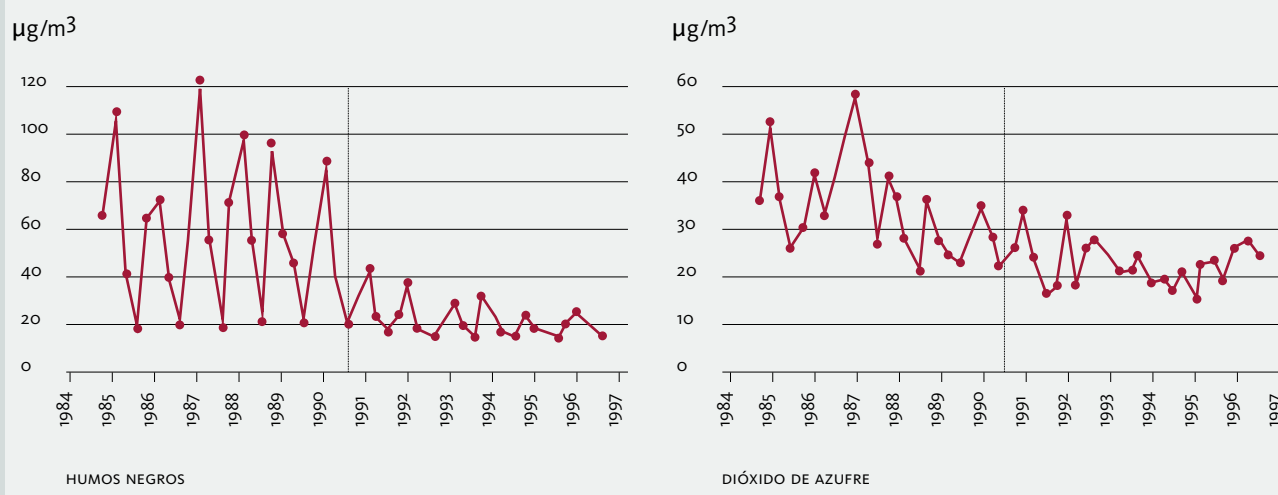


FIGURA 1. MEDIA ESTACIONAL DE LAS CONCENTRACIONES DE HUMOS NEGROS (IZQUIERDA) Y DIÓXIDO DE AZUFRE (DERECHA). SEPTIEMBRE 1984-1997. LA LÍNEA VERTICAL MUESTRA LA FECHA EN QUE FUE PROHIBIDO EL USO DEL CARBÓN. LOS PUNTOS ROJOS REPRESENTAN EL INVIERNO. FUENTE: CLANCY ET AL, 2002.



FIGURA 2. MEDIA ESTACIONAL DE TOTAL DE MUERTES, MUERTES POR CAUSA CARDIOVASCULAR, RESPIRATORIA Y OTRAS MUERTES. SEPTIEMBRE 1984-1997. LA LÍNEA VERTICAL MUESTRA LA FECHA EN LA QUE FUE PROHIBIDO EL USO DEL CARBÓN. LOS PUNTOS ROJOS REPRESENTAN EL INVIERNO. FUENTE: CLANCY ET AL, 2002.

La necesidad cotidiana de desplazamiento para realizar diferentes actividades supone un tráfico intenso, que es la principal causa de la contaminación atmosférica en ambientes urbanos

La evolución de las ciudades ha ido incorporando nuevas actividades a desarrollar en la vida diaria, frente a las cuales la posibilidad y facilidad de desplazamiento se ha convertido en un importante criterio para su realización. El ciudadano exige cada vez más que el acceso a los servicios se realice de forma cómoda y rápida. El crecimiento del parque automovilístico parece no tener límite. El coche privado es, en muchas ocasiones, la primera opción a la hora de realizar los desplazamientos hacia o dentro de la ciudad.

En las ciudades españolas, **entre un 40% y un 60% de la contaminación por partículas se debe al tráfico**. Este dato corresponde a un estudio del Ministerio de Medio Ambiente, coordinado por el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera (Consejo

Superior de Investigaciones Científicas). Sólo con esta cifra parece obvio que es preciso abordar el problema de la movilidad de los ciudadanos en ambientes urbanos. Para paliar los efectos negativos del uso del vehículo, deben desarrollarse alternativas al tráfico rodado o implantar estrategias innovadoras para mejorar la circulación.

El descenso de los niveles de contaminación atmosférica a corto plazo provoca una reducción de la morbilidad como, por ejemplo, los ataques de asma que sufre la población

CONTROL Y REGULACIÓN DEL TRÁFICO

Para reducir los efectos adversos sobre la salud de la exposición al tráfico, se han propuesto diversas medidas a largo plazo. La regulación del tráfico se mejora con la construcción de túneles,

desviando el tráfico por rutas alternativas, construyendo circunvalaciones o regulando la velocidad. Las medidas adoptadas para regular el tráfico producen cambios en los niveles de contaminantes atmosféricos, mejorando las condiciones de vida y el bienestar de los residentes. Los casos de Barcelona y Oslo son ilustrativos de este tipo de medidas de control y regulación del tráfico.

EL EJEMPLO DE BARCELONA (ESPAÑA)

El Plan de Actuación para la Mejora de la Calidad del Aire de la Generalitat de Cataluña contemplaba la limitación de la velocidad en la Zona Metropolitana de Barcelona. Una de las medidas consistía en reducir el límite de velocidad hasta los 80 Km/h de unos determinados tramos de las autopistas y autovías (un total de 80,7 Km por sentido), en las entradas de la corona de circunvalación de la ciudad de Barcelona. El objetivo era mejorar la calidad del aire, la salud de los ciudadanos, la movilidad del tráfico en las zonas afectadas y la reducción de la siniestralidad viaria.

A pesar de las duras críticas que ha sufrido la medida por parte del sector automovilístico, se estima que la reducción de la velocidad implicará una menor emisión de partículas nocivas a la atmósfera, lo que evitará la muerte por enfermedades cardiorrespiratorias de unas 1.200 personas al año. Además, se espera reducir la siniestralidad en carretera en un 50%. En la actualidad, el impacto de la medida, que entró en vigor el 1 de enero de 2008, está en proceso de evaluación. En relación a la siniestralidad, el beneficio parece evidente en el primer año de vigencia del Plan: los accidentes se han reducido en un 30%, y el número de fallecidos y de heridos graves ha bajado a la mitad en el primer cinturón de la ciudad.

EL EJEMPLO DE OSLO (NORUEGA)

La ciudad de Oslo (Noruega) cuenta con diversas carreteras que son conectadas por un sistema complicado de túneles y puentes. También tiene un sistema de carreteras de circunvalación que conectan el este y el oeste, lo que mejora el flujo de tráfico. El acceso al centro de la ciudad requiere el pago previo de peaje en uno de los 19 puntos de entrada alrededor de la carretera de circunvalación. Todas estas medidas suponen una mejora en el tráfico, reduciendo tiempos, ruido y contaminación.

La construcción de los túneles en la ciudad de Oslo ha supuesto la reducción en la media de exposición a nitrógeno (de 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se crearon también “calles ecológicas” con hileras de árboles, aceras ensanchadas y carriles para bicicletas. El tráfico rodado se ha reducido de manera importante en las zonas residenciales y en vías rápidas. Se ha mejorado la calidad de los antiguos parques y de los espacios urbanos. En relación a la salud, se realizaron encuestas en las que los residentes manifestaron un mayor bienestar, menos síntomas de pérdida de salud y menos molestias por el ruido del tráfico y por los olores de los gases emitidos por los vehículos.

ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE VEHÍCULOS MOTORIZADOS

El gran volumen de tráfico de vehículos a motor es la principal causa de la degradación del aire que respiramos. Los programas de control de la contaminación de vehículos tienen como objetivo reducir las emisiones, lo que está limitado en muchas ocasiones por razones de tipo tecnológico, económico y social. Una estrategia global supone la consideración de diversos componentes clave, como la implantación de estándares de emisiones más severos en los vehículos nuevos, la regulación legal de combustibles limpios y las inspecciones técnicas de vehículos que aseguren un buen mantenimiento.

NUEVOS ESTÁNDARES DE EMISIONES DE LOS VEHÍCULOS: UNA FORMA DE FABRICAR VEHÍCULOS MENOS CONTAMINANTES

Con el fin de limitar la contaminación producida por los vehículos, el Reglamento nº 715/2007 de la Unión Europea estableció nuevas exigencias comunes relativas a las emisiones de los vehículos de motor y de sus recambios específicos (normas Euro 5 y Euro 6).

El Reglamento se refiere a los vehículos cuya masa de referencia no supera los 2.610 Kg. Esto incluye, entre otros, los coches particulares, camionetas y vehículos comerciales destinados tanto al transporte de pasajeros o mercancías como a algunos usos especiales (por ejemplo, ambulancias). Estos vehículos pueden estar equipados con motores de encendido por chispa (motores de gasolina, de gas natural o de gas licuado del petróleo-GLP) o de encendido por compresión (motores diésel).

Con el fin de limitar al máximo el impacto negativo de los vehículos sobre el medio ambiente y la salud, el Reglamento contempla una amplia gama de emisiones contaminantes: monóxido de carbono, hidrocarburos no metanos e hidrocarburos totales, óxidos de nitrógeno y partículas. Entre dichas emisiones se incluyen las emisiones de escape, las de evaporación y las del cárter del motor.

En el Anexo I del Reglamento se recogen los valores límite de las emisiones para cada categoría de emisiones contaminantes y para los distintos tipos de vehículos mencionados anteriormente (ver Tabla 1).

La **norma Euro 5** es aplicable desde el 1 de septiembre de 2009 en lo que respecta a la homologación, y del 1 de enero de 2011 en lo que se refiere a la matriculación y venta de las nuevas clases de vehículos. Por otra parte, la **norma Euro 6** será aplicable a partir del 1 de septiembre de 2014 en lo que respecta a la homologación, y del 1 de septiembre de 2015 en lo que se refiere a la matriculación y venta de las nuevas clases de vehículos. La entrada en vigor de esta norma se aplicará a los vehículos equipados de un motor diésel y obligará a reducir considerablemente las emisiones de óxidos de nitrógeno, que se limitarán a 80 mg/km (lo que representa una reducción suplementaria de más del 50 % respecto de la norma Euro 5).

Además de respetar los límites de emisiones mencionados anteriormente, los fabricantes deberán asegurar la durabilidad de los dispositivos de control de la contaminación para una distancia de 160.000 km.

EMISIONES CONTAMINANTES	COCHES DIÉSEL	COCHES GASOLINA, GAS NATURAL O GAS LICUADO DE PETRÓLEO (GLP)
Monóxido de Carbono	500 mg/km	1000 mg/km
Partículas ¹	5 mg/km	5 mg/km
Óxidos de nitrógeno ²	180 mg/km	60 mg/km
Hidrocarburos y óxidos de nitrógeno	230 mg/km	
Hidrocarburos no metanos		68 mg/km
Hidrocarburos totales		100 mg/km

1 Diésel: 5mg/km o una reducción del 80% de las emisiones respecto de la norma Euro 4. Únicamente para los coches de gasolina de inyección directa que funcionan con combustión pobre: 5 mg/km (introducción de un límite que no existía en la norma Euro 4).

2 180 mg/km o una reducción del 20% de las emisiones respecto de la norma Euro 4. Gasolina, gas natural o GLP: 60 mg/km (o una reducción del 25% de las emisiones respecto de la norma Euro 4).

TABLA 1. NORMA EURO 5 SOBRE LÍMITES DE EMISIONES DE COCHES (REGLAMENTO 715/2007).

INSPECCIÓN TÉCNICA DE VEHÍCULOS (ITV): UNA FORMA DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS VEHÍCULOS QUE YA CIRCULAN

En España, el Real Decreto 2042/1994 regula la ITV, que se aplica a todos los vehículos matriculados en España, cualquiera que sea su categoría y funciones. La Ley establece, dependiendo de la categoría del vehículo (turismo, camión, furgoneta, motocicleta, vehículos de alquiler, de autoescuelas, etc.), una periodicidad mínima obligatoria para pasar la ITV. Así, para los turismos de uso privado (la mayoría de vehículos matriculados) está establecido que la primera revisión se ha de realizar al transcurrir 4 años desde la fecha de matriculación, y deberá repetirse cada 2 años hasta que cumpla los 10 años; a partir de ese momento se deberá pasar anualmente.

Mediante la ITV los vehículos se someten periódicamente a una revisión de una serie de componentes que afectan a la seguridad del vehículo. También se controla la contaminación atmosférica que provocan midiendo las emisiones de los gases de escape. Se verifica que el nivel de emisiones contaminantes esté dentro de los límites permitidos por la legislación vigente. En los vehículos de gasolina se comprueba el porcentaje de monóxido de carbono, mientras que en los vehículos diésel se comprueba la opacidad de los gases de escape.

La Directiva 92/55/CEE regula los límites de las emisiones permitidas. Si en la inspección del vehículo se superan dichos límites se concede un plazo de tiempo para subsanarlo. Una vez subsanado el problema se pasa de nuevo la revisión y, si es superada, se aprueba. Las emisiones contaminantes excesivas es uno de los motivos más frecuentes de rechazo en las inspecciones. No es que los automóviles contaminen más que antes, sino que los controles que se realizan son más estrictos ahora.

Diversos estudios científicos han analizado el impacto del tráfico en la salud humana. Se ha comprobado que la población que vive más expuesta presenta un mayor riesgo de sufrir efectos adversos en su salud.

Por otra parte, un estudio americano evaluó la influencia de las políticas nacionales para la emisión de vehículos, en especial la dirigida a la reducción de monóxido de carbono derivada de la

puesta en marcha de las Guías de Calidad del Aire tras la Ley de Aire Limpio de 1970. Los resultados indican que las disminuciones de este contaminante en el aire ambiente se asociaron con reducciones en las tasas de mortalidad.

De ahí se desprende la importancia de vigilar que los vehículos que circulan no superen los estándares de emisión regulados.

CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN DEL COMBUSTIBLE: UNA FORMA DE DISMINUIR LA CONTAMINACIÓN DE LOS VEHÍCULOS A LARGO PLAZO

Tanto el control de emisiones mediante nuevas normas legales y la ITV, como los cambios en la composición del combustible de vehículos pueden suponer importantes beneficios para la salud. La calidad del combustible se considera ahora no sólo necesaria para reducir o eliminar ciertos contaminantes directamente, sino también es un requisito para la introducción de muchas tecnologías de control de contaminación. En la mayoría de los países del mundo, se han implantado políticas gubernamentales para reducir el contenido de plomo y de azufre en los combustibles. Por otra parte, muchos países han constatado beneficios significativos asociados al uso de combustibles alternativos, en especial gas natural comprimido, GLP y etanol.

La Unión Europea elaboró nuevas especificaciones ambientales aplicables a los combustibles para reducir las emisiones contaminantes de los automóviles. La Directiva 98/70/CE relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, prohibió la comercialización de la gasolina con plomo a partir del año 2000 en Europa. El 1 de enero de 2009 fue la fecha límite para que el diésel tenga un contenido máximo de azufre de 10 ppm (partes por millones) y para disminuir el contenido máximo de hidrocarburos aromáticos policíclicos hasta el 8%.

La mejora de los combustibles convencionales debe realizarse en dos pasos. En primer lugar, deben eliminarse los aditivos con plomo añadidos a la gasolina y reducir de forma importante el azufre en la gasolina y el diésel. Posteriormente, debe reducirse la presión de vapor Reid (RVP) y el contenido de benceno de la gasolina.

Las emisiones de **plomo** al aire generan serios problemas de salud pública. El plomo que se inhala se fija en los pulmones de forma acumulativa. Afecta el hígado, el cerebro, el sistema nervioso y los órganos reproductivos. En los niños puede producir retraso mental y trastornos de conducta. Afecta la producción de hemoglobina. Se asocia con la anemia y las afecciones al sistema renal. Actualmente se investiga también la relación entre la presencia de plomo en el organismo y trastornos cardiovasculares.

Un estudio alemán muestra como las concentraciones de **plomo** en la atmósfera europea aumentaron hasta la década de los 70 y posteriormente fueron cayendo los niveles como consecuencia de la reducción del contenido del plomo en la gasolina. Muchos estudios han investigado el cambio en los niveles de plomo en sangre, constatando un descenso desde finales de los 70 hasta principios de los 90. Además, un estudio chino analizó el impacto de la prohibición de venta de petróleo con plomo en la ciudad de Shantou en 1998. Los efectos de esta intervención fueron investigados durante 3 años consecutivos en niños, donde la media de los niveles de plomo en sangre declinó desde 104 $\mu\text{g/l}$ en 1999, 94 $\mu\text{g/l}$ en 2000 y 79 $\mu\text{g/l}$ en 2001.

Por otra parte, el **azufre** es un componente natural del petróleo crudo y en consecuencia se encuentra tanto en la gasolina como en el diésel. Cuando estos combustibles son quemados, el azufre se emite como dióxido de azufre o como partículas de sulfatos. Es un elemento que impide la adopción de tecnologías avanzadas para el control de las emisiones de otros contaminantes, incluyendo óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono y partículas. Ninguna estrategia de reducción de la contaminación del aire puede dar resultado sin reducir el azufre de los combustibles a niveles cercanos a cero.

Los estudios muestran que los beneficios de la reducción de azufre rebasan con mucho los costes de la inversión requerida en refinación. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) encontró que los beneficios ambientales y en la salud humana asociados a la reducción de azufre fueron diez veces más elevados que los costes para reducir el azufre en los combustibles. Un estudio europeo también demostró que el considerable potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero es un beneficio adicional a los impactos positivos.

En 1990, el contenido de **azufre** en los combustibles no debía superar el 0,5% por peso en **Hong Kong**. Después del primer año de esta intervención, se observó que la media de reducción en dióxido de azufre fue del 53%.

Diversos estudios examinaron el efecto en salud en dos distritos teniendo en cuenta las diferencias en los cambios de respuesta de los bronquios, y en los beneficios en salud inmediatos y a largo plazo. La pendiente de la reactividad bronquial descendió desde el 48% al 39% en el distrito más contaminado y del 42% al 36% en el menos contaminado. También se constató una reducción de las muertes durante el invierno, lo que se interpretó como que muchos de los que sobrevivieron hubieran muerto sin la reducción de la contaminación.

La introducción de combustible pobre en azufre condujo además al descenso de la tendencia anual en un 2,1% de muertes por todas las causas, 3,9% en causas respiratorias y 2% en car-

diovasculares. La mortalidad y los síntomas respiratorios en la población infantil también descendieron. La reducción del riesgo fue mayor en los distritos que presentaban mayor nivel de contaminación inicial. La intervención a largo plazo ha supuesto un aumento en la esperanza de vida de 0,73 años en hombres de 25 a 100 años.

IMPACTO DEL TURISMO EN CIUDADES HISTÓRICAS

En ocasiones, celebraciones tradicionales en ciudades históricas suponen un incremento de los niveles de contaminación y del impacto que la contaminación atmosférica ocasiona en la salud. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se celebra el Jubileo o Año Santo en Santiago de Compostela y en Roma. Esta celebración ocasiona un incremento del tráfico en estas ciudades y un aumento de los niveles de partículas en relación a los años anteriores y posteriores. En Roma, la media anual de PM_{10} fue de 45,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1999), 51,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2000) y 47,18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2001), lo que supone un mayor impacto de la contaminación atmosférica en la salud durante el último año de Jubileo (2000).

En España, las ciudades históricas con patrimonio artístico y monumental padecen serios problemas ambientales. Su resolución requiere que las políticas turísticas se integren con el resto de políticas urbanas. Entre los impactos negativos del turismo, destaca el aumento de los costes ambientales por congestión del tráfico asociados a la llegada masiva de visitantes, así como el aumento de la contaminación acústica y visual por el crecimiento incontrolado del sector servicios.

El flujo de turistas, que suelen utilizar como medio de transporte el automóvil, muestra una marcada estacionalidad, concentrándose el 50% de la demanda en fines de semana, meses de verano y Semana Santa.

La contaminación atmosférica aumenta durante las estancias temporales de los visitantes, con el consiguiente impacto en la salud de la población residente. Esta realidad hace que sea preciso un planteamiento del desarrollo turístico y urbano sostenible, de forma que se consideren los intereses de visitantes y residentes.

Entre las intervenciones más frecuentes se encuentran la peatonalización del centro y la construcción de infraestructuras a las afueras de la ciudad, como aparcamientos disuasorios y hoteles.

CAMBIO DE RESIDENCIA A ZONAS MENOS CONTAMINADAS

Una forma más drástica de proteger la salud de la población, supone el traslado a zonas menos contaminadas. En un estudio de seguimiento desarrollado en el sur de California (EEUU), 110 niños cambiaron su lugar de residencia. Este hecho supuso una oportunidad excepcional para investigar si los cambios en la calidad del aire debidos a su nuevo domicilio estaban asociados con cambios en su función pulmonar, medidos con espirometrías.

Los niños que se trasladaron a zonas con menores niveles de PM_{10} mostraban mayores volúmenes pulmonares. Todo ello en comparación con los que se trasladaron a zonas con mayores niveles de dicho contaminante. Es decir, los cambios de lugar de residencia vienen seguidos por una mejora o empeoramiento de los volúmenes de aire respirados en función de si el destino se halla más o menos contaminado. El aumento de la función pulmonar durante





Es, por tanto, tiempo de actuar, y no sólo desde los gobiernos e instituciones internacionales. Todos los ciudadanos debemos colaborar en la urgente y necesaria reducción de emisiones al aire. La responsabilidad es de todos y nuestra intervención es imprescindible. Nos va la salud en ello.

la infancia y adolescencia determina la incidencia de enfermedad pulmonar obstructiva crónica en la vejez.

El tráfico urbano provoca en las ciudades españolas la mitad de la contaminación por partículas en suspensión y un gran impacto en la salud

Los niños respiran un 50% más de aire por kg de peso que los adultos y sus pulmones no están bien formados hasta los 4-6 años de vida. Esto ocasiona que los primeros años de vida sean más vulnerables en lo que concierne a las exposiciones ambientales, tales como la contaminación del aire en nuestras ciudades. Cada vez la evidencia científica está más consolidada en relación al papel que juega la contaminación del aire en el agravamiento de las crisis de asma en los niños que padecen esta enfermedad. Se han realizado varios estudios de cohortes en escolares que muestran que los niños que viven más cerca de las vías con un elevado índice de tráfico tienen una mayor frecuencia de síntomas respiratorios e incluso de asma.

MODERNIZACIÓN DE EQUIPOS TÉCNICOS EN LA INDUSTRIA: LA EXPERIENCIA EN RUMANÍA

A comienzos de los años noventa, con motivo de la transición de una economía centralizada a una economía de mercado, tuvieron lugar cambios esenciales en la política de protección del medio ambiente en Rumanía. Las medidas tomadas en coordinación con la Agencia para la Protección del Medio Ambiente, la Oficina del Gobernador y los ayuntamientos locales, dieron como resultado mejoras de la calidad del medio ambiente y de las condiciones de vida de los habitantes.

En la región rumana de Valcea, el entorno vital de las comunidades situadas en los alrededores de las áreas industriales se veía profundamente afectado por la contaminación, especialmente por la del agua y el aire. Entre las intervenciones adoptadas, se propuso la reducción de las emisiones nocivas a la atmósfera debidas al incorrecto funcionamiento de los equipos técnicos y la disminución del número de averías o accidentes. Además, las instalaciones industriales no estaban suficientemente bien equipadas como para retener las emisiones tóxicas o tratar los vertidos. Esto provocaba emisiones de ácido clorhídrico, amoníaco, polvo y sustancias orgánicas. Todo ello producía molestias y enfermedades respiratorias y digestivas a la población, así como daños a grandes zonas de cultivo o naturales.

Vivir en zonas más contaminadas supone mayores efectos adversos en la salud

El programa de actuaciones dio como resultado la mejora de la calidad del agua, del aire y del saneamiento de diversas localidades cinco años después de su establecimiento, mejorando sensiblemente las condiciones de vida de la población. Las concentraciones de ácido clorhídrico y amoníaco en la atmósfera disminuyeron en un 40% durante este período, y las concentraciones de otros agentes contaminantes registraron una evolución parecida. Comparativamente, la situación en 1993 y en 1994 era la siguiente: la concentración de ácido clorhídrico por encima del límite admisible descendió del 9,66% en 1993 al 0,57% en 1994, mientras

que la concentración de amoníaco por encima del límite admisible bajó del 2,89% en 1993 a 0,0% en 1994. El número de enfermedades respiratorias registró un descenso de aproximadamente un 15%.

UN PROGRAMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN DEL AIRE EN KIROVO-CHEPETSK (RUSIA)

Kirovo-Chepetsk es una población ubicada en la región de Kirov, en el centro de Rusia. En la ciudad se sitúa una de las mayores industrias químicas de Europa, así como una central térmica de carbón. La ciudad estaba formada por densos edificios de muchas plantas, creando lo que se conoce como “calles cañón”, donde está dificultada la dispersión de contaminantes. La deteriorada calidad del aire preocupaba a los residentes y era una de las razones del malestar social. Las centrales térmicas requerían nuevos suelos urbanos localizados junto al río para almacenar las cenizas. Las emisiones industriales degradaban los bosques y contaminaban los suelos.

Los empresarios, los organismos municipales y estatales y las organizaciones científicas se implicaron en la realización de una iniciativa que, entre otros aspectos, contemplaba la mejora de la calidad del aire. El propósito principal de la iniciativa era conseguir una normativa sobre la calidad del aire en la zona habitada de la ciudad. Se señalaron las siguientes prioridades:

1. La interrupción en el uso de gasolina con etileno.
2. La creación de jardines en la ciudad.
3. La reducción de las emisiones de las empresas.
4. La mejora de la calidad de los gases emitidos por los vehículos.

A finales de 1992 se desarrolló el Programa Ecológico para la Mejora de Kirovo-Chepetsk hasta el 2000, y a finales de 1997 se aprobó el Plan de Acción para la Protección Ambiental para el período comprendido entre 1998 y el 2000. La redacción del programa para la protección del aire se llevó a cabo dentro del marco de la planificación general ecológica. En Kirovo-Chepetsk se tuvieron en cuenta más de 30 empresas y unos 1.000 focos de emisión.

La eficacia de las medidas implantadas es evidente. La contaminación total del aire por óxidos de azufre y de nitrógeno, así como por amoníaco, descendió de 4 a 0,7 unidades de concentración máxima permitida. En 1997, las emisiones industriales fueron de 16.160 toneladas comparadas con las 57.120 de 1991. En 1997, la emisión por unidad de producción industrial fue equivalente al 56% de la de 1991. En relación a la calidad del transporte debe destacarse que, en 1997, el porcentaje de coches con tubos de escape no conformes con los requisitos de la normativa era de un 10% en comparación con el 30% de 1991.

Como resultado de la ejecución de la iniciativa se consiguió eliminar uno de los factores de malestar social. La conversión de las centrales al gas dio como resultado un descenso en el coste de la energía eléctrica a nivel regional. La reducción de la emisión se ha traducido en la disminución de la contaminación del suelo. Lo más importante ha sido el papel de esta iniciativa como ejemplo de políticas de desarrollo sostenible en condiciones de crisis económica y la creación de una comunidad responsable ecológicamente.

ESTRATEGIA TEMÁTICA DE REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EUROPA: UN RETO DE AQUÍ AL 2020

La estrategia es el resultado de las investigaciones efectuadas en el marco del programa «Aire Limpio para Europa» (Clean Air For Europe - CAFE) y de los programas marco de investigación sucesivos. Fue adoptada tras un largo proceso de consulta en el que participaron el Parlamento Europeo, organizaciones no gubernamentales, la industria y los particulares.

La estrategia define objetivos en materia de contaminación atmosférica y propone medidas para alcanzarlos de aquí al año 2020: modernizar la legislación vigente, insistir en los contaminantes más nocivos (ozono troposférico y $PM_{2,5}$) y conseguir una mayor implicación de los sectores y de las políticas que pueden influir en la contaminación del aire.

Los objetivos de reducción de las emisiones para los principales contaminantes se alcanzarán por etapas. Con respecto a la situación del año 2000, la estrategia determina objetivos concretos a largo plazo (2020):

- > Reducción en un 47% de la pérdida de esperanza de vida por la exposición a las partículas.
- > Reducción en un 10% de los casos de mortalidad aguda provocados por el ozono.

La realización de estos objetivos supone reducir las emisiones en los siguientes porcentajes:

- > dióxido de azufre en un 82%,
- > óxidos de nitrógeno en un 60%,
- > compuestos orgánicos volátiles en un 51%
- > $PM_{2,5}$ en un 59%

con respecto a los niveles del año 2000.

En lo que se refiere a la salud, los ahorros conseguidos con esta estrategia se evalúan en 42.000 millones de euros al año. El número de muertes prematuras debería pasar de 370.000 en el año 2000 a 230.000 en el año 2020 (frente a 293.000 en el año 2020 si no se aplicara la estrategia).

CONCLUSIÓN

Los estudios de intervención proporcionan una información que ayuda a dilucidar la epidemiología de las enfermedades asociadas con la contaminación del aire. También son útiles para cuantificar los beneficios en salud que ocasionan las regulaciones sobre calidad del aire y las medidas de control de emisiones.

A corto plazo, el descenso de los niveles de contaminantes en el aire supone un **descenso de la morbilidad** y mejoras en la salud de la población asmática.

A largo plazo, el impacto positivo en la salud es todavía mayor, dado que se **reduce** la tendencia de la media anual de las **muer-**tes por todas las causas y por causas específicas, en particular por causa respiratoria y cardiovascular. Además, **aumenta la esperanza de vida**.

El aire es un recurso natural que todos contaminamos. Actualmente supone uno de los problemas ambientales más graves a los que se enfrenta nuestra sociedad. La información disponible sobre los efectos que causa la contaminación atmosférica en la salud es suficiente como para actuar y disminuir los niveles de contaminantes en nuestras ciudades.

Las intervenciones que comportan una mejora de la calidad del aire se acompañan de beneficios sustanciales y apreciables en términos de salud pública. Los ejemplos comentados muestran que deben implantarse planes y programas que conlleven una reducción efectiva de la contaminación atmosférica.

Es, por tanto, tiempo de actuar, y no sólo desde los gobiernos e instituciones internacionales. Todos los ciudadanos debemos colaborar en la urgente y necesaria reducción de emisiones al aire. La responsabilidad es de todos y nuestra intervención es imprescindible. Nos va la salud en ello.

CAPÍTULO 1

Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. Xavier Querol. Rev Esp Salud Pública 2008; 82: 447-454.

Calidad del aire en las ciudades. Clave de sostenibilidad urbana. Observatorio Sostenibilidad de España. 2007.

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

Salud ambiental y calidad de vida urbana. Departamento de Educación para el Desarrollo Sostenible. Área de Medioambiente. Ayuntamiento de Madrid 2005.

La contaminación atmosférica. Disponible en: <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf2c.html>

CAPÍTULO 2

EMECAM. El proyecto EMECAM: Estudio español sobre la relación entre la contaminación atmosférica y la mortalidad. Rev Esp Salud Pública. 1999; 73:165-314

EPA (EE.UU). PM Standards Revision 2006. Disponible en: <http://epa.gov/pm/naaqsr2006.html>

Esplugues A, Fernandez-Patier R, Aguilera I, Iniguez C, Garcia Dos SS, Aguirre AA, et al. Exposición a contaminantes atmosféricos durante el embarazo y desarrollo prenatal y neonatal: protocolo de investigación en el proyecto INMA (Infancia y Medio Ambiente). Gac Sanit. 2007; 21:162-71

PINCHE. A Thematic Network: Policy Interpretation Network on Children's Health and Environment. Disponible en: http://www.pinche.hvdgm.nl/pinche_overview.html

Tenías Burillo JM, Ballester F. Evidencias sobre la relación entre la contaminación atmosférica y las enfermedades del sistema circulatorio. Gac Sanit 2002;16 Supl 2:12-28.

Tenías JM, Ballester F. Impacto de la contaminación atmosférica en la salud de los ciudadanos. Resumen de los estudios realizados en la ciudad de Valencia. Ecosostenible. 2009; 51: 17-26

WHO-European Region. Effects of air pollution on children's health and development - a review of the evidence. Copenhagen: WHO-European Region, 2005.

WHO-European Region. Air quality and health. Disponible en: <http://www.euro.who.int/air>

CAPÍTULO 3

2004/107/CE. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente. Diario Oficial de la Unión Europea, 26.1.2005, L23/3-L/23/16.

2008/1/CE. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación. Diario Oficial de la Unión Europea, 29.1.2008, L24/8-L/24/29.

2008/50/CE. Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo del 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, 11.6.2008, L152/1-L/152/44.

Comisión Europea, 2004. II Position Paper on PM. Programa Clean Air For Europe (CAFÉ). Dirección General de Medio Ambiente de la CE.

Fundación Gas Natural, 2006. El tráfico Rodado y la calidad del aire (2006). ISBN-13: 978-84-611-4157-9; ISBN-10:84-611-4157-1.

Greater London Authority, 2006. Best Practice Guidance. The control of dust and emissions from construction and demolition. Greater London Authority. November 2006.www.london.gov.uk. ISBN 10: 1 85261 942 2

MARM 2010. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Plan Nacional de Mejora de Calidad del Aire.

Nagl C., Moosmann L., Schneider J., 2007. Assessment of plans and programs reported under 1996/62/ec – final report. Service contract to the European Commission, DG Environment Contract No. 070402/2005/421167/MAR/C1. REPORT REP-0079. Vienna, Umweltbundesamt GMBH, <http://ec.europa.eu/environment/air/ambient.htm>, ISBN 3-85457-876-8, 139 pp.

CAPÍTULO 4

Clancy L, Goodman P, Sinclair H, Dockery DW: Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. Lancet 2002, 360:1210-1214.

Friedman MS, Powell KE, Hutwagner L, Graham LM, Teague WG: Impact of changes in transportation and commuting behaviours during the 1996 Summer Olympic Games in Atlanta on air quality and childhood asthma. JAMA 2001, 285:897-905.

Heinrich MC, El-Rifai WM, Demetri G, Heinrich J: Improved air quality in reunified Germany and decreases in respiratory symptoms. Hum Pathol 2002, 33:466-477.

Krzyzanowski M et al. Health effects of transport-related air pollution. WHO Regional Office for Europe. 2005.

Van Erp AM, O'Keefe R, Cohen AJ, Warren J. Evaluating the effectiveness of air quality interventions. J Toxicol Environ Health A 2008;71(9-10):583-7.

Von Storch H, Costa-Cabral M, Hagner C, Feser F, Pacyna J, Pacyna E et al. Four decades of gasoline lead emissions and control policies in Europe: a retrospective assessment. Sci Total Environ 2003; 311:151-76.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

66

ACLARAMIENTO CILIAR: limpieza de los fluidos acumulados en las vías respiratorias realizado por el movimiento hacia el exterior de los cilios de las células epiteliales respiratorias. Los cilios son pequeños apéndices de las células, que con sus impulsos o batidos coordinados generan una onda sincronizada que puede mover líquidos y expulsarlos, realizando en este caso una limpieza del sistema pulmonar, por ejemplo expulsando el moco producido y las partículas y gérmenes en él atrapadas.

ALEATORIZACIÓN: En Epidemiología, es un procedimiento metodológico para formación de varios grupos comparables, a partir de un grupo original dado. Establece para cada sujeto del grupo original la misma probabilidad de pertenecer a un grupo o a otro.

CO: monóxido de carbono.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV): son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Suelen presentar una cadena con un número de carbonos inferior a doce y contienen otros elementos como oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Su número supera el millar, pero los más abundantes en el aire son metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno. Los COV son un grupo variado de compuestos presentes en la atmósfera que incluyen un amplio espectro de hidrocarburos como alcanos, alquenos, hidrocarburos aromáticos, cetonas, alcoholes, ésteres y algunos compuestos clorados. El benceno (C₆H₆) es un COV aromático que ha recibido mucha atención debido a su carcinogenicidad.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgos, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza.

CONTAMINACIÓN FOTOQUÍMICA: se produce como consecuencia de la aparición en la atmósfera de sustancias oxidantes, originada al reaccionar entre sí los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de los rayos del sol. Los más comunes oxidantes fotoquímicos son el ozono, los nitratos de peroxiacilo y los aldehídos.

CONTAMINANTES PRIMARIOS: son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera por sus fuentes y permanecen en ella con la misma composición con la que fueron emitidos.

CONTAMINANTES SECUNDARIOS: surgen como el producto de reacciones químicas que tienen lugar en el seno de la atmósfera. Las sustancias que los originan se denominan precursores.

EFFECTO INVERNADERO: es un fenómeno natural causado por la presencia en la atmósfera de los denominados gases de efecto invernadero (GEI). Si se excluye el vapor de agua, cerca del 80 % de este efecto se debe al dióxido de carbono (CO₂). En esencia, el efecto consiste en que estos gases permiten la entrada de la energía de onda corta que proviene del Sol, ésta calienta la superficie terrestre y la Tierra, a su vez, emite radiación en la parte infrarroja del espectro (onda larga). Estos mismos GEI no permiten la salida de la radiación infrarroja, con lo que se produce una acumulación de energía en la atmósfera.

EMISIÓN DE CONTAMINANTES: se refiere a la cantidad de contaminante que vierte a la atmósfera una determinada fuente.

ESTUDIOS DE COHORTES: tipo de estudio epidemiológico en el cual subgrupos de una población definida pueden ser identificados en relación a la exposición a un factor o factores (por ejemplo, niveles de contaminantes atmosféricos en la comunidad donde residen los sujetos a estudio) que se pretende analizar si influyen la aparición de una enfermedad o otro resultado en salud (por ejemplo, mortalidad). La principal característica de un estudio de cohortes es la observación de un número grande de individuos durante un periodo largo de tiempo (habitualmente años) y la comparación de las tasas de incidencia en los diferentes grupos que difieren en los niveles de exposición.

ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN: Es un tipo de estudio epidemiológico en el que el investigador introduce variables en el estudio, interviniendo en la realidad y desarrollo del mismo. Se clasifican en función de si existe aleatorización o no en 1] Estudios cuasi-experimentales: son estudios en los que existe intervención pero los sujetos participantes no son aleatorizados. 2] Estudios experimentales: los sujetos participantes han sido incluidos de forma aleatoria (ensayo clínico, ensayo comunitario, o de laboratorio).

ESTUDIOS DE SERIES TEMPORALES: una serie temporal o cronológica es una secuencia de datos, observaciones o valores, medidos en determinados momentos del tiempo, ordenados cronológicamente y, normalmente, espaciados entre sí de manera uniforme. Las series temporales son uno de los diseños epidemiológicos más utilizados para estudiar la relación entre la contaminación atmosférica y diversos indicadores de salud-enfermedad. En ellos se analizan las variaciones en el tiempo de la exposición y el indicador de salud en una población (por ejemplo: número de defunciones, número de ingresos hospitalarios en una ciudad). Una de las grandes ventajas de los estudios de series temporales es que al analizar a la misma población en diferentes periodos de tiempo (día a día, generalmente) muchas de aquellas variables que pueden actuar como factores de confusión a nivel individual (hábito tabáquico, edad, género, ocupación, etc.) no es necesario controlarlas, ya que se mantienen estables en la misma población. En todo caso, no es previsible que las variaciones que éstas puedan sufrir día a día se relacionen con los niveles de contaminación atmosférica.

HUMOS NEGROS: partículas en suspensión medidas a partir del ennegrecimiento de un filtro por el que se ha hecho pasar el aire.

INMISIÓN DE CONTAMINANTES: hace referencia a la concentración del contaminante en la atmósfera, o aire ambiente, es decir, es la cantidad de contaminante que se mide o se respira.

INTERVENCIÓN: en esta publicación se utiliza el término intervención referido a políticas, programas o proyectos promovidos desde diferentes ámbitos sanitarios y no sanitarios. Estas intervenciones suponen cambios de los niveles de concentración de contaminantes en el aire que pueden producir repercusiones sobre la salud de los habitantes afectados.

INVERSIÓN TÉRMICA: derivación del cambio normal de las propiedades de la atmósfera con el aumento de la altitud. Usualmente corresponde a un incremento de la temperatura con la altura, o bien a una capa (Capa de inversión) donde ocurre el incremento. Como consecuencia, el aire no puede elevarse en una zona de inversión, puesto que es más frío y, por tanto, más denso en la zona inferior. Por ello, una inversión térmica puede llevar a que la contaminación atmosférica sea atrapada cerca del suelo.

MORBILIDAD: Enfermedad o frecuencia en que se presenta una enfermedad en una población.

MICROGRAMO: (símbolo μg): milésima parte de un miligramo. $1\ \mu\text{g} = 0,001\ \text{mg}$ ($10^{-3}\ \text{mg}$). $1000\ \mu\text{g}$ son $1\ \text{mg}$. Es la millonésima parte de un gramo, es decir, $0,000001\ \text{g}$ ($10^{-6}\ \text{g}$). Por tanto, un millón de microgramos son un gramo.

MICRÓMETRO O MICRA O MICRÓN: (símbolo μm): milésima parte de un milímetro. $1\ \mu\text{m} = 0,001\ \text{mm}$ ($10^{-3}\ \text{mm}$). $1000\ \mu\text{m}$ son $1\ \text{mm}$. Es la millonésima parte de un metro, es decir, $0,000001\ \text{m}$ ($10^{-6}\ \text{m}$). Por tanto, un millón de micrómetros son un metro.

NO₂: dióxido de nitrógeno.

O₃: ozono.

PARTÍCULAS TORÁCICAS: partículas presentes en la atmósfera que por su tamaño son capaces de penetrar a nivel pulmonar. Su tamaño suele ser inferior a $10\ \mu\text{m}$. Las de tamaño menor de $2,5\ \mu\text{m}$ se las denomina “finas”, mientras que las de tamaño inferior a $0,1\ \mu\text{m}$ son las llamadas “ultrafinas”.

PM₁₀: material particulado, partículas en suspensión de menos de $10\ \mu\text{m}$ de diámetro.

PM_{2,5}: partículas en suspensión de menos de $2,5\ \mu\text{m}$ de diámetro.

SMOG: palabra de origen inglés que hace referencia a la contaminación fotoquímica principalmente y surge de la combinación de las palabras inglesas “smoke” o humo y “fog”, niebla. Por tanto, el término “smog” hace referencia a la denominada “niebla contaminada” que rodea a muchas ciudades industrializadas.

SO₂: dióxido de azufre.

VOLUMEN ESPIRATORIO FORZADO (VEF₁): es la cantidad de aire expulsado durante el primer segundo de la espiración máxima, realizada tras una inspiración máxima.

CURRICULA DE LOS AUTORES

FERRAN BALLESTER DÍEZ es licenciado en Medicina por la Universidad de Valencia (1980). Especialista en Medicina Familiar y Comunitaria y en Medicina Preventiva y Salud Pública. Master en Salud Comunitaria por la Universidad de Valencia y Doctor en Salud Pública por la Universidad de Alicante. Ha trabajado en Atención Primaria (hasta 1988) y en Salud Pública, tanto como técnico, docente e investigador. En la actualidad coordina el Área de Ambiente y Salud del Centro Superior de Investigación en Salud Pública (CSISP) de la Generalitat Valenciana y es jefe de grupo en el CIBER de Epidemiología y Salud Pública, del Instituto de Salud Carlos III. Profesor asociado de la Universidad Miguel Hernández (1999-2004) y de la Universidad de Valencia, donde continúa. Sus líneas principales de investigación son la relación entre la contaminación atmosférica y la meteorología con la salud, así como las exposiciones a tóxicos y su efecto en el desarrollo y salud de los niños (proyecto INMA).

ELENA BOLDO PASCUA es licenciada en Biología (especialidad Ambiental y Sanitaria) por la Universidad de Alcalá de Henares (2001). Master en Salud y Medio Ambiente por el Centro Universitario de Salud Pública de Madrid. Trabaja como Técnico I+D+I en tareas de Evaluación de Impacto en Salud en el Centro Nacional de Epidemiología (Instituto de Salud Carlos III, Ministerio de Ciencia e Innovación). Miembro del CIBER de Epidemiología y Salud Pública. Interesada por cómo los factores ambientales influyen en la salud de la población, ha participado en los proyectos europeos APHEIS (Air Pollution and Health: A European Information System) y ENHIS (Environment and Health Information System). Actualmente colabora en un equipo multidisciplinar que investiga el impacto sobre la salud de la población española de la contaminación del aire y del agua, la contaminación industrial y el cambio climático.

JULIO DÍAZ JIMÉNEZ es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid en la especialidad de Física de la Tierra y el Cosmos, desde 1993. Lleva más de veinte años dedicados a la investigación y la docencia en temas relacionados con la salud y el medio ambiente, en particular en efectos de la contaminación atmosférica sobre la morbi-mortalidad. Asimismo, es experto en temas relacionados con el Cambio Climático y sus repercusiones en salud, en especial en aquellos relacionados con los extremos térmicos. Es autor de más de un centenar de artículos científicos y de varios capítulos de libros sobre salud ambiental. En la actualidad es Investigador Titular en la Escuela Nacional de Sanidad del Instituto de Salud Carlos III de Madrid.

CRISTINA LINARES GIL es doctora en Medicina Preventiva y Salud Pública y Licenciada en CC Biológicas por la Universidad Autónoma de Madrid. Master en Salud y Medioambiente y Master en Epidemiología Aplicada de Campo por el Centro Nacional de Epidemiología, donde desarrolla su actividad profesional en la actualidad dentro del Área de Epidemiología Ambiental y Cáncer del Instituto de Salud Carlos III. Su principal línea de investigación se centra en los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana, colaborando también junto al Doctor Julio Díaz en temas de Cambio Climático y salud. Es autora de diversas publicaciones científicas en temas de salud y medio ambiente.

XAVIER QUEROL CARCELLER es Profesor de Investigación del Consejo Superior Investigaciones Científicas, Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, IDAEA, Departamento de Geociencias. Es Doctor en Ciencias Geológicas por la Universitat de Barcelona, premios extraordinarios de Licenciatura y Doctorado. Desde Enero de 1994 desarrolla investigación sobre material particulado atmosférico en suspensión y sobre residuos industriales de combustión en el CSIC. Ha participado y/o dirigido diversos proyectos financiados por la CE, Ministerios de Educación y Ciencia, Medio Ambiente y varias CCAA y empresas. Ha dirigido 17 tesis doctorales, y es autor o co-autor de alrededor de 220 artículos científicos. Premio Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya 2009. Ha formado parte del comité asesor del programa Clean Air for Europe (CAFE) de la DG Medio Ambiente de la UE, en calidad de miembro de diversos grupos de expertos para la evaluación de las directivas de calidad del aire. Es director además de convenios de asesoramiento científico al Ministerio de Medio Ambiente y diversas CCAA en calidad del aire.

