



La contaminación del aire

Elena Boldo



ELENA BOLDO

Licenciada en Biología y doctora por la Universidad Autónoma de Madrid. Científica titular del Centro Nacional de Epidemiología del Instituto de Salud Carlos III. Su principal área de conocimiento es la evaluación del impacto que producen las exposiciones ambientales en la salud, especialmente por la contaminación atmosférica. Su paso por centros internacionales de investigación de gran prestigio, como la Organización Mundial de la Salud, le ha permitido adquirir una perspectiva global sobre las complejas interacciones que suceden entre el medio ambiente y la salud. Entre sus compromisos profesionales destaca la aplicación efectiva del principio de Salud en Todas las Políticas. Esta estrategia guía su espíritu investigador y la responsabilidad de trasladar los resultados de sus trabajos tanto a las autoridades sanitarias y medioambientales como a la sociedad en su conjunto.

Elena Boldo

La contaminación del aire



MÁS QUE SALUD

COLECCIÓN EDITADA CONJUNTAMENTE CON EL INSTITUTO DE SALUD
CARLOS III



DISEÑO DE COLECCIÓN: FERNANDO RAPA CARBALLO

© ELENA BOLDO, 2016

© INSTITUTO DE SALUD CARLOS III, 2016
MONFORTE DE LEMOS, 5
28029 MADRID
TEL. 91 822 20 00
WWW.ISCIII.ES

© LOS LIBROS DE LA CATARATA, 2016
FUENCARRAL, 70
28004 MADRID
TEL. 91 532 20 77
FAX. 91 532 43 34
WWW.CATARATA.ORG

LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

ISBN (CATARATA): 978-84-9097-228-1
DEPÓSITO LEGAL: M-35.812-2016
IBIC: RNP
ISBN (ISCIII): 978-84-95463-55-5
NIPO: 725160248

ESTE LIBRO HA SIDO EDITADO PARA SER DISTRIBUIDO. LA INTENCIÓN DE LOS EDITORES ES QUE SEA UTILIZADO LO MÁS AMPLIAMENTE POSIBLE. QUE SEAN ADQUIRIDOS ORIGINALES PARA PERMITIR LA EDICIÓN DE OTROS NUEVOS Y QUE, DE REPRODUCIR PARTES, SE HAGA CONSTAR EL TÍTULO Y LA AUTORÍA.

ÍNDICE

DEDICATORIA 7

CAPÍTULO 1. UN PLANETA AMENAZADO, UNA ATMÓSFERA
EN PELIGRO 9

CAPÍTULO 2. CUESTIONES CLAVE SOBRE LA CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA 17

CAPÍTULO 3. EL CÓCTEL QUE RESPIRAMOS 41

CAPÍTULO 4. EL VIAJE DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS
EN NUESTRO ORGANISMO 60

CAPÍTULO 5. EL RETO DE CONCILIAR CIENCIA, POLÍTICA
Y SOCIEDAD PARA UN AIRE DE CALIDAD 95

BIBLIOGRAFÍA 125

DEDICATORIA

Este libro va dedicado a todos aquellos que contribuyen y luchan con sus pequeños o grandes gestos a mejorar la calidad del aire que todos respiramos: a los peatones, a los ciclistas, a los ecologistas, a los usuarios regulares del transporte público, a los que consumen los recursos naturales con sensatez, a los políticos, a los técnicos, a los científicos y a usted mismo si también es de los que piensa en el bien común que supone una atmósfera más limpia antes de realizar una actividad.

A mi querida familia, a Paco y a Sara.

¿Piensa que el planeta sufre una seria amenaza medioambiental? En efecto, nuestra actividad incesante produce cambios en el medio ambiente que comprometen el equilibrio natural de la Tierra. La mano del hombre está detrás de fenómenos que pueden alcanzar una gran dimensión de deterioro ambiental, como la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono, la desertización o la continua generación de residuos peligrosos. Por un lado, perseguimos una progresiva mejora de la calidad de vida, lo que va ligado a la utilización y a la transformación de los recursos naturales, muchas veces limitados, para satisfacer nuestras necesidades. Además, el modelo de desarrollo y de crecimiento exige en múltiples ocasiones una mayor demanda de recursos de todo tipo hasta el punto de contaminarlos e incluso esquilmarlos. Por otro lado, la ciudadanía reclama que los sistemas que mejoren las condiciones de vida sean compatibles con una explotación racional del medio ambiente. Consciente del potencial impacto de la contaminación en

el planeta, la sociedad sospecha de su influencia en el bienestar y de las consecuencias en el futuro.

El aire, recurso natural imprescindible para nuestra vida, no se escapa de esta contradicción. Por un lado, soporta la continua acción contaminante del hombre y, por otro lado, la sociedad se preocupa por los efectos negativos que ocasiona su degradación. Es decir, el hombre lidia con la paradoja de ser víctima y verdugo a la vez. Y se enfrenta al complicado reto de garantizar el uso y consumo del capital natural con el máximo respeto a las leyes y a los mecanismos básicos de funcionamiento de los sistemas biofísicos. Veamos cómo empezó el deterioro de la calidad del aire.

EL DETERIORO DE LA CALIDAD DEL AIRE TIENE SU PROPIA HISTORIA

La atmósfera terrestre es dinámica y nunca ha estado libre de cambios. Su composición, temperatura y capacidad de renovación han variado desde que se formó el planeta. Aunque el deterioro de la calidad del aire por las actividades del hombre se inicia desde los albores de la civilización, el ritmo de los dos últimos siglos ha sido vertiginoso. La composición de la atmósfera ha cambiado con una celeridad desconocida en cualquier otra época de la historia de la humanidad. Una serie de hechos históricos han ido contribuyendo al incremento de la contaminación atmosférica.

La atmósfera, los ciclos meteorológicos y las variaciones estacionales han sido durante mucho tiempo objeto de fascinación y de observación. Sabemos que el dominio del fuego favoreció la evolución de los homínidos, pero ese gran salto en la lucha por la supervivencia es considerada por algunos como el origen de la contaminación atmosférica antropogénica. El hacinamiento, el humo y los malos olores condicionaron la vida del hombre primitivo en el interior de las cavernas. El empleo

de este elemento permitió a los humanos realizar numerosas actividades domésticas (cocinar, calentarse, producir luz), colonizar ambientes fríos, defenderse, pintar, adquirir recursos del entorno, entre otras acciones. Esto facilitó también la alteración de la estructura de la vegetación, al emplearla como combustible, y del régimen natural de los incendios forestales. En cualquier caso, parece evidente que el impacto de los pueblos nómadas sobre la calidad del aire habría sido irrelevante frente al provocado por las fuentes naturales, como los volcanes.

Posteriormente, la llegada de la agricultura facilitó la sedentarización del hombre y la formación de comunidades que fueron creciendo progresivamente. Esto supuso el agotamiento local de la madera y la consiguiente búsqueda de combustibles alternativos, como el carbón.

Las momias egipcias muestran signos de deposición de carbono en el pulmón, lo que sugiere una larga exposición a contaminación del aire de ambientes interiores. En la antigua Grecia, determinadas enfermedades ocupacionales, como las de los fundidores, ya se relacionaban con la mala calidad del aire. Para los griegos era ya importante una buena organización territorial para realizar las actividades propias de la ciudad, a fin de evitar molestias innecesarias a sus moradores y poder disponer de un aire limpio.

Se estima que la Roma imperial llegó a alcanzar un millón de habitantes, lo que suponía una enorme cantidad de quema de biomasa para el cocinado y la calefacción. Las referencias más antiguas a episodios de contaminación atmosférica en urbes se remontan a esta época. El emperador Nerón se quejaba de los malos efectos que el humo tenía sobre su salud y el escritor Horacio se lamentaba por el daño que el humo ocasionaba en los templos. Existe, incluso, un registro de medidas contra las molestias ocasionadas por la producción del humo, lo que supone que las normas romanas ya eran sensibles a este problema ambiental. De hecho, la corte romana tuvo que resolver

casos sobre residentes que protestaban por los molestos humos de factorías. Contaban, además, con un tratado en el que se mencionaba la necesidad de tener en cuenta los vientos dominantes para la planificación de las ciudades.

Dando un salto en la historia, en 1661 nos encontramos con *Fumifugium* (John Evelyn), una de las obras más antiguas conocidas sobre la contaminación atmosférica. Su autor era un científico preocupado por los efectos que el humo del carbón provocaba sobre la salud urbana, la vida de las plantas y los edificios. El documento, dirigido al rey Carlos II de Inglaterra, se dividía en tres partes, en las que se explicaba el problema de la contaminación del aire en Londres y los efectos en la salud, se planteaba la solución de desplazar las actividades contaminantes fuera de la ciudad y se proponía una serie de plantaciones cerca de Londres para mejorar su calidad del aire. Evelyn argumenta que los problemas de contaminación del aire en la capital se remontan a la época medieval.

Desde la Revolución industrial el medio ambiente se ha visto cada vez más seriamente afectado por la actividad humana. El desarrollo tecnológico generalizó la contaminación del aire, sobre todo por el uso del carbón como forma primordial de energía y por los propios contaminantes tóxicos que generaban las fábricas. Las industrias se situaban, por lo general, en el interior de los núcleos de población, con lo que sus emisiones se sumaban a las domésticas. Así se comenzaron a registrar localmente niveles elevados de sustancias que originaron los primeros episodios graves para la salud, el deterioro de las construcciones, la pérdida de la visibilidad y el efecto de la contaminación en la vegetación. Es evidente que la economía crecía, pero a costa de la destrucción del medio ambiente y del malestar de la población. La preocupación por el saneamiento ambiental se incrementaba a medida que iban aumentando los problemas de contaminación.

La imagen de las ciudades de esta época estaba salpicada por innumerables chimeneas emergiendo por los tejados, que

debían limpiarse periódicamente para evitar que se incendiara por el hollín acumulado. Esta ingrata tarea solía realizarse por la noche y, sobre todo, por niños de corta edad que escalaban por el conducto de las chimeneas todavía calientes. No es de extrañar que este oficio no estuviera exento de todo tipo de riesgos para la salud. En 1775, Percivall Pott relacionó por primera vez la exposición al hollín, tanto por inhalación como por contacto dérmico, con cáncer de piel del escroto en los deshollinadores británicos. Este cirujano inglés fue el primer científico en demostrar que un cáncer puede ser provocado por agentes ambientales (carcinógeno). Desde entonces, numerosos estudios demostraron que los deshollinadores presentaban un mayor riesgo de otros tipos de cánceres de piel, de escroto, de pulmón, de esófago y de vejiga.

Hasta bien avanzada la Revolución industrial apenas había ciudades que superaran los 100.000 habitantes. Sin embargo, en el siglo XIX muchos problemas sociales surgen por el desproporcionado incremento de la población urbana, que ya padecía graves efectos en la salud por la exposición a la contaminación atmosférica. El hacinamiento de la población trajo unas consecuencias tremendas, las peores de las cuales estaban relacionadas con la falta de alojamientos adecuados, la masificación en las fábricas y las enfermedades asociadas con ello.

En esta época el humo era la principal preocupación, porque manchaba la ropa y otros enseres, ennegrecía los edificios y afectaba a la salud por su presencia en la atmósfera urbana. Las condiciones ambientales eran tan precarias que, por ejemplo, toda una región, entre Birmingham y Stoke, se conocía como "el País Negro", debido a las edificaciones afeadas por el hollín y el humo procedentes de los altos hornos. Las primitivas administraciones sanitarias del momento reaccionaron desarrollando regulaciones para el control del humo en las industrias de acero en Reino Unido y Francia, tratando de motivar a los ingenieros para conseguir la reducción de las emisiones.

Sin embargo, el humo se entendía como inevitable y, mientras algunos simplemente protestaban contra las normas, otros lo asociaban con una supuesta bonanza económica.

El continuo desarrollo industrial y la invención del automóvil, unidos a la escasa eficacia de la política de control de emisiones, siguieron agravando los problemas ambientales en el siglo XX. La mejora en el transporte facilitó el crecimiento y la expansión de las urbes, concentrando grandes poblaciones en territorios relativamente pequeños. El progreso tecnológico de este periodo se logró con un impacto significativo en el medio ambiente y en la salud humana.

Durante la primera mitad del siglo XX, una serie de episodios de elevada contaminación atmosférica acabó provocando un aumento de la morbilidad en sus residentes y la consiguiente reacción de la sociedad, marcando un punto de inflexión en la actitud frente a este problema. Aunque se desconocía la concentración o la identidad de los contaminantes atmosféricos, los efectos en la salud fueron muy notorios en el Valle de Mosa (Bélgica) en 1930, donde murieron 63 personas por envenenamiento debido al flúor. En 1948, el esmog fotoquímico o niebla mortal de Donora (Pensilvania, EE UU), que contenía partículas y dióxido de azufre, ocasionó la muerte de 20 personas y más de 7.000 enfermaron. La niebla era tan espesa que los residentes no podían distinguir a las personas que pasaban por la acera.

El peor de estos episodios se produjo en Londres en 1952. Una densa niebla, similar en composición a la de Donora, cubrió el área del Gran Londres durante cuatro días, del 5 al 8 de diciembre de 1952, acompañándose de un brusco aumento en la mortalidad de sus habitantes. Inicialmente el número de muertes atribuidas a este episodio fue de entre 3.500 y 4.000. Estudios posteriores, sin embargo, han cuestionado dicha valoración y han estimado en unas 12.000 personas las fallecidas entre diciembre de 1952 y febrero de 1953 a causa de los efectos persistentes de la contaminación atmosférica.

Con todo, han sido las catástrofes industriales las que han originado los mayores eventos de contaminación producidos a lo largo de la historia reciente de la humanidad. Algunas emisiones tóxicas han sido especialmente trágicas. Uno de los ejemplos más ilustrativos se produjo en Bhopal (India) en 1984, en lo que se ha calificado como el mayor desastre industrial del mundo. Una fábrica de plaguicidas liberó treinta toneladas de isocianato de metilo al aire a través de una válvula rota. El contaminante afectó a la población cercana provocando unos 23.000 muertos, más de 33.000 con lesiones graves y más de 500.000 personas lisiadas de por vida, de acuerdo con estimaciones del Consejo de Investigación Médica Hindú. Más de 30 años después, la población de Bhopal sigue expuesta a compuestos tóxicos a través del agua y del suelo.

Por otra parte, los accidentes nucleares, como el de Chernobyl (Ucrania) en 1986 o el de Fukushima (Japón) en 2011, constituyen de los mayores desastres medioambientales de la historia. En ambos casos, hubo muertes a corto y largo plazo por las dosis de radiación recibidas, así como evacuaciones de miles de personas del entorno de las centrales. Además, saltó la alarma internacional por radiactividad al detectarse en múltiples países.

La contaminación atmosférica se convirtió en un asunto de gran importancia tras los episodios comentados —sobre todo el de Londres de 1952— y lo acontecido durante la Segunda Guerra Mundial tras hacerse evidentes las repercusiones de la radiactividad ocasionada por los ensayos nucleares y el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki el 6 y el 9 de agosto de 1945, respectivamente. De este modo, se comprendió la necesidad de intervención de los poderes públicos para regular el aprovechamiento y minimizar el impacto humano sobre los recursos ambientales básicos, como el agua o el aire. En el caso del aire, se produjeron grandes cambios en las políticas ambientales que conllevaron la adopción de políticas

de control de la contaminación atmosférica, sobre todo en Europa Occidental y en los Estados Unidos.

Estas medidas políticas iniciales supusieron una importante reducción de los niveles de la contaminación atmosférica, al tiempo que establecieron los primeros sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Todo ello contribuyó a la reducción de las altas concentraciones de contaminantes observadas en tiempos pasados. No obstante, a pesar de los grandes progresos realizados para mejorar la calidad del aire, la exposición continua a niveles moderados o bajos de contaminantes es un fenómeno que se sigue produciendo cotidianamente y que sigue preocupando fundamentalmente en las zonas más pobladas y/o industrializadas. Pese a los importantes logros alcanzados, las acciones emprendidas hasta el momento son insuficientes para contrarrestar la tendencia de degradación.

Actualmente se reconoce que la contaminación atmosférica, que no entiende de fronteras, se ha convertido en un problema de dimensión mundial. La ciencia ha mostrado que la deficiente calidad del aire puede ocasionar graves consecuencias para el medio ambiente y para nuestra salud. Los contaminantes atmosféricos se han relacionado con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, con daños en la vegetación, con la acidificación y eutrofización de suelos y aguas, con la reducción de cosechas, con el cambio climático o con la corrosión de edificios, entre otros efectos adversos. Este enorme impacto exige nuestra responsabilidad para actuar en defensa de una atmósfera menos contaminada. La complejidad de esta amenaza medioambiental requiere de una colaboración estrecha entre ciencia, tecnología y sociedad para su abordaje y búsqueda de posibles soluciones. Y es ahora el momento. Sin mirar hacia otro lado, todos podemos colaborar activamente para mejorar la calidad del aire. Para ello, nada mejor que empezar por enriquecer nuestros conocimientos sobre este tema para fundamentar nuestras decisiones personales.

CUESTIONES CLAVE SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Nuestras actividades más cotidianas, como encender la luz, poner la lavadora o conducir hacia el trabajo, generan inevitablemente una contaminación en el medio ambiente y consumen unos recursos que el planeta tarda en regenerar. Centrados en el aire, ese que todos respiramos, sabemos que es un recurso natural limitado del que depende nuestra existencia. Así que seguro que con frecuencia hemos oído hablar de la "contaminación atmosférica". Quizás hasta ha sido el tema de alguna de nuestras conversaciones informales en las que todos se apresuran a encontrar soluciones un tanto milagrosas. Bien, cuando menos, ¡ayudan a tomar conciencia de un problema! Que no es poco.

LA ATMÓSFERA SE DIVIDE EN CAPAS, EN LA TROPOSFERA SE DESARROLLA LA VIDA

Las distintas capas de la atmósfera terrestre vienen determinadas por la altitud, la temperatura y la composición del aire. Las

más importantes para el análisis de la contaminación atmosférica son la troposfera y la estratosfera. En la troposfera, que alcanza unos 15 km de altura, se producen los fenómenos climáticos. En ella se encuentra el aire que respiramos, compuesto por un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y un 1% de gases inertes, como el argón. También contiene vapor de agua, que constituye entre el 0,1% y el 4% de la troposfera. El aire caliente suele tener más vapor de agua que el frío. La troposfera contiene asimismo pequeñas cantidades de otros gases, llamados "gases traza", como dióxido de carbono y metano, que se miden en partes por millón (ppm). Más arriba de la troposfera, aproximadamente hasta 50 km de altura, se encuentra la estratosfera, importante por la capa de ozono, ese filtro natural que protege a la Tierra de los rayos ultravioleta y que de no existir sería imposible la vida en el planeta.

UNA DEFINICIÓN DEL COMPLEJO FENÓMENO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica se refiere a cualquier condición que rompa el equilibrio del aire, esa mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre y que es esencial para la existencia de la vida en la Tierra. Supone la modificación de la proporción de sus componentes o la introducción en la atmósfera de elementos indeseables, es decir, materias, sustancias o formas de energía que tengan un efecto nocivo para la salud humana, que causen daños en el medio ambiente o que deterioren los bienes materiales. Pero ¡ojo!, aunque parezca obvia, esta definición introduce importantes matices, ya que no solo se consideran contaminantes atmosféricos los de origen químico, sino que también aquellas formas de energía física, como el ruido o las radiaciones, y elementos biológicos en grandes concentraciones, como la debida a niveles elevados de polen de diferentes

especies, especialmente durante la primavera. Se trata, además, de un problema que puede tener efectos sobre múltiples receptores: salud o bienestar humano, bienes y medioambiente en su conjunto.

UN AMBIENTE DISTINTO: CONTAMINACIÓN DE AMBIENTES INTERIORES ('INDOOR') Y DEL AIRE AMBIENTE ('OUTDOOR')

El hecho de permanecer en un espacio cerrado, como en casa, no nos libra de una potencial exposición a la contaminación del aire que nos rodea. Como respiramos continuamente a lo largo de la vida, estamos expuestos a lo que contenga el aire que inhalamos, tanto en espacios abiertos como cerrados. Vayamos donde vayamos, el aire que nos rodea puede contener toda una serie de contaminantes en proporciones que a veces pueden afectar a nuestra salud.

En relación con el ambiente donde podemos encontrar sustancias nocivas y donde potencialmente puede producirse nuestra exposición, se distingue entre los espacios interiores o cerrados (aire interior) y los exteriores (aire ambiente), lo que en inglés se denomina *indoor* y *outdoor*, respectivamente. Esta distinción se origina porque las fuentes de emisión y los contaminantes del aire son diferentes. Además, las sustancias emitidas en el aire interior tienen muchas menos oportunidades de dispersarse que las liberadas en el aire ambiente debido a las diferencias de volumen de aire disponible.

Se estima que nuestras actividades de la vida diaria contribuyen a que pasemos más del 80% de nuestro tiempo en espacios interiores públicos o privados (oficinas, colegios, hospitales, guarderías, centros comerciales o viviendas particulares, entre otros espacios). La calidad del aire en estos lugares varía considerablemente, en función del material utilizado para

construirlos, decorarlos y limpiarlos, de la finalidad del lugar, así como de la manera en que lo utilizamos y ventilamos. Ni que decir tiene que también se produce un intercambio de contaminantes con el aire del exterior. Así, podemos encontrar productos de la combustión (como las partículas en suspensión, el monóxido de carbono [CO], dióxido de carbono [CO₂]), plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles (COV, como aldehídos, alcoholes, alcanos o cetonas), polvo orgánico, radón o agentes biológicos (hongos, bacterias, virus, entre otros). Para saber a qué nos referimos basta con recordar una casa recién pintada o los olores característicos de los productos de limpieza, los repelentes de las polillas o del humo del tabaco. El penetrante olor de los muebles nuevos fabricados con madera contrachapada o laminada, de las alfombras nuevas y de algunas telas que no se arrugan se debe a que desprenden uno de los COV (el formaldehído) que puede producir irritación y sensación de ardor en los ojos, la nariz, la garganta o lagrimeo. La cantidad de formaldehído emitido por estos productos disminuye con el tiempo y la ventilación de las viviendas disminuye su concentración en el ambiente interior. Este contaminante también está presente en ambientes exteriores, generado principalmente por la industria y el tráfico.

El nivel económico, la localización geográfica y las características socioculturales de los individuos condicionan los tipos de contaminantes presentes en ambientes interiores y los procesos patológicos derivados de esa exposición. Así, en países de mayor desarrollo socioeconómico, la contaminación del aire interior viene sobre todo determinada por el diseño arquitectónico de los edificios, las fuentes de contaminación exterior, los materiales de construcción y los sistemas de ventilación y de aire acondicionado. En cambio, la fuente fundamental en los países menos desarrollados es el empleo de biomasa en los hogares. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), unos 3.000 millones de personas siguen cocinando y

calentando sus hogares con combustibles sólidos (es decir, madera, residuos agrícolas, carbón vegetal y mineral y excrementos de animales), mediante el empleo de fuegos abiertos y cocinas con fugas, que producen elevados niveles de contaminación del aire en interiores. Estos combustibles y tecnologías ineficientes, unido a una deficiente ventilación, liberan elementos nocivos para la salud, tales como pequeñas partículas de hollín que penetran profundamente en los pulmones. En su mayoría, esto lo padecen personas pobres que habitan en países de ingresos bajos y medianos, afectando especialmente a mujeres y niños que pasan la mayor parte del tiempo cerca del hogar.

UNA FORMACIÓN DIFERENTE: CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

En función de los procesos de formación, los contaminantes se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios se liberan directamente desde distintas fuentes perfectamente identificables, ya sean naturales o antropogénicas, como el CO o el benceno. Por otra parte, los contaminantes interaccionan unos con otros en la atmósfera en función de las condiciones meteorológicas (viento, temperatura, radiación y humedad). Así se forman los contaminantes secundarios en la atmósfera, mediante reacciones químicas entre contaminantes ya presentes, llamados precursores, o entre estos y los constituyentes normales del aire. Este es el caso del ozono troposférico, gas nocivo cuando se encuentra en esta capa de la atmósfera, que se produce por reacción química entre contaminantes primarios y la radiación solar. Otros contaminantes, como las partículas, pueden ser emitidas directamente desde una fuente (contaminantes primarios), o bien convertirse en contaminantes secundarios al formarse en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas y procesos de conversión de sus precursores gaseosos

(dióxido de azufre [SO₂], óxidos de nitrógeno [NO_x], amoníaco [NH₃] y vapores orgánicos).

Esta distinción es importante para el control de la contaminación atmosférica. El motivo se debe a que la reducción de emisiones de un contaminante primario consigue la disminución de la concentración ambiental de dicha sustancia. Sin embargo, esta relación directa no siempre se produce en los contaminantes secundarios, donde la reducción de un precursor no significa de forma automática el descenso proporcional del contaminante secundario, como ocurre con el ozono (este tema ya se desarrollará más adelante).

UN ORIGEN DISTINTO: FUENTES NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS

Tanto los fenómenos naturales como las actividades humanas provocan la emisión de contaminantes atmosféricos que modifican la calidad del aire. La fluctuación en la concentración de los componentes atmosféricos obedece, en parte, a las variaciones que se producen en la tasa de emisión de las fuentes naturales. Sin embargo, es la acción del hombre la que provoca los cambios más rápidos y los más devastadores, como los que han sucedido en los últimos 200 años.

Las emisiones naturales se generan por procesos que ocurren en la naturaleza sin influencia directa del hombre, como las emisiones volcánicas y marinas, los procesos biológicos, los incendios forestales o las tormentas de polvo y arena. Estas emisiones forman parte de los ciclos propios del planeta, ayudan a regular la temperatura a escala global, propician el balance químico de la atmósfera y han determinado en gran medida la evolución de los ecosistemas. Si se comparan con las emisiones derivadas de la actividad humana, se cuantifican en varios órdenes de magnitud superior.

Una erupción volcánica emite a la atmósfera gases (SO_2 , H_2S , CO , NO_x), partículas y ceniza, que son impulsados a grandes distancias por la onda de energía térmica (calor) y la presión confinada en el magma. Este fenómeno genera variaciones climáticas locales y regionales, lluvia ácida, efecto invernadero, esmog volcánico y una densa capa gaseosa cuya presencia impide la penetración total de la luz solar sobre la superficie.

Por otra parte, las plantas y los microorganismos del suelo intervienen en procesos de nitrificación y desnitrificación, emiten COV biogénicos y compuestos de nitrógeno. El proceso de la digestión de los herbívoros produce metano (CH_4), un gas de efecto invernadero que se origina como resultado de la descomposición anaerobia (sin oxígeno) de la materia orgánica por las bacterias metanogénicas. Además, como parte de los aerosoles naturales, se encuentran los pólenes, las esporas, los hongos, las algas, las células epiteliales, las bacterias, los virus y, en general, cualquier partícula que haya sido liberada o formada a partir de compuestos provenientes de los seres vivos. Los aerosoles biológicos son de gran relevancia para la salud humana, ya que pueden causar enfermedades infecciosas, alérgicas o tóxicas.

Finalmente, los incendios forestales han existido siempre en la historia de la vida terrestre, jugando un papel importante en la naturaleza que es estudiado por la Ecología del Fuego. Sin duda, existen unos regímenes de incendios que son naturales, predecibles y característicos de ciertos ecosistemas, lo que explica parte de la biodiversidad y los paisajes. Sin embargo, determinadas zonas están sufriendo una alteración del régimen natural de incendios que exceden los parámetros naturales y que ocasionan graves consecuencias ecológicas. Y aquí entra en escena el factor humano.

Los incendios forestales provocan un impacto evidente en la calidad del aire, al emitir a la atmósfera importantes cantidades de CO_2 y otros gases, como compuestos nitrogenados e

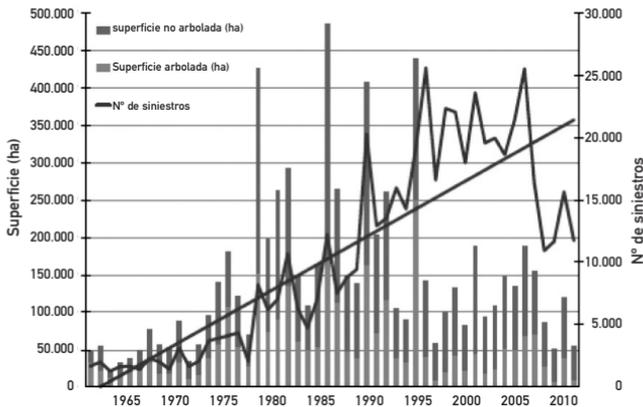
hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), así como partículas. Las cenizas son otro de los problemas atmosféricos que causan los incendios. Las emisiones son dependientes de las condiciones meteorológicas, de los tipos de vegetación y de su grado de humedad, así como de la carga de combustible consumido por unidad de área. Los compuestos más contaminantes se liberan cuando la combustión es incompleta, cuando el frente de fuego es muy rápido o en las combustiones humeantes posteriores al incendio. Además de la pérdida de vidas humanas y los enormes daños materiales que ocasionan los fuegos, los daños ecológicos son también significativos: la destrucción de la vegetación y la fauna, los impactos sobre los balances hidrológicos, la calidad del agua y la atmósfera, las pérdidas irreparables de tierra fértil, la erosión del suelo y los efectos sobre el paisaje.

INCENDIOS FORESTALES. UN GRAVE PROBLEMA ECOLÓGICO CUANDO SE DERIVAN DE LA MANO DEL HOMBRE

En España, una pequeña parte de los incendios forestales se originan por rayos, pero el 78% del total de los siniestros son consecuencia de la acción humana, bien sean debidos a negligencias y causas accidentales, bien sean intencionados, afectando estos al 83% de la superficie total forestal. Entre las causas figuran las quemas de restos agrícolas, de matorral, de basuras o para obtención de pasto, pirómanos, colillas mal apagadas, trabajos forestales, motores y máquinas, hogueras, la caza, la obtención de madera a bajo precio o la modificación en el uso del suelo.

La tendencia del número de siniestros en el periodo comprendido entre 1961 y 2010 ha sido creciente debido, entre otros factores, a un mayor registro de todos los siniestros forestales. En cambio, las superficies afectadas han sufrido una tendencia creciente hasta mediados de los años noventa, tras lo cual ha habido un notable descenso debido sobre todo a la mejora en el control de los incendios ya iniciados, no tanto por evitar las causas que los originan. En este periodo, el mayor número de siniestros se produjo en 1995 con un total de 25.557 y el año de mayor superficie forestal afectada fue 1985 con 484.475 hectáreas.

GRÁFICO 1

EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE INCENDIOS Y SUPERFICIES AFECTADAS
EN ESPAÑA. 1961-2010

Fuente: *Los incendios forestales en España. Decenio 2001-2010*, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

En España son especialmente relevantes las intrusiones de polvo sahariano (calimas), dada la cercanía geográfica con el continente africano y, en concreto, con el desierto del Sáhara. Las condiciones extremadamente secas y cálidas de esta zona forman turbulencias capaces de propulsar el polvo a una altitud de 4 a 5 kilómetros, que puede permanecer semanas o meses a estas altitudes y a menudo el viento lo esparce por toda Europa. Este polvo sahariano está compuesto de partículas en su mayoría de origen mineral, como la calcita, el óxido férrico, cuarzo y minerales de arcilla. También puede ser portador de material biológico, como esporas, bacterias y polen. La advección de polvo sahariano es un fenómeno relativamente frecuente en nuestro país, lo que comporta tanto un aumento en las concentraciones de partículas (PM, sobre todo de partículas gruesas — PM_{10} — y, en menor medida, de partículas finas — $PM_{2,5}$ —), como un cambio en la composición química de las partículas

presentes en el aire. Estas especiales circunstancias suponen que los días de intrusión sahariana se observe un patrón de efectos en la salud claramente diferenciado de otros días en los que no se produce este fenómeno.

Por otra parte, la contaminación antropogénica, generada por las actividades del hombre, se concentra en áreas específicas, como zonas urbanas o industriales, donde son más importantes que las emisiones provenientes de la naturaleza y donde la existencia de sumideros como la vegetación o el suelo son menores. Es importante señalar que las emisiones naturales no son susceptibles de ser controladas por sí mismas, mientras que toda emisión antropogénica sí puede serlo.

Las principales fuentes de emisión antropogénicas son la industria, el transporte motorizado, la generación de energía, la agricultura y la ganadería. El empleo de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, como base energética en nuestro modelo de desarrollo, contribuye al incremento de la contaminación atmosférica. En las ciudades, el tráfico, las emisiones residenciales (calefacción y cocinado), la construcción-demolición, además de posibles emisiones industriales o de generación eléctrica, marcan el grado de contaminación atmosférica. Las emisiones derivadas de la actividad humana ocasionan que la población esté expuesta de manera cotidiana y continua a una deficiente calidad del aire.

La contaminación de origen industrial liberada al aire se caracteriza por la gran cantidad y variedad de contaminantes emitidos en las distintas fases de los procesos industriales. Los contaminantes producidos dependen fundamentalmente del tipo de proceso de producción empleado, de la tecnología utilizada y de las materias primas usadas. Además, los focos de emisión industriales suelen combinar emisiones puntuales, relativamente controlables, con emisiones difusas de muy difícil control. Entre las industrias más contaminantes destacan las termoeléctricas, las cerámicas, las siderometalúrgicas, las

papeleras, las químicas y las refinerías. Aunque se tiende a situar los polígonos industriales en las afueras de las ciudades, todavía existen industrias ubicadas en los entornos urbanos. Además, las ciudades en su rápido crecimiento se aproximan, o incluso engloban, a los polígonos industriales.

Si trabajamos o vivimos cerca de una industria, podemos fácilmente consultar las sustancias contaminantes que emite y los tipos de residuos que genera. El Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR-España: <http://www.prtr-es.es/>) pone a disposición del público información sobre las emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo de las sustancias contaminantes y datos de transferencias de residuos de las principales industrias y otras fuentes puntuales y difusas, de acuerdo a lo establecido en la legislación internacional (Protocolo de Kiev y Convenio de Aarhus), europea (Reglamento E-PRTR) y nacional (Real Decreto 508/2007 y modificaciones posteriores).

Pero sin duda, el tráfico rodado es el gran caballo de batalla de las grandes ciudades, dado que aporta una gran parte de los contaminantes atmosféricos presentes en el medio urbano (del orden del 40-50%), produciendo emisiones en la proximidad de sus habitantes y de forma muy extendida en la urbe. Los principales contaminantes que emiten son el CO, los NO_x, los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) y las partículas. A esto se suman los metales, como el hierro, bario, plomo, cobre, zinc, cadmio o antimonio. Las emisiones directas de los motores de los vehículos, lo que sale por el tubo de escape, suponen alrededor del 50% de la contribución a los niveles de partículas gruesas (PM₁₀). Un aspecto insospechado y bastante sorprendente, es que el otro 50% se debe a la resuspensión del material sedimentado en la calzada, a la erosión del firme de rodadura y al desgaste de frenos, embrague y ruedas. La mayor parte de los productos de abrasión de los frenos se emite en forma de partículas finas que contienen metales.

Los vehículos diésel consumen menos combustible y emiten menos CO₂ e hidrocarburos en relación con sus equivalentes en gasolina. Esta es una de las principales razones que ha conducido a que las políticas de control del cambio climático hayan favorecido este tipo de vehículos, obviando que emiten más partículas y más NO₂. Este hecho ha supuesto un deterioro claro de la calidad del aire de las ciudades por la “dieselización” del parque móvil, acompañada por un incremento del número de vehículos y un tráfico denso.

En Europa, se estima que los usuarios habituales del vehículo privado pasan alrededor de una hora diaria dentro del mismo. La calidad del aire del interior de los vehículos ha sido poco investigada, pero diversos estudios aparecidos recientemente señalan que supone la exposición a partículas, COV, HAP, alérgenos biológicos, materiales ignífugos bromados, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, así como al humo del tabaco si hay fumadores. El coche, el “becerro de oro” de nuestra época, ha cambiado nuestros hábitos de vida a un precio muy alto. Si bien nos parece impensable renunciar al mismo, ahora ya se trata de que pensemos en hacer del coche un uso más racional en favor del aire que respiramos todos.

VEHÍCULOS A MOTOR DEL FUTURO: EL LARGO CAMINO HACIA LAS (IMPOSIBLES) CERO EMISIONES

La investigación de nuevos motores más eficientes y menos contaminantes seguirá adelante por la presión de los mercados, por ejemplo si pensamos en los precios de los carburantes, así como por las Normas Euro que marcan progresivamente límites menores de consumo y de emisiones contaminantes para los vehículos. Lo cierto es que el sector del automóvil está en permanente evolución desde los primeros vehículos autopropulsados por vapor del siglo XVIII. Los combustibles fósiles, principalmente gasolina y gasóleo, han sido protagonistas durante más de un siglo, pero cada vez más se ensayan combustibles alternativos. Algunos siguen pasando por los combustibles fósiles, como los

gases licuados del petróleo o el gas natural. Otros se catalogan dentro de los biocarburantes o derivados de la biomasa, como el bioetanol o el biodiésel, que normalmente son una mezcla en diferentes proporciones entre combustible renovable de origen vegetal y combustible de origen petroquímico.

La electricidad también se contempla como energía alternativa de futuro para los motores. Distintos fabricantes de automóviles investigan desde hace años el desarrollo de vehículos eléctricos. De hecho, cada vez se comercializan más modelos con distinta aceptación por parte de los usuarios. Entre los retos futuros figuran el aumento de la autonomía (actualmente entre unos 200 y 500 km), acompañado de la reducción del peso de las baterías (actualmente del orden del 40% del peso total del vehículo) y del tiempo de recarga (actualmente de unas 8 horas). En cuanto a la contaminación del aire, los coches eléctricos son muy silenciosos, pero que nadie se despiste ¡no son cero emisiones! Obviamente, se producen emisiones durante todo el ciclo de vida del vehículo (desde la fabricación hasta el reciclaje final), por desgaste de frenos y ruedas, así como por la resuspensión de los contaminantes que se encuentran en el pavimento. Aunque contaminen menos por donde circulan, tampoco debemos olvidar que la generación de electricidad —que puede proceder de energías renovables, pero también de una central térmica o una nuclear— genera emisiones y residuos a nivel global.

Los automóviles híbridos ofrecen actualmente una solución de compromiso frente a las limitaciones de los vehículos eléctricos. La invención de los vehículos híbridos surge de la necesidad de mejorar el ahorro de combustible en los coches actuales y aumentar su potencia, combinando las prestaciones de los motores de combustión interna con los motores eléctricos. Según sea su configuración estos coches pueden ser de dos clases: en paralelo o en serie. Si es en paralelo, ambos motores pueden funcionar de forma conjunta o independiente y ambos están conectados a las ruedas. Esta particularidad los hace especialmente interesantes cuando circulan en ciudad, donde no hace falta mucha potencia, dado que el motor eléctrico permite un ahorro considerable de combustible y de emisiones. Los híbridos en serie también poseen un motor de combustión y uno eléctrico, pero este último es el encargado de la tracción, es decir, es el que impulsa las ruedas utilizando la electricidad suministrada por el generador accionado por el motor de combustión interna. Estos vehículos

suelen utilizar el motor térmico para recargar las baterías, con lo que se necesitan menor número de estas aligerando el peso total del vehículo.

En relación con el sector agropecuario, la superficie agraria útil de España supone más de 23 millones de hectáreas, casi la mitad del territorio español, de las cuales casi 17 millones de hectáreas son de cultivo. Del total de la superficie cultivada, el 76% de dicha superficie está dedicada al cultivo de secano y el 24% al cultivo en regadío. En lo que respecta al sector ganadero, en España existen más de 25 millones de cabezas de ganado porcino y más de 16 millones de ganado ovino. Por si todavía no hemos caído en la cuenta, muchas labores desarrolladas para el mantenimiento de este volumen de actividad son emisoras de contaminantes atmosféricos. Pensemos en la quema de biomasa, la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, el almacenamiento de estiércol, la labranza, la recolecta, el tráfico de vehículos agrícolas y ganaderos, así como la producción industrial de productos destinados a este sector.

La agricultura y la ganadería son uno de los principales focos de NH_3 , con efectos nocivos sobre los ecosistemas (acidificación y eutrofización) y que puede llegar a transformarse en la atmósfera en aerosoles secundarios, en forma de nitrato amónico, NH_4NO_3 , y sulfato amónico, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Estos aerosoles secundarios pueden ser transportados a lo largo de grandes distancias, llegando incluso a afectar significativamente la calidad del aire en las ciudades. Por dar una idea de magnitud, estos aerosoles pueden llegar a constituir el 50% de las partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$) en entornos urbanos y rurales. Además, el sector agrario es, dentro del conjunto de sectores difusos, el segundo en emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente CH_4 y N_2O), por detrás del transporte. En el año 2013, de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones español, habría liberado el 25% del total de las emisiones difusas.

DE LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS A LA EXPOSICIÓN DE LAS POBLACIONES

Cuando un contaminante químico primario se libera desde una fuente fija —tal como una industria— o móvil —como los coches—, se incorpora al medio ambiente como emisión química. La emisión, por tanto, es la cantidad de sustancia contaminante que vierte a la atmósfera una determinada fuente en un periodo de tiempo, expresada en unidad de masa por unidad de tiempo (kg/h, tm/año). Esta emisión no necesariamente causa exposición de la población, dado que los contaminantes, tras ser emitidos a la atmósfera, sufren procesos de transformación, dispersión y transporte. Es decir, una vez que los contaminantes son lanzados al aire desde los focos emisores, la atmósfera induce sobre ellos una compleja serie de efectos que determinan la inmisión, que se define como la concentración del contaminante en la atmósfera, cantidad que suele expresarse en unidad de masa por volumen (ng/m^3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos valores de inmisión indican la calidad del aire y se suelen asumir como exposición de la población, aunque no necesariamente son representativos de las condiciones reales de exposición de la población. Para estar expuesto a un contaminante, no debemos olvidar que tenemos que entrar en contacto con el mismo, lo que se produce porque lo respiremos (inhalación), lo comamos (ingestión) o nos pase por la piel (contacto dérmico).

Las relaciones entre las emisiones de contaminantes y sus niveles de concentración en el aire ambiente son complejas, dado que estas concentraciones son cambiantes en el espacio y el tiempo en función de diversos factores, como las condiciones meteorológicas, la composición química del aire y las características geográficas y topográficas.

Por un lado, los distintos contaminantes se transforman por una serie de reacciones químicas producidas en una

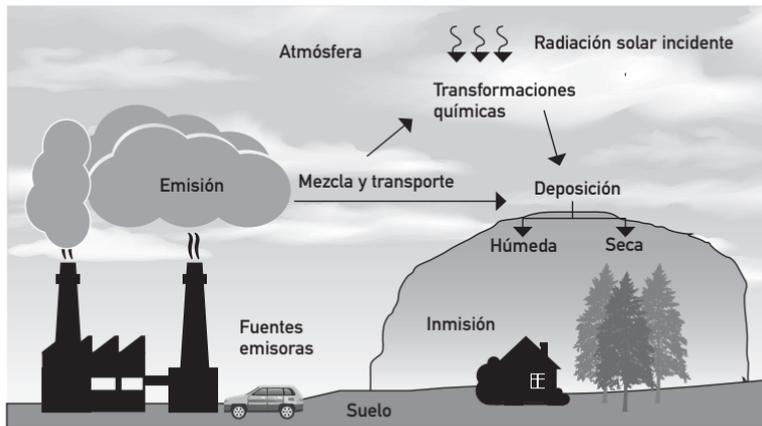
atmósfera oxidante y por mediación de la energía solar. El viento, causado por las diferencias en la presión atmosférica, produce el transporte horizontal (paralelo al suelo) de los contaminantes, dispersándolos rápidamente en el área circundante. La dirección del viento nos señala la zona hacia la que se pueden desplazar los contaminantes. La velocidad del viento influye en la capacidad de dispersión de los contaminantes, es decir, los vientos fuertes aumentan el efecto de barrido, reduciendo la concentración de contaminación a nivel del suelo en la zona afectada por la emisión. La turbulencia, en cambio, tiende a provocar una acumulación de contaminantes.

La temperatura del aire y sus variaciones con la altura (gradiente térmico) determinan los movimientos verticales de las masas de aire y las condiciones de estabilidad o inestabilidad atmosférica. La insolación, que varía con las estaciones, la latitud y la hora del día, influye en este gradiente térmico. Las atmósferas inestables (condiciones ciclónicas o de borrasca) facilitan las corrientes verticales (ascendentes) y la dispersión de contaminantes. La precipitación, además, produce un efecto de lavado sobre la atmósfera al arrastrar parte de los contaminantes al suelo. En cambio, las atmósferas estables (anticiclón) pueden derivar en situaciones de inversión térmica que aumentan los niveles de concentración de contaminantes.

Otros factores que influyen en la dispersión son las características geográficas y topográficas, que pueden producir modificaciones en la velocidad y dirección de los vientos. Una masa de agua o una montaña pueden influir de forma determinante en la dispersión. En las zonas costeras, las brisas marinas desplazan durante el día los contaminantes hacia el interior y durante la noche hacia el mar. Los vientos y nubes pueden ser retenidos por formaciones montañosas pudiendo limitar la dispersión y creando condiciones de inversión térmica. Por otra parte, las masas de aire en los valles se calientan durante el día y se enfrían durante la noche creando complejos y variables vientos locales.

Finalmente, la presencia de vegetación disminuye la cantidad de contaminación en el aire, dado que frena la velocidad del viento y facilita la deposición de contaminantes. Además actúa como sumidero de CO₂, ya que lo atrapa y lo utiliza para realizar la fotosíntesis. Por otra parte, los núcleos urbanos influyen en el movimiento de las masas de aire, por la presencia de edificios (frena la velocidad del viento) o la disposición de las calles (crea turbulencias). Asimismo, se produce el efecto de isla de calor, que supone una temperatura más alta en el interior de la ciudad que en la periferia, como consecuencia del calor generado por las actividades humanas, que dificulta la dispersión de contaminantes.

FIGURA 1
EMISIÓN E INMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS



ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA. UNA MALA NOTICIA
PARA LA CALIDAD DEL AIRE

La dispersión de los contaminantes depende del grado de inestabilidad de la atmósfera. Sabemos que el aire frío pesa más que el caliente. Por esta razón, el aire caliente de la superficie terrestre asciende y el aire de la parte superior de la

atmósfera —más frío— cae, con lo cual se crea una circulación natural que mezcla verticalmente las dos masas de aire y ayuda a la dispersión de los contaminantes atmosféricos superficiales. Una inversión térmica ocurre, sobre todo en invierno, cuando las capas de aire de la atmósfera inferior son más frías que las superiores, lo que detiene la mezcla vertical. La circulación natural se interrumpe y se acumulan los contaminantes del aire alrededor de sus fuentes. Por eso, el aire frío y contaminado, mucho más denso, se puede ver como una neblina compacta sobre la ciudad. Esta nube se queda posada como si fuera una boina sucia, que solo desaparece con alguna variación de temperaturas o con la aparición de un frente de presión que traiga viento o lluvia, pero pueden pasar varios días o incluso semanas hasta que esto ocurra. En conclusión, conviene prestar especial atención a los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos durante los bellos días de invierno soleados y sin viento. Un cielo radiante y una buena visibilidad no son necesariamente signos de un aire limpio.

FIGURA 2

CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA NORMAL EN COMPARACIÓN CON UNA INVERSIÓN TÉRMICA



UN FENÓMENO CON DISTINTAS ESCALAS ESPACIO-TEMPORALES

La contaminación atmosférica actúa a distintas escalas, es decir, provoca desde cambios locales de la calidad del aire, que generan malestar a los habitantes de las grandes ciudades,

hasta procesos globales que afectan a todo el planeta, como el agujero de la capa de ozono estratosférico. Cada escala tiene modos de funcionamiento diferentes.

ESCALA LOCAL

A escala local, son las zonas urbanas las más afectadas debido a que la mayor densidad de población se sitúa en las ciudades. Las fuentes de emisión más importantes en estos entornos son las derivadas de las actividades humanas, como el tráfico y la calefacción. Uno de los principales problemas es el llamado esmog fotoquímico (del inglés *smoke*: humo y *fog*: niebla) o niebla tóxica. Se trata de una niebla amarillenta, la boina, que oscurece la atmósfera de la ciudad y reduce la visibilidad, daña la vegetación y los materiales, además de alterar la salud humana. El proceso de formación de estas nieblas es muy complejo ya que implica centenares de reacciones diferentes sufridas por decenas de compuestos distintos. La luz solar incide sobre los contaminantes primarios (NO_x e hidrocarburos volátiles) y se originan productos oxidantes, como el ozono (O_3), el ácido nítrico (HNO_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el peróxido de nitratoacetilo (PAN) y compuestos orgánicos parcialmente oxidados. El resultado es una atmósfera irritante, nociva y, en algunos casos, tóxica.

El esmog puede formarse en cualquier época del año cuando se produce un largo periodo de altas presiones (anticiclón), lo que provoca un estancamiento del aire y los contaminantes. En verano, se compone en gran parte de ozono y partículas finas, mientras que en invierno son principalmente las partículas lo que lo caracteriza. Un periodo de esmog puede durar horas, días e incluso más de una semana. Su intensidad depende de ciertas condiciones climáticas (radicación solar, temperatura, viento, inversión térmica), la hora del día, la estación y la presencia de fuentes contaminantes.

ESCALA REGIONAL

Los daños causados por los contaminantes atmosféricos no necesariamente ocurren cerca de donde son originados. Los contaminantes emitidos al aire pueden depositarse, en parte, cerca de las fuentes de emisión, pero también pueden ser transportados a gran distancia. A escala regional, este “transporte transfronterizo” de la contaminación puede provocar un impacto a cientos o miles de kilómetros desde sus fuentes, como los centros urbanos e industriales. Cuando alcanza otras zonas urbanas, esta contaminación se suma a la generada de forma local. Los procesos regionales más relevantes relacionados con la contaminación atmosférica son los impactos derivados del incremento de contaminantes secundarios, como el ozono troposférico, el esmog fotoquímico, la eutrofización y la acidificación de los ecosistemas.

EUTROFIZACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS

La contaminación atmosférica afecta a la salud humana y a una amplia gama de ecosistemas. La respuesta de los ecosistemas a un exceso de depósitos de nutrientes en las masas de agua o en el suelo, que también pueden ser de origen atmosférico, se denomina eutrofización. El enriquecimiento de un ecosistema con un exceso de compuestos de nitrógeno y de azufre a un ritmo superior que la eliminación natural puede alterar el equilibrio entre especies y provocar una pérdida de biodiversidad.

El uso más extendido se refiere específicamente al aporte más o menos masivo de nutrientes inorgánicos en un ecosistema acuático, donde puede contribuir a la proliferación de algas. La alta concentración de nutrientes deviene en la producción de un exceso de materia orgánica que requiere alta demanda de oxígeno para su descomposición, hasta hacer desaparecer este último. Las bacterias anaerobias (no necesitan oxígeno para

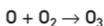
vivir) predominan en ellos y quedan putrefactos debido a la producción del ácido sulfhídrico (H_2S) y metano (CH_4) durante la descomposición de la materia orgánica.

ACIDIFICACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS

Determinados contaminantes atmosféricos se transforman durante el transporte y se depositan en forma de depósito seco o húmedo. SO_2 y NO_x se transforman en sulfatos (SO_4^{2-}) y en nitratos (NO_3^{2-}) cuando la atmósfera es seca, y en ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) si la atmósfera es húmeda. En este último caso, los contaminantes son atrapados por las gotas de agua presentes en el aire originando posteriormente la "lluvia ácida", una precipitación que alcanza un pH entre 3 y 4. Si los depósitos ácidos superan la capacidad de amortiguación de los sistemas ("carga crítica"), entonces pueden ocasionar un efecto perjudicial sobre los materiales, el agua dulce, la vegetación y los ecosistemas forestales. Las nuevas condiciones de vida que supone un medio acidificado pueden favorecer a determinadas especies en detrimento de otras.

MECANISMO DE FORMACIÓN DEL OZONO TROPOSFÉRICO

El ozono (O_3) es un contaminante secundario que se genera por reacciones fotoquímicas entre diferentes contaminantes precursores como los NO_x y los COV. El NO_2 se descompone por acción de la radiación solar ultravioleta ($h\nu$) en NO y un átomo de oxígeno (1). Posteriormente el átomo de oxígeno reacciona con oxígeno molecular para formar ozono (2). En un medio saturado en NO_x , por ejemplo cerca de vías de circulación importantes, el NO reacciona con el O_3 y se convierte en NO_2 (3).



Esto provoca una disminución de concentración de ozono en el medio, lo que explica que en zonas urbanas las concentraciones de ozono sean más bajas que en

zonas rurales. En ambientes urbanos, cuando las emisiones de NO_x disminuyen (por ejemplo, ante una bajada de emisiones del tráfico, como suele pasar el domingo), las concentraciones de ozono aumentan dado que hay menos NO disponible en el aire para reaccionar con el ozono.

El transporte atmosférico a gran distancia, determinado por diferentes procesos meteorológicos y químicos puede hacer aumentar las concentraciones de O_3 en el medio rural situado a cientos de kilómetros de los puntos de emisión de los precursores. Ese fenómeno explica el hecho de que la concentración de este contaminante sea más elevada en medio rural, donde las emisiones de los precursores de este contaminante son más bajas.

┌

┐

ESCALA GLOBAL

El aire se mueve alrededor del planeta, y con él también los contaminantes que contiene. La contaminación atmosférica es capaz de inducir cambios en la composición de la atmósfera a escala global, provocando problemas ambientales que afectan a todo el mundo y que requieren complicadas consideraciones científicas y técnicas. El cambio climático producido por el efecto invernadero y el agujero de la capa de ozono estratosférico se pusieron en evidencia por los investigadores en los años ochenta, alertando de los peligros que representan para la salud y para el medio ambiente.

CAMBIO CLIMÁTICO

Como sabemos, dentro de un invernadero la temperatura es más alta que en el exterior porque entra más energía de la que sale. En el conjunto de la Tierra se produce un efecto natural similar de retención del calor gracias a los llamados gases de efecto invernadero. Estos gases y los aerosoles afectan al clima al alterar la radiación solar entrante y la saliente, que forman parte del equilibrio energético de la Tierra.

El hombre genera un aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero: CO_2 , CH_4 , N_2O y los halocarbonos (grupo de gases que contienen, además de carbono, flúor, cloro y bromo). Se suma también el vapor de agua, pero el hombre tiene solo una pequeña influencia directa respecto de la cantidad presente en la atmósfera. La mayor contribución conocida proviene de la combustión de combustibles fósiles, que libera además CO_2 a la atmósfera. Estos gases se acumulan en la atmósfera, provocando un incremento de sus concentraciones con el paso del tiempo y el calentamiento global. Como consecuencia, se produce un gran cambio en el clima del planeta, que deriva en múltiples efectos como el deshielo de los polos y el aumento del nivel del mar, cambios en los patrones estacionales y de las precipitaciones, pérdida de diversidad y cambios de distribución de especies, o aumento de los periodos de sequía y la desertización. Por todo esto es importante lograr frenar las emisiones de estos gases con el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media mundial.

El cambio climático podría afectar también a las condiciones locales. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (organismo internacional creado para evaluar el cambio climático) prevé un descenso de la calidad del aire en las ciudades en el futuro debido al cambio climático. Se espera un aumento de la frecuencia de las olas de calor y de episodios de aire estancado, la boina de la que hablábamos, o de excesivo ozono troposférico.

DESTRUCCIÓN DE LA CAPA DE OZONO ESTRATOSFÉRICO

La estratosfera es la capa de la atmósfera que se encuentra a unos 10-50 km de la superficie terrestre. Su alteración también influye en la salud global del planeta. El agotamiento de la capa de ozono se refiere a la destrucción química acelerada de la capa de ozono estratosférico por la presencia de sustancias

producidas por actividades humanas, lo que conlleva un aumento de la radiación ultravioleta a nivel de la superficie terrestre. Entre esas sustancias que actúan sobre el ozono estratosférico, que además son gases de efecto invernadero, se encuentran los clorofluorocarbonos (CFC) y otros halocarbonos. Las condiciones meteorológicas especiales de la Antártida motivan que estos gases sean más eficaces en ese lugar, en cuanto a agotar la capa de ozono, que en otras partes. Estos productos se usaban en la limpieza en seco, en la refrigeración y en los aerosoles, tales como desodorantes y lacas para el pelo.

Las pruebas científicas que relacionaron estos compuestos con el agotamiento del ozono estratosférico dieron lugar al acuerdo de eliminación progresiva y al control mediante el Protocolo de Montreal, de 1987, y a las enmiendas y modificaciones de los años noventa. Sin embargo, algunas de las medidas destinadas a reducir el futuro agotamiento de la capa de ozono, en particular la introducción de los gases fluorados (hidrofluorocarbonos —HFC— y perfluorocarbonos —PFC—), podrían afectar al calentamiento global, lo que muestra que no siempre es fácil encontrar un buen sustituto de un compuesto químico. Actualmente, parece que ya no existe la tendencia de destrucción de la capa de ozono observada entre los años ochenta y noventa. Además, un estudio científico publicado recientemente en la revista científica *Science* ha mostrado que la capa de ozono puede estar recuperándose gracias a la prohibición de los CFC. Todo parece indicar que el agujero antártico se habría reducido en unos 4 millones de km².

Aunque no los veamos, existen muchos contaminantes atmosféricos químicos con distintas repercusiones en la atmósfera y en la salud humana. Al día inhalamos unos 8.000 litros de aire (o más en condiciones de trabajo físico fuerte —unos 10.000 litros—) y con ellos un cóctel de agentes nocivos en forma de gases, vapores y partículas en suspensión. De hecho, solo un número limitado de sustancias puede ser controlado mediante una vigilancia sistemática y, en general, se trata de los contaminantes regulados normativamente, como es el caso de las partículas, óxidos de nitrógeno y azufre, ozono o el monóxido de carbono. Estos se utilizan como indicadores de la calidad del aire. Vale la pena examinar más de cerca los principales contaminantes.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Este contaminante habitualmente se abrevia como PM porque en inglés se denominan *particulate matter* (literalmente,

“partículas materiales”). Todos hemos contemplado alguna vez grandes emisiones de partículas a la atmósfera, como nubes de polvo o neblinas. Un ejemplo es el humo oscuro que se observa en los incendios o en los tubos de escape de vehículos motorizados. También en las erupciones volcánicas o en la realización de obras, como la demolición controlada de un edificio. Ya podemos imaginarnos que son ubicuas, es decir, se encuentran en todas partes, tanto en el aire de zonas urbanas como rurales. Su presencia en la atmósfera, así como su posterior deposición, pueden generar efectos en el clima, en los ecosistemas y en los seres vivos.

A diferencia de otros contaminantes atmosféricos, las PM no constituyen una entidad química definida, sino que engloban una mezcla heterogénea y compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas, donde cada elemento se caracteriza por un estado (líquido o sólido), granulometría o tamaño, composición química y dinámica de evolución en la atmósfera. Su diversidad también está condicionada por su origen (natural o antropogénico), su formación (primario y secundario) y su naturaleza (fisicoquímica o biológica). Por este motivo, la composición física y química de las PM varía ampliamente en el espacio y en el tiempo. Así, mientras que las partículas de regiones costeras están principalmente compuestas de cloruro de sodio procedente de la sal del mar, las que provienen de fuentes móviles que usan gasolina son una mezcla de carbono elemental¹, carbono orgánico², trazas de metales y sulfatos.

Las PM primarias, aquellas que se emiten directamente a la atmósfera, se originan de forma natural (partículas salinas marinas, polvo, polen, hongos, etc.) o por la actividad humana

1. El *carbono elemental* suele ser emitido directamente a la atmósfera por procesos de combustión incompleta de combustibles fósiles (gas, carbón y/o fueloil). Su origen es esencialmente antropogénico.

2. El *carbono orgánico* presente en las partículas puede ser emitido directamente a la atmósfera o formarse por condensación de compuestos orgánicos volátiles. La fuente puede ser natural o antropogénica.

(tráfico rodado, procesos de combustión industrial, calefacción, construcción o demolición). Por otra parte, las PM secundarias son las que se forman por reacciones químicas en la atmósfera a partir de gases precursores y representa entre el 40 y el 70% de la masa. Si intervienen precursores inorgánicos (SO_2 , NO_x , NH_3), se originan los sulfatos y nitratos amónicos, que generalmente constituyen el 30-40% de las partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$). Por otra parte, las PM son capaces de adsorber precursores orgánicos como los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, que pueden ser naturales (es el caso de los isoprenos de bosques caducifolios o los terpenos de los de coníferas), o antropogénicos (tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos o hidrocarburos clorinados o brominados, incluyendo las dioxinas).

La dificultad que entraña definir las PM de acuerdo a su identidad química condiciona que hayan sido clasificadas por sus propiedades aerodinámicas, que son resumidas por su diámetro. Esto se fundamenta, en parte, en que con independencia de la composición química y otras propiedades de la partícula, su tamaño determina cómo se comporta en la atmósfera y su capacidad de penetración y difusión en los sistemas respiratorio y circulatorio.

Las partículas de mayor tamaño, como el polvo que se levanta del suelo o es erosionado de las rocas, viajan a distancias menores y generalmente son capturadas en las vías altas respiratorias (región extratorácica). Las partículas más grandes suelen ser insolubles y tienen un importante componente de tipo natural, siendo contaminantes básicamente primarios que se generan por procesos mecánicos o de evaporación. Las intrusiones saharianas provocan un aumento de estas partículas en España, que proceden del desierto del Sáhara.

Por otro lado, las partículas extremadamente pequeñas, como son las emitidas por los vehículos diésel o los aviones, son más tóxicas, ya que su principal origen es antropogénico y

son fundamentalmente contaminantes secundarios. Pueden viajar miles de kilómetros y permanecer en suspensión en el aire durante semanas o meses. Al ser inhaladas pueden penetrar hasta las zonas más profundas del pulmón (región traqueo-bronquial y alveolar) e incluso alcanzar el torrente sanguíneo, donde son transportadas hacia otros órganos.

No existe evidencia de un nivel seguro de exposición o un umbral de concentración por debajo del cual no ocurran efectos adversos para la salud. En términos de calidad del aire y salud se definen cuatro parámetros fundamentales según el tamaño del diámetro: TSP, PM_{10} , $PM_{2,5}$ y $PM_{0,1}$. Inicialmente se utilizaron como indicador las TSP —del inglés *total suspended particles*—, que se refiere a las partículas totales en suspensión y con diámetro menor de $100\ \mu\text{m}$. Posteriormente, la investigación se centró sobre la fracción inhalable por el sistema respiratorio, partículas torácicas menores de $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}). La fracción gruesa la componen las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra entre $2,5$ y $10\ \mu\text{m}$ ($PM_{2,5-10}$). Actualmente la atención se centra prioritariamente en la fracción respirable o partículas finas menores de $2,5\ \mu\text{m}$ ($PM_{2,5}$). Este es el indicador recomendado por la OMS para cuantificar la exposición humana a las partículas y los consiguientes efectos en la salud, así como para predecir los beneficios de las medidas de reducción de dicha exposición. Finalmente, las ultrafinas se refieren a las partículas menores a $0,1\ \mu\text{m}$ de diámetro ($PM_{0,1}$ o UFP).

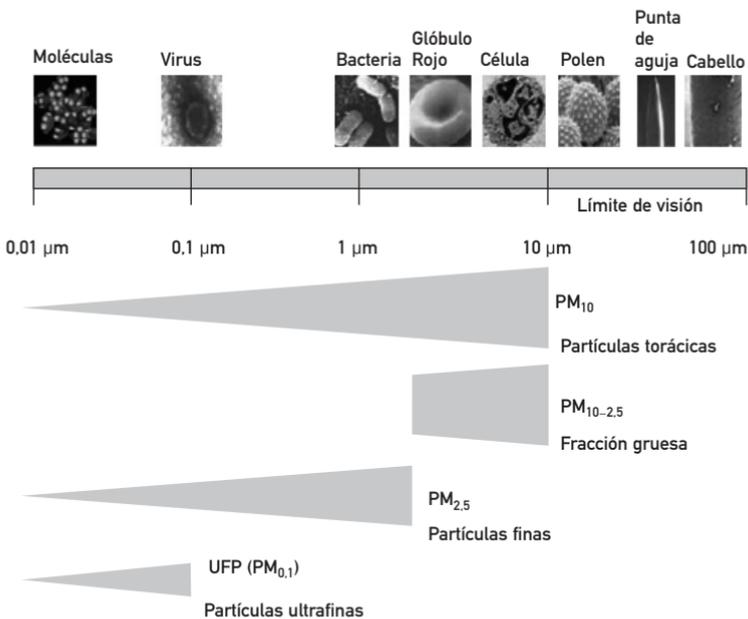
En España se ha observado una bajada en las emisiones de partículas entre los años 2000 y 2012, debido a sectores como el transporte. Sin embargo, tal tendencia no es tan evidente ni para la agricultura (PM_{10}) ni para otros sectores que implican procesos de combustión (PM_{10} y $PM_{2,5}$), cuyas emisiones se mantienen sin variación o incluso suben ligeramente en el periodo considerado.

Las partículas incrementan sus niveles de concentración en primavera y verano, con un máximo relativo en marzo. Esto

se debe a que suceden con mayor frecuencia las intrusiones saharianas, así como episodios de estancamiento atmosférico y de contaminación regional (por ejemplo, los originados por la labranza de los campos). Además, las partículas secundarias se forman más rápidamente durante estas estaciones por la mayor radiación solar.

FIGURA 3

CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (PM)
DE ACUERDO CON SU DIÁMETRO



Fuente: Adaptado de R. Brook *et al.* (2004): "Air Pollution and Cardiovascular Disease", *Circulation*, 109, pp. 2655-2671, doi: 10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8. Disponible en: <http://circ.ahajournals.org/content/109/21/2655.full.pdf+html>

Las partículas proporcionan el sitio para que diferentes sustancias presentes en la atmósfera viajen con ellas. Entre estas se encuentran los metales y metaloides, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), así como las dioxinas y los furanos.

En cuanto a los metales, son constituyentes de la corteza terrestre que se utilizan ampliamente en infinidad de procesos industriales por sus propiedades metálicas. No arden ni explotan, pero su presencia es motivo de preocupación por su toxicidad, especialmente si se encuentran en concentraciones elevadas. Esencialmente importantes por su papel biológico o tóxico, son los denominados "metales pesados", entre los que se encuentran: el cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cobre (Cu), manganeso (Mn), níquel (Ni), zinc (Zn) y plata (Ag). Los que tienen una función biológica son precisos en pequeñas cantidades (oligoelementos) para mantener una buena salud, aunque pueden convertirse en peligrosos si se superan determinadas dosis. Otros no tienen un efecto beneficioso para los organismos, son tóxicos y se acumulan con el tiempo en el cuerpo pudiendo llegar a causar enfermedades. De este modo, se han constatado que algunos metales (As, Cd, Cr y Ni) tienen efectos cancerígenos, el Pb afecta a los órganos y al sistema nervioso, en particular menoscabando el desarrollo intelectual de los niños, el Hg provoca daños en el cerebro, en el corazón y en el riñón, así como en el desarrollo fetal.

El origen natural de los metales supone que puedan ser emitidos en grandes cantidades durante fenómenos tales como las erupciones volcánicas, tormentas de polvo, incendios forestales, alteración de rocas y suelos. Otras emisiones se derivan de la actividad industrial, como las metalúrgicas, cementeras, incineradoras de residuos, minería y fundición de minerales, entre otras. La combustión de los combustibles sólidos y líquidos genera cantidades considerables de cenizas que pueden contener también metales.

Por otra parte, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son un grupo de compuestos químicos formados por C e H, cuya estructura base es un ciclo aromático tipo bencénico. La condensación de estos anillos por las aristas (ejemplo, criseno) o por puentes de átomos de C (ejemplo, fluoreno) les

confiere el carácter de policíclicos. Están presentes en el aire como vapores o se encuentran adheridos a las superficies de pequeñas partículas sólidas. Los de bajo peso molecular (menos de cuatro anillos) son solubles en agua con una baja afinidad para ser adsorbidos en partículas, mientras que los más pesados son, generalmente, insolubles en agua y tienen una afinidad muy fuerte para adsorberse en las superficies de las PM. Son una compleja mezcla de sustancias químicas que se forman durante los procesos de combustión incompleta del carbón, del petróleo y sus derivados, del gas, de la madera, de la basura y otras sustancias orgánicas, como el tabaco o la carne asada en las barbacoas. Llegan al aire por las emisiones de volcanes, incendios forestales, quemas de biomasa y gases de los tubos de escape de vehículos. Aunque existen más de cien clases diferentes de HAP, se suelen señalar como prioritarios los siguientes por sus efectos nocivos: acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo[a]antraceno, benzo[a]pireno, benzo[e]pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[g,h,i]perileno, benzo[j]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, criseno, dibenzo[a,h]antraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno[1,2,3-c,d]pireno, fenantreno y pireno.

De entre todos ellos, se emplea como indicador el benzo[a]pireno (B(a)P), un contaminante cuya exposición puede producirse por ingestión o por inhalación. Probablemente ya nos suene por las barbacoas de carne asada que, a priori, son una actividad natural, sana y divertida. Sin embargo, las gotas de grasa que caen sobre las brasas se queman y expelen B(a)P, un cancerígeno reconocido que no existía previamente en la materia prima, que asciende con el humo y se adhiere a la carne.

El B(a)P se origina principalmente como consecuencia de las actividades agropecuarias, sobre todo por combustión de compuestos orgánicos como pueden ser los restos vegetales. Esto ocurre, por ejemplo, durante la quema de rastrojos de parcelas agrícolas o de residuos de poda, una actividad que está limitada en España, pero que se realiza habitualmente con

escaso control, salvo la expresa prohibición durante la época de elevado peligro de incendio forestal. Los contaminantes generados por este tipo de quemas se producen en forma de partículas (aerosoles carbonosos, azúcares, HAP, carbono elemental, de granulometría fina) y de gases (COV, CO, CO₂, SO₂, NO_x), pudiendo ser transportados a largas distancias, de hasta un radio de 50 km.

También estamos emitiendo este contaminante si encendemos la chimenea en casa para pasar una tarde bucólica de invierno. Otra contribución importante se realiza en los procesos industriales con combustión, tanto de combustibles fósiles como no fósiles (acerías, altos hornos, valorización de residuos). Los mayores niveles se producen durante los meses invernales, lo que suele asociarse a las calefacciones, en especial a combustiones incompletas.

En España, hasta ahora, no se superaba el valor objetivo legislado para la protección de la salud humana y el medio ambiente. No obstante, este es uno de los contaminantes emergentes de los que seguro que hablaremos mucho más en el futuro. El uso de la biomasa como fuente de energía genera este contaminante junto a las PM. Su empleo de forma masiva en grandes ciudades preocupa en los foros científicos internacionales por los potenciales efectos que ocasiona en la salud. El benzo(a)pireno y otros HAP son conocidos por sus efectos cancerígenos, cardiovasculares, neurotóxicos, genotóxicos e inmunotóxicos. También tiene la capacidad de atravesar la placenta, donde es potencialmente tóxico para el feto.

Por último, las dioxinas y los furanos también se adsorben a la superficie de las partículas para viajar con ellas. Son compuestos químicos organoclorados, que cuentan con un anillo de carbono y átomos de cloro en su composición, con diferentes grados de cloración. Se estudian principalmente dos grupos: los policlorodibenceno-p-dioxinas (PCDD, dioxinas) y los policlorodibenzofuranos (PCDF, furanos). Se caracterizan por

ser muy estables químicamente y térmicamente (hasta 750 °C) y poco biodegradables, es decir, son persistentes en el medio. Además, son bioacumulables al ser liposolubles. Esto quiere decir que se disuelven con facilidad en las grasas, por lo que pueden acumularse en los tejidos vivos y transferirse a lo largo de las cadenas tróficas (por ejemplo, cuando los depredadores se comen a sus presas ingieren la dosis que hubiera absorbido el otro animal a lo largo de su vida y lo acumula en sus propios tejidos). Estos compuestos son altamente tóxicos y pueden causar daños en la reproducción, en el desarrollo y en el sistema inmunológico, interferir con el sistema hormonal o provocar cáncer.

¿Recuerdan el "agente naranja"? Este es uno de los ejemplos históricos más trágicos de la guerra química (¿cuál no?), un agente utilizado durante la Guerra de Vietnam (1961-1971) por los militares estadounidenses para defoliar la selva vietnamita. Este —maldito— agente era una mezcla de dos herbicidas, que tras su uso se descubrió que estaba contaminado con una dioxina extremadamente tóxica, la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD), una de las más letales que se conocen. Como la historia a veces se repite, el conocido desastre de Seveso (Italia), ocurrido en 1976, tuvo la misma protagonista. En este caso fue un desgraciado siniestro industrial que liberó una nube tóxica que, entre otras sustancias, contenía la dioxina TCDD. Las consecuencias de estos desastres, no solo en la salud, fueron muy importantes: bebés nacidos con deformidades, enfermos de cloroacné, desarrollo de leucemias, miles de animales muertos o sacrificados y terrenos contaminados, entre otros. La magnitud de este último dramático hecho fue de tal envergadura que, en 1982, se acordaron en Europa nuevas reglas de seguridad para industrias que utilizaran sustancias peligrosas. Este fue el origen de la "Directiva Seveso" (Directiva 82/50/ECC).

La presencia en el medio de dioxinas y furanos no se debe a su utilización directa, sino que se forman durante el proceso

de fabricación en la industria química (pesticidas, herbicidas, conservantes, o desinfectantes, entre otros) o de la producción de papel (por blanqueado mediante cloro) y la depuración de aguas (contenidos en los lodos). También son productos formados en procesos de incineración de basuras y de otros residuos sólidos, tales como medicamentos o restos biológicos, así como de la combustión del carbón, la madera, productos petrolíferos y neumáticos usados. Una vez liberados a la atmósfera son partículas minúsculas, que se depositan eventualmente sobre el suelo y la vegetación, pudiendo así entrar en la cadena alimenticia.

GASES

A diferencia de lo que ocurre con las partículas, la concentración de los contaminantes atmosféricos gaseosos varía mucho en el espacio, por lo que se complica todavía más el estudio de los efectos en la salud. Entre los gases, se pueden citar los compuestos de nitrógeno (NH_3 , NO y NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O_3) o los compuestos orgánicos volátiles (COV).

ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO Y NO_2)

NO_x es el término genérico que designa un grupo de gases altamente reactivos, que contienen nitrógeno y oxígeno en proporciones variables. El monóxido de nitrógeno (NO) se oxida rápidamente dando el dióxido de nitrógeno (NO_2), que es la principal forma química con efectos adversos en la salud. Se generan en una gran variedad de procesos naturales y antropogénicos. Entre las fuentes naturales se encuentran: la actividad de los microorganismos del suelo, las emisiones volcánicas, la combustión vegetal (incendios forestales y quema de rastrojos)

o las tormentas, donde la energía generada por las descargas eléctricas logra que el oxígeno y el nitrógeno del aire se combinen para formar los NO_x . La formación antropogénica se debe a la oxidación que sufre el nitrógeno atmosférico (N_2) a altas temperaturas. Se emiten principalmente en los procesos de combustión de los vehículos, en especial por los motores diésel, así como en procesos industriales de alta temperatura y de producción de energía. En ambiente urbano, se estima que más del 75% del NO_2 en aire ambiente se debe al tráfico rodado.

Los NO_x contribuyen a la formación de partículas secundarias con el nitrato. Por otra parte, influyen en la formación del esmoque fotoquímico, por ejemplo al reaccionar con los COV. Asimismo, son precursores de la formación de ozono troposférico y del ácido nítrico en los procesos de acidificación. Por si esto fuera poco, las emisiones de estos gases tienen un impacto directo en la calidad del aire urbano y, por tanto, en la salud de sus habitantes. Los estudios realizados sobre poblaciones humanas indican que la exposición al NO_2 , a los niveles que actualmente se registran en Europa, puede provocar irritación de ojos, nariz y garganta, disminución de la función pulmonar y aumento del riesgo de aparición de síntomas respiratorios, especialmente entre los que padecen EPOC o bronquitis.

Este contaminante atmosférico sigue unos ciclos diarios y anuales. Durante los días laborables se producen dos máximos de concentración: a primera hora de la mañana y a partir de las seis de la tarde. Estos momentos coinciden con los desplazamientos para la realización de actividades cotidianas de la población, como la asistencia al trabajo o la vuelta al domicilio. En días festivos, los máximos se registran por la tarde-noche, aunque las concentraciones alcanzadas son inferiores que entre semana. En cuanto al patrón de distribución anual, los mínimos en ciudades del interior de la Península se registran en agosto, coincidiendo con el periodo estival de la población urbana, y los valores más altos en invierno. Por el contrario, en

las ciudades de costa, los mayores niveles se producen en verano motivado por el aumento de desplazamientos en esta época.

En España, en los últimos años se ha producido una disminución de las emisiones de estos contaminantes, debido a la aplicación de los planes de mejora de la calidad del aire y al efecto de la crisis económica. No obstante, las grandes ciudades españolas con mayor densidad de tráfico todavía registran superaciones de los valores límites regulados para la protección de la salud. En el caso de Madrid, en 2015, trece estaciones de la red de vigilancia municipal de calidad del aire registraron concentraciones medias anuales superiores al valor límite establecido por la normativa ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y, en ocho de estas estaciones, se superó en más de 18 ocasiones (máximo permitido) el valor límite horario de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación ha llevado a que la Junta de Gobierno del Ayuntamiento de Madrid haya aprobado, al inicio de 2016, un nuevo Protocolo para Episodios de Alta Contaminación por NO_2 .

AMONÍACO (NH_3)

Conocemos bien este gas por su característico olor repulsivo. Además, es altamente reactivo y tiene efectos nocivos sobre los ecosistemas (acidificación y eutrofización). Las emisiones totales de amoníaco a la atmósfera se duplicaron mundialmente entre 1860 y 1993, estimándose que puedan volver a duplicarse antes de 2050. En España, las emisiones se incrementaron en un 13% entre los años 1990 y 2008.

Según el Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera, más del 90% de las emisiones de este gas se debe a las actividades agropecuarias, fundamentalmente por la aplicación y almacenamiento de fertilizantes nitrogenados, así como por el almacenamiento de estiércoles líquidos o sólidos en granjas. Estas emisiones son especialmente relevantes para la calidad del aire debido a las toneladas generadas al año y al

alcance de la contaminación producida. El NH_3 reacciona en la atmósfera y favorece la generación de partículas secundarias (nitrato y sulfato amónico). Estos contaminantes secundarios son muy estables y se mantienen un elevado tiempo en la atmósfera, con lo que pueden alcanzar fácilmente ciudades que se encuentren alejadas, incluso a más de 100 km, de los focos de emisión (áreas rurales).

Por otra parte, las emisiones del tratamiento y eliminación de residuos, y las procedentes de determinados procesos industriales sin combustión también pueden ser puntualmente importantes. Con todo, la contribución del resto de fuentes distintas de las agropecuarias no llega a superar el 10% del total.

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

El azufre es un componente natural presente en materias brutas como el petróleo, el carbón o minerales de metales comunes, como el aluminio, el cobre, el zinc, el plomo o el hierro. El origen del SO_2 es principalmente antropogénico y se forma por la combustión de carburantes fósiles, sobre todo en procesos industriales desarrollados con alta temperatura y de generación de electricidad. Especialmente importantes son el carbón y el fueloil, dado que contienen más azufre que el gas natural, la gasolina o el diésel. Por otra parte, las erupciones volcánicas y las emisiones procedentes de los océanos son sus fuentes naturales más importantes.

Este compuesto, de olor penetrante e irritante, es capaz de reaccionar con el vapor de agua y con otros elementos presentes en la atmósfera. Eso lleva a la formación de ácido sulfúrico, con marcado carácter corrosivo cuando cae en forma de lluvia ácida incluso a grandes distancias del foco emisor. Por otra parte, actúa como precursor de la formación de sulfato amónico, incrementando, de esta manera, los niveles de partículas secundarias (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$).

Los valores más elevados de este contaminante se observan diariamente a medio día, sin cambios en días festivos, y anualmente en los meses de invierno. Los motivos son la actividad industrial, como centrales térmicas y refinерías, las calefacciones que utilizan combustibles de azufre o bien las condiciones menos favorables de dispersión de contaminación que predominan en otoño e invierno.

En los últimos años, en España no se han producido prácticamente superaciones de los valores regulados por las leyes. La puesta en marcha de tecnologías de desulfuración de combustibles es uno de los motivos que ha ocasionado un descenso acusado de emisiones de SO_2 desde el 2008, fecha en la que entró en vigor el Plan Nacional de Reducción de Emisiones de Grandes Instalaciones de Combustión. Además, se han sustituido calderas de calefacción que funcionaban con carbón, lo que también ha reducido su presencia en las ciudades. Los estudios científicos han mostrado que los beneficios ambientales y en la salud humana asociados a la reducción de azufre rebasan con mucho los costes de la inversión requerida en refinación.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Este gas es incoloro, insípido y muy inflamable, resultado de la combinación de un átomo de carbono con otro de oxígeno. Se origina por la combustión defectuosa o incompleta de productos que contienen carbono, como los combustibles fósiles o la biomasa, realizada en condiciones de falta de oxígeno. Se forma naturalmente por la oxidación del metano (CH_4), que procede de la descomposición de la materia orgánica, en incendios forestales y en tormentas eléctricas.

De este contaminante seguro que alguna vez hemos tenido noticia por algún accidente grave debido a un calentador o una calefacción doméstica mal reglada. Es muy peligroso porque no huele y no es irritante, por lo que su presencia puede pasar

completamente desapercibida. Sin embargo, es muy tóxico por su carácter asfixiante, llegando a ocasionar incluso la trágica muerte de personas. Presenta gran afinidad por la hemoglobina, que se encarga de transportar el oxígeno en los glóbulos rojos de la sangre. Al desplazar la molécula de O_2 de la hemoglobina y unirse a la de CO, la hemoglobina deja de llevar a cabo su función esencial de llevar oxígeno a todas nuestras células, y acabamos asfixiados. A su vez el CO abandona la hemoglobina de manera muy lenta, evitando que la pueda ocupar de nuevo el oxígeno.

Dada la peligrosidad del CO es importante realizar un correcto mantenimiento de los equipos de combustión, ventilando los espacios cerrados con frecuencia siempre que se sospeche de la presencia elevada de este contaminante. Afortunadamente, su presencia se ha reducido de manera continua en los últimos años, debido fundamentalmente a los cambios tecnológicos en los vehículos de motor que son los principales emisores de este contaminante primario. La industria metalúrgica o la fabricación de papel también emiten cantidades importantes de CO.

Debido a que el tráfico rodado constituye una de las principales fuentes de emisión de CO, las zonas de las ciudades con muchos vehículos circulantes muestran mayores concentraciones ambientales de dicho gas. En tales zonas, la concentración de CO sigue un ciclo diario regular, claramente relacionado con las actividades humanas. Las concentraciones en días laborales son mayores que las registradas en los fines de semana. En cuanto a la variación anual, los valores más bajos de CO se registran en verano, cuando disminuye la densidad del tráfico.

OZONO TROPOSFÉRICO (O_3)

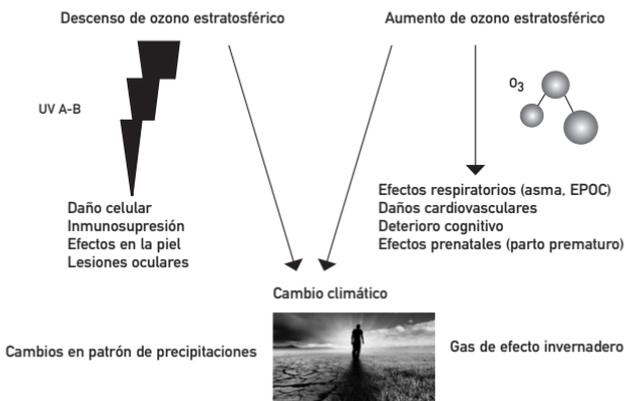
Es un gas incoloro compuesto de tres átomos de oxígeno. Este contaminante secundario es algo así como el extraño caso del doctor Jekyll y el señor Hyde, siendo "bueno" si se encuentra

en la estratosfera (filtro para la radiación ultravioleta) y "malo" si se forma en la troposfera (agente oxidante muy reactivo).

DOBLE PAPEL DEL OZONO EN RELACIÓN CON LA SALUD: O₃ TROPOSFÉRICO Y ESTRATOSFÉRICO

El ozono troposférico se encuentra en la parte inferior de la atmósfera (troposfera), donde es un contaminante secundario que actúa como un potente y agresivo agente oxidante. El ozono estratosférico, o "capa de ozono", se encuentra en torno a 20 km de altura, en la estratosfera. Forma un delgado escudo que rodea nuestro planeta y que lo protege al filtrar los rayos ultravioletas (UV-A y UV-B) del sol.

Lo que preocupa desde el punto de vista de la salud es, por un lado, el aumento del ozono troposférico por sus efectos directos en la salud. Por otro lado, los efectos derivados del descenso del ozono estratosférico están relacionados con una mayor entrada de rayos ultravioletas. Ambos se relacionan con el cambio climático, pero de distinta forma. Mientras que el O₃ estratosférico está implicado en cambios en el patrón de precipitaciones, el O₃ troposférico es un gas de efecto invernadero.



La velocidad y el grado de formación de O₃ se ven muy incrementados con el aumento de la radiación solar, las emisiones antropogénicas de precursores (NO_x y COV) y el ciclo

biológico de emisiones de COV de determinadas especies. Por ello, sus niveles de concentración son más elevados en el sur de Europa y en las horas centrales del día de la primavera-verano. Esta época es más favorable para su formación y el impacto suele registrarse en zonas rurales y de fondo regional circundantes a los focos emisores de los precursores. En cambio, los mínimos de concentración se observan en las madrugadas del invierno.

Teniendo en cuenta el patrón semanal, los niveles de concentración de O_3 más elevados se registran los fines de semana, principalmente el domingo, motivado por la disminución de precursores que se registra en tales días (sobre todo NO_x). Los valores de concentración registrados son menores en las zonas urbanas, como consecuencia de la mayor presencia de óxidos de nitrógeno que reaccionan con el O_3 y disminuyen sus niveles.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV)

Son compuestos orgánicos que se encuentran, a temperatura ambiente, en estado gaseoso o son líquidos muy volátiles. Son precursores del ozono troposférico. El olor de los repelentes de las polillas, de las pinturas, de la laca o de las plantas mediterráneas se debe a este tipo de compuestos. Su origen puede ser tanto natural, emisiones derivadas de la actividad de los seres vivos, como antropogénico, procedente de actividades que supongan el manejo de combustibles derivados del petróleo, de actividades industriales o el transporte. Es un grupo de más de 1.000 sustancias, entre las que se encuentran el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno, conocidos en su conjunto como BTEX, y el metano.

BTEX: BENCENO, TOLUENO, ETILBENCENO, XILENO

Los BTEX se liberan a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles, por evaporación en las gasolineras, durante el llenado del tanque de almacenamiento, vertidos accidentales y

por el uso de disolventes. La fuente más común de BTEX en el aire ambiente de las ciudades es el tráfico, por la combustión de la gasolina y el gasóleo. En ambientes interiores, estos compuestos pueden volatilizarse a partir de numerosos productos, incluyendo productos de limpieza o para tratamientos de material textil y cuero.

A temperatura ambiente suelen ser líquidos incoloros. Son disolventes típicos empleados en la industria química orgánica. Se utilizan para la fabricación de plásticos, resinas, nilón, fibras sintéticas, lubricantes, pinturas, barnices, pegamentos, detergentes, medicamentos y plaguicidas. También son componentes naturales del petróleo crudo, de la gasolina, el humo del cigarrillo y otros materiales orgánicos que han sufrido un proceso de combustión incompleta o se han evaporado. Los volcanes, los yacimientos de combustibles fósiles y los incendios forestales constituyen sus fuentes naturales.

A pesar de su aroma dulce, que invita a olerlos e inhalarlos, deben manejarse con sumo cuidado debido a sus potenciales efectos en la salud. El tolueno, el etilbenceno y el xileno producen efectos nocivos sobre el sistema nervioso central. La población residente cerca de gasolineras o con mucho tráfico está más expuesta al benceno, que destaca por sus efectos cancerígenos (leucemia). Este contaminante presenta máximos invernales (diciembre-enero) que resultan más altos en las estaciones urbanas, posiblemente asociados al tráfico (¡otra vez el coche!) y a los sistemas de calefacción, que constituyen las principales fuentes de emisión de este contaminante en las ciudades.

METANO (CH_4)

Es un gas de efecto invernadero, cuyo origen natural es la descomposición bacteriana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (condiciones anaeróbicas). No obstante, la actividad humana es la que crea la mayor fuente de emisión de metano.

Está presente en los combustibles fósiles, por ejemplo, el gas grisú —responsable de las explosiones en las minas de carbón— está compuesto principalmente de metano. Por otra parte, la basura nueva se apila en los vertederos sobre la que ya estaba y la materia orgánica situada por debajo se acaba descomponiendo sin oxígeno, originando metano.

Finalmente, las explotaciones agropecuarias son las actividades humanas que más metano producen, más del 80% de las emisiones de este gas. Pensemos en los campos inundados de cultivo de arroz, donde la materia orgánica se degrada sin oxígeno, o en los animales rumiantes (vacas, ovejas y cabras), que generan metano durante su proceso natural de digestión o cuando se produce la fermentación anaeróbica del estiércol. Por si todavía no hemos caído en la cuenta, esta es una de las razones que explica que la cantidad de carne que comemos tenga una influencia directa sobre el calentamiento global. Lo que no se ve en el plato son las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de carne y de las cadenas de suministro ganaderas a nivel mundial, a las que se suman las derivadas del uso de combustibles fósiles, como ocurre durante el procesamiento, el transporte para el comercio o la eliminación de desechos. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, las emisiones de gases de efecto invernadero —expresadas como equivalentes de CO₂ por kg de alimento— relacionadas con la producción de un kilo de carne varían sustancialmente, para la carne roja, desde 50 para el cordero, 30 para la ternera, 10 para el cerdo, y 4 para la carne blanca, como el pollo o el pavo. Los cambios en la cantidad de carne que se demanda pueden influir en el impacto ambiental de su producción si modifican cuánta debe suministrarse. Piense por un instante si realmente no podría reducir su consumo de carne. Con este pequeño gesto, podría convertirse en uno de los protagonistas para cambiar el rumbo de la historia ambiental.

EL VIAJE DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN NUESTRO ORGANISMO

De una o de otra forma, un número considerable de sustancias químicas forma parte de nuestra vida diaria y de nuestros actos más cotidianos: mientras respiramos, cuando comemos o nos aseptamos... ¡Estamos rodeados! En relación con el deterioro de la calidad del aire, la mayor parte de los ciudadanos comprende intuitivamente el vínculo existente entre la contaminación atmosférica y determinados efectos nocivos en la salud (como alergias, bronquitis, asma). Y no les falta razón, porque la contaminación atmosférica se empieza a considerar el riesgo ambiental para la salud más importante del mundo, siendo una de las principales causas evitables de morbilidad y mortalidad. Tanto es así, que la comunidad científica entiende probada la existencia de causalidad, o relación causa-efecto, entre la presencia de contaminantes en el aire y los daños en la salud. Esto no significa que no existan incertidumbres en el conocimiento de esa relación, ni que haya un consenso pleno en todos los aspectos relativos al tema. Además, queda mucho por descubrir, como la determinación de nuevos efectos en la salud, los

mecanismos biológicos subyacentes, la cuantificación y la magnitud de los efectos o los costes socioeconómicos asociados. La ciencia trabaja por discernir todas esas cuestiones, lo que ciertamente redundará en un avance para el diseño de medidas que reduzcan el daño de este factor de riesgo ambiental.

UNA MISIÓN COMPLICADA: INVESTIGAR PARA CONOCER LOS DAÑOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD

Analizar los efectos en la salud que produce la exposición a los contaminantes atmosféricos no es una cuestión baladí ni está exenta de dificultad. En primer lugar, sabemos que la respiración es un proceso que no se detiene a lo largo de la vida y que no podemos elegir el aire que inhalamos, tenga las sustancias que contenga. Los posibles efectos derivados sobre la salud se deben muy probablemente al fruto de esa exposición simultánea a una mezcla compleja de contaminantes; ese cóctel indeseable del que hablábamos antes.

A pesar de ello, los investigadores suelen centrar sus estudios en indicadores o sustancias concretas que seleccionan del conjunto de contaminantes presentes en el aire, como por ejemplo las $PM_{2.5}$. Por tanto, lo más habitual es el empleo del enfoque "un contaminante-un efecto en la salud". Esto se debe a que no es posible ni reproducir, ni caracterizar todas las condiciones ambientales que se producen en las circunstancias reales. No obstante, las asociaciones encontradas entre esos indicadores y los efectos en la salud analizados no reflejan necesariamente una "simple" relación causa-efecto. Podrían ser la consecuencia de la exposición de uno o varios contaminantes atmosféricos entre los cuales se encuentra el indicador investigado. También podría suceder que las poblaciones más susceptibles presentan similares efectos ante varios indicadores.

Además, una sustancia concreta podría provocar un efecto diferente con la presencia, o ausencia, de otros contaminantes, como se ha descrito la potenciación de efectos entre las partículas y el SO₂ del aire ambiente, o entre el radón y el tabaco en ambientes interiores.

Por otra parte, la mayor parte de las patologías que pueden derivarse de la exposición a la contaminación atmosférica no son exclusivas de este factor de riesgo ambiental, sino que más bien son de etiología multifactorial, en las que concurren diversas causas genéticas y ambientales. A modo de ejemplo, el desarrollo de un cáncer de pulmón puede originarse por exposiciones variadas, como el tabaco, el ambiente laboral y la contaminación atmosférica. Sin embargo, ninguna de ellas sería necesaria para que se desarrollara el cáncer en una persona susceptible. Por si esto fuera poco, las sustancias presentes en el aire se relacionan con múltiples problemas de salud.

DOS ENFOQUES BÁSICOS PARA INVESTIGAR LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD: ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y EPIDEMIOLÓGICOS

Los estudios experimentales y epidemiológicos han permitido estudiar las secuelas que la contaminación atmosférica deja sobre nuestra salud, así como avanzar en el conocimiento de las relaciones de causalidad. Ambos tipos de estudios se consideran complementarios cuando se trata de valorar las consecuencias de la exposición a este riesgo ambiental. Pero, obviamente, todo proceso científico tiene sus fortalezas y sus debilidades. Las posibles contradicciones o discrepancias encontradas en los trabajos realizados en distintos lugares del mundo se suelen solventar mediante los metanálisis. Se trata de un método de investigación que permite revisar críticamente y combinar los

resultados de diversos estudios con el propósito de obtener una estimación cuantitativa más robusta que sintetice la evidencia disponible.

En los estudios experimentales se controlan las condiciones de la exposición a la sustancia de interés, tales como la concentración y la duración. Su principal ventaja radica precisamente en ese conocimiento de la exposición, por lo que la medida de esta suele ser más precisa que en el caso de los estudios epidemiológicos. En cambio, no reproducen ni la mezcla de contaminantes, ni la variación temporal que ocurre en la exposición natural. Por otra parte, aportan información sobre las propiedades toxicológicas de contaminantes aislados y sobre los mecanismos por los que generan un perjuicio en la salud, mediante la exposición de materiales biológicos, cultivos celulares, animales e incluso personas voluntarias. Cuando se realizan con voluntarios, se suelen evaluar las consecuencias inmediatas de la exposición a una determinada dosis de contaminantes sobre la salud, observando los síntomas, los cambios en determinados parámetros físicos o funcionales, o biomarcadores de la sangre o de la orina. Por razones éticas, estos estudios no pueden llevarse a cabo con muchos individuos, ni tampoco con las personas más susceptibles por el potencial peligro que podría suponer para ellas la exposición al contaminante seleccionado. Por tanto, la extrapolación de los resultados suele conllevar numerosas incertidumbres y asunciones.

Por otro lado, la epidemiología mide la aparición de efectos en la salud en una población y cuantifica la asociación existente entre dichos efectos y las potenciales exposiciones. De esta forma se identifican las causas que pueden estar implicadas en el desarrollo o agravamiento de enfermedades, o en el desencadenamiento de la muerte. La principal ventaja de los estudios epidemiológicos radica en que se basan en la observación de los sucesos que se desarrollan en las poblaciones humanas bajo condiciones reales. Para que sea posible discriminar la relación que se

pretende evaluar, su abordaje requiere el conocimiento y la información sobre otros factores de riesgo implicados, tales como la temperatura o las epidemias de gripe.

A diferencia de los estudios experimentales, la medida de la exposición en la investigación epidemiológica suele ser una fuente de incertidumbre cuando el objeto de interés y de análisis es la salud de las poblaciones. El enfoque ecológico —caracterizado por estudiar grupos— no permite conocer la exposición individual, por lo que se suelen asumir los valores de inmisión de contaminantes atmosféricos, habitualmente de uno o de varios indicadores, como la medida de la exposición de la población. Esto implica presumir que la exposición de las personas ocurre cuando se conoce que un contaminante está presente en el aire y existe una expectativa razonable de que entren en contacto con dicho contaminante. Recientemente se están empleando otras metodologías para valorar la exposición, como los sistemas de modelización de la calidad del aire o las medidas proporcionadas por los satélites. En cualquier caso, estas nuevas herramientas se siguen fundamentando en la asunción de la coexistencia espacio-temporal de la población y de los contaminantes atmosféricos, sin llegar a conocer las variaciones individuales en las exposiciones derivadas de múltiples circunstancias, como la actividad física realizada, el tipo de vivienda, el tiempo pasado en ambiente exterior o los medios de transporte utilizados.

Por otra parte, los estudios ecológicos centran el estudio de la salud en un contexto ambiental, basándose en información agregada. Desde esta perspectiva, la salud de una población adquiere una entidad propia y una dimensión integral que no puede ser explicada en el ámbito individual. Un ejemplo claro podría ser la inmunidad de grupo en las enfermedades infecciosas, donde la susceptibilidad, la infección y la transmisión de la infección no es independiente entre los individuos de un colectivo. Obviamente, las estimaciones de estos trabajos

también son conjuntas para la población, siendo incorrecto realizar inferencias individuales a partir de los resultados obtenidos para el grupo, lo que se conoce como “falacia ecológica”. Esto supone que no se puede señalar específicamente qué personas están sometidas al riesgo, ni mucho menos garantizar que las personas expuestas presentarán el daño. Es decir, mediante este diseño no se puede conocer si las personas que sufrieron un daño en su salud son las mismas que estuvieron expuestas a una concentración más elevada de contaminantes atmosféricos en comparación con las que no lo padecieron.

Uno de los métodos de la investigación epidemiológica consiste en comparar la frecuencia de una enfermedad entre las personas expuestas a un factor sospechoso con su frecuencia en las personas no expuestas (o menos expuestas, como sucede con la contaminación atmosférica). Esto proporciona una función concentración-respuesta (FCR), que es una estimación del riesgo de enfermar o de morir asociado con los cambios en los niveles de concentración de los contaminantes durante un periodo de tiempo determinado (asumido como exposición). Normalmente, se asume que estas FCR son funciones lineales o muy próximas a la linealidad y sin umbral de concentración por debajo del cual no se esperen efectos en la salud.

La magnitud o intensidad de la asociación entre exposición y efecto en la salud suele expresarse en términos relativos, como por ejemplo el Riesgo Relativo (RR). Esta medida de asociación indica cuántas veces es más frecuente el evento en salud (por ejemplo, ingresos hospitalarios por EPOC) en el grupo expuesto al factor de exposición —o más expuesto— en relación con el grupo no expuesto —o no menos expuesto—. Esta medida relativa del efecto carece de unidades y sus posibles valores oscilan entre cero e infinito. Cuando la exposición no tiene ningún efecto en la salud, el RR es igual a la unidad, es decir, el valor nulo es igual a uno. Si el valor obtenido es mayor de uno, la exposición incrementa el riesgo de adquirir la enfermedad o

de morir. En este caso, cuanto mayor es este valor mayor es la fuerza de asociación entre el factor de riesgo y el evento en la salud. Por el contrario, un factor de protección dará lugar a un valor entre cero y uno. La estimación puntual del RR debe estar siempre acompañada del Intervalo de Confianza (IC) que permita evaluar la precisión de la estimación. Cuando los intervalos de confianza no contienen el valor nulo (1), la estimación tiene una probabilidad alta de no ser debida al azar y de ser estadísticamente significativa. Veamos seguidamente un ejemplo.

El investigador Chen y sus colaboradores realizaron una revisión sistemática de los estudios publicados entre 1950 y 2007 sobre la exposición a largo plazo a la contaminación atmosférica. Después de evaluar la heterogeneidad entre los estudios, estimaron efectos conjuntos para contaminantes específicos y realizaron un análisis de sensibilidad. En relación con las partículas, concluyeron que por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de incremento de la exposición media a largo plazo a las $\text{PM}_{2.5}$ se aumenta el riesgo de morir por causas no accidentales en un 6% (IC 95%: 3-10%) (RR 1,06; IC 95%: 1,03-1,10), con independencia de la edad, el género y la región geográfica. La misma exposición se asoció a un incremento en el riesgo de morir por cáncer de pulmón en un 21% (RR 1,21; IC 95%: 1,10-1,32) y por causas cardiovasculares en un 14% (RR 1,14; IC 95%: 1,09-1,18).

EFFECTOS EN LA SALUD DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA A CORTO Y A LARGO PLAZO

Como las concentraciones de determinados contaminantes atmosféricos varían temporalmente (de una hora a otra o de un día a otro), es posible investigar los efectos agudos que ocasiona la exposición a corto plazo sobre la salud. Múltiples estudios han examinado la relación entre los cambios diarios de la

calidad del aire y la frecuencia de un conjunto de eventos en la salud, tales como la arritmia, el infarto de miocardio, los síntomas respiratorios, las consultas médicas, ingresos hospitalarios o muertes. Otros estudios han constatado cambios fisiológicos o funcionales, como las alteraciones producidas en la función pulmonar o la presencia de marcadores inflamatorios sanguíneos.

El análisis de series temporales es el diseño más frecuentemente utilizado para investigar los efectos agudos en la salud tras exposiciones breves —el mismo día o los días posteriores— a la contaminación atmosférica. Con este método se asume que las características individuales, como el tabaquismo o los factores genéticos, no varían de un día para otro. Estos estudios han mostrado que se produce un aumento de la morbilidad y mortalidad de la población durante los días en los que la contaminación atmosférica es más elevada, en comparación con los días en los que la contaminación es menor (variabilidad temporal). La magnitud de la relación resulta ser mayor para causas cardiovasculares y respiratorias. El aumento de riesgo se produce, sobre todo, a costa de las personas cuyo estado de salud ya se encuentra comprometido, como en aquellos que tienen cáncer, enfermedades cardiovasculares y respiratorias o diabetes.

Este tipo de estudios se ha desarrollado en múltiples lugares del mundo, concluyendo que existe un aumento del riesgo de morir asociado con la exposición a corto plazo de las PM, NO₂ y O₃. En EE UU, el proyecto MAPS³ se centró en las hospitalizaciones por todo tipo de eventos en la salud asociadas a la exposición a las partículas, concluyendo que los mayores de 65 años experimentaron un mayor riesgo de ingreso hospitalario por cardiopatía isquémica, arritmias, paros cardíacos y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) asociado a los días en los que los niveles de PM_{2,5} eran más altos. Por otra

3. MAPS: Medicare Air Pollution Study.

parte, en Europa, el PSAS⁴ y Air & Santé en Francia, MISA⁵ en Italia, o EMECAS⁶ y EMECAM⁷ en España, también han sido proyectos con grandes muestras de población y diversidad geográfica para estudiar los efectos en morbilidad relacionados con la exposición a corto plazo a la contaminación atmosférica. El programa EMECAS estimó, para un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones diarias de PM_{10} , NO_2 y O_3 (período estival), un aumento del 1,56%, 0,86% y 0,66% en el número de ingresos por causas cardíacas y de 0,91%, 0,38% y 0,69% por causas cardiovasculares, respectivamente.

Finalmente, el proyecto europeo APHEA⁸ y el estudio norteamericano NMMAPS⁹ se encuentran entre los estudios multicéntricos internacionales de series temporales que han evaluado la situación en amplias regiones del mundo y que más han aportado al conocimiento del impacto agudo de la contaminación del aire en la mortalidad por todas las causas y por causas específicas, fundamentalmente cardiorrespiratorias. APHEA utilizó información de 30 ciudades europeas para mostrar que cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 supone un aumento en las tasas de mortalidad total (0,3%), cardiovascular (0,4%) y respiratoria (0,4%). Además, encontraron efectos más altos de PM_{10} sobre la mortalidad diaria en ciudades con una temperatura más elevada y con mayores emisiones de tráfico.

El proyecto APHENA¹⁰ ha estimado los efectos de la mortalidad a corto plazo analizando de manera conjunta los datos

4. PSAS: Programme de Surveillance Air et Santé.

5. MISA: Metanálisis de Estudios Italianos sobre Efectos a Corto Plazo de la Contaminación Atmosférica.

6. EMECAS: Estudio Multicéntrico sobre los Efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud.

7. EMECAM: Estudio Multicéntrico Español sobre la relación entre Contaminación Atmosférica y Mortalidad.

8. APHEA: Air Pollution and Health European Approach. APHEA₁ = 15 ciudades europeas; APHEA₂ = 28 ciudades europeas.

9. NMMAPS: National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study.

10. APHENA: Air Pollution and Health: A Combined European and North American Approach.

de Europa (proyecto APHEA), EE UU (proyecto NMMAPS) y Canadá. Estos estudios han relacionado las fluctuaciones en la contaminación diaria con incrementos en la mortalidad pequeños, pero significativos: 0,2-0,6% por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aumento en la concentración diaria de PM_{10} ; 0,26% por el mismo incremento en la concentración máxima diaria de una hora de O_3 . La magnitud de dicha relación resultó ser mayor para causas cardiovasculares y respiratorias. Los resultados mostraron que el incremento del riesgo de morir es similar en Europa y en EE UU, mientras que en Canadá son más elevados los efectos agudos, probablemente debido a factores modificadores del efecto de la relación entre PM_{10} y la mortalidad a corto plazo, como la presencia de otros contaminantes y el clima (temperatura y humedad). Finalmente, un reciente metanálisis, elaborado por Atkinson y colaboradores, ha estimado que el riesgo de morir aumenta en 1,04% por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la exposición a corto plazo a las $\text{PM}_{2,5}$, constatando que se produce una variación regional considerable en todo el mundo (desde 0,25% hasta 2,08%). Asimismo concluyen que se incrementa más la mortalidad por causas respiratorias (1,5%) que por causas cardiovasculares (0,8%).

Por otra parte, resulta de gran importancia la determinación de los efectos causados por exposiciones a contaminantes del aire que, aunque son relativamente bajas, son prolongadas en el tiempo y de gran relevancia en términos de efectos en la salud. Los estudios que analizan las consecuencias de la exposición crónica —largo plazo— a la contaminación atmosférica son más escasos, dado que son mucho más costosos. Se denominan estudios de cohorte y requieren el seguimiento de poblaciones durante un periodo prolongado de tiempo, a las que se evalúa periódicamente su estado de salud. Estos trabajos comparan la incidencia de enfermedad —aparición de nuevos casos— o muerte en poblaciones con distinto nivel de exposición (variabilidad espacial). Permiten también estimar la

pérdida de esperanza de vida. Como se conocen los individuos participantes es factible el control de variables individuales, como el tabaquismo, la realización de ejercicio físico, la dieta o el nivel socioeconómico.

Los resultados de estos estudios muestran que el riesgo para la salud es mayor cuando la vida se desarrolla en ciudades más contaminadas, en relación con otras menos contaminadas, o en zonas cercanas a vías de tráfico. La cohorte de la Sociedad Americana contra el Cáncer (ACS) se considera uno de los estudios más emblemáticos en la cuantificación de los efectos en la salud derivados de la exposición a las $PM_{2,5}$ a largo plazo. Los resultados de este programa siguen siendo utilizados por muchas instituciones para estimar la carga de la mortalidad atribuible a la contaminación atmosférica y para analizar el coste-beneficio de distintas opciones políticas. Durante el periodo 1982-2000, este estudio siguió a unas 300.000 personas mayores de 30 años y residentes en 50 ciudades de los EE UU. Cada aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de partículas finas en el aire se asoció con un incremento medio del 6%, 9% y 14% del riesgo de morir prematuramente¹¹ por todas las causas, por enfermedades cardiopulmonares y por cáncer de pulmón, respectivamente.

En Europa, el proyecto ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects) agrupa la colaboración de más de 30 estudios de cohorte europeos, que incluye el seguimiento de unas 900.000 personas, con el objetivo de cuantificar de forma combinada los daños en la salud de la exposición a la contaminación atmosférica. Siguiendo una metodología estandarizada, se están considerando diversos efectos adversos

11. Se entiende por muerte prematura la que sucede a una edad sensiblemente inferior a la edad media de la esperanza de vida de la población. La estimación del número de años potenciales de vida perdidos permite precisar y completar este concepto, calculando para cada caso la diferencia entre la esperanza de vida media de la población y su edad de fallecimiento.

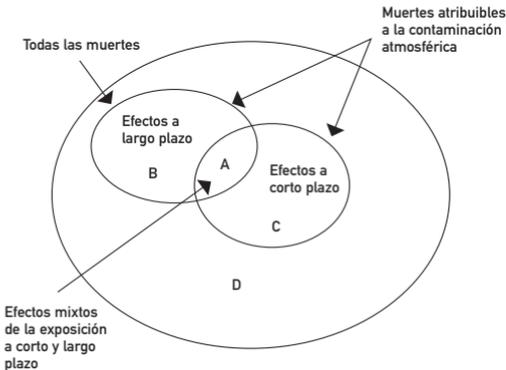
en la salud, como los que se ocasionan en el embarazo, enfermedades respiratorias en niños, cardiopulmonares en adultos, muertes por causas específicas o la incidencia de cáncer de pulmón, entre otros. Uno de los resultados más importantes logrados hasta el momento, ha sido la detección de efectos sobre la salud producidos por las $PM_{2,5}$ a concentraciones por debajo del valor límite anual $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ regulado actualmente en la directiva europea de calidad del aire. Inquietante.

EFFECTOS EN LA SALUD DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS A CORTO PLAZO VERSUS A LARGO PLAZO

La exposición prolongada a la contaminación del aire conlleva consecuencias mucho más graves para la salud que las resultantes de una exposición corta, lo que supone que los daños se deben no solo a la exacerbación de enfermedades subyacentes, sino también a su progresión.

FIGURA 4

DISTRIBUCIÓN DE LA MORTALIDAD RELACIONADA CON LA EXPOSICIÓN AGUDA Y CRÓNICA A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA



Fuente: Adaptado de Künzli et al., 2001 y Künzli, 2005.

Los estudios de cohortes pueden analizar todas las categorías de las muertes atribuibles a la contaminación atmosférica (A, B y C), incluyendo las defunciones que se producen con independencia del nivel de contaminación observado poco

antes del fallecimiento. En cambio, los estudios de series temporales capturan solo los casos en los cuales la exposición a la contaminación atmosférica en un corto espacio de tiempo desencadena la enfermedad o la muerte (categorías A y C). Por tanto, las series temporales subestiman el impacto total de la contaminación atmosférica, mostrando sobre todo los efectos en individuos vulnerables o con enfermedades adquiridas con anterioridad a la exposición y que son más susceptibles a incrementos rápidos en los niveles de contaminantes.

- A) La exposición a la contaminación atmosférica incrementa tanto el riesgo de padecer enfermedades subyacentes que van debilitando la salud a largo plazo, como el riesgo de morir entre los vulnerables como consecuencia de un aumento de corta duración de la concentración de contaminantes.
- B) La exposición a la contaminación atmosférica incrementa el riesgo de padecer enfermedades crónicas que van debilitando la salud a largo plazo, sin que la exposición a corto plazo esté relacionada con el momento de la muerte. Son personas que morirán un día sin que sea necesario que la concentración de contaminantes haya sido elevada ni ese día ni los días precedentes.
- C) La contaminación atmosférica no guarda relación con el riesgo de las enfermedades crónicas subyacentes, pero la exposición a corto plazo incrementa la mortalidad entre los que presentan un estado de salud deteriorado.
- D) Muertes que no se vinculan con la exposición a la contaminación atmosférica.

MECANISMOS BIOLÓGICOS

Las causas no deben confundirse con los mecanismos. Por ejemplo, la exposición a las partículas finas es una causa del cáncer de pulmón, mientras que la posible alteración genética provocada por este contaminante es un supuesto mecanismo. Aunque la investigación va avanzando en este sentido, todavía no se conocen todos los mecanismos biológicos implicados en los efectos derivados de la exposición a los contaminantes atmosféricos.

Cada contaminante puede actuar de un modo distinto sobre los organismos vivos. Entre los mecanismos biológicos más señalados en los trabajos científicos se encuentran el "estrés oxidativo" y la "inflamación". El proceso de la oxidación lo hemos observado en múltiples ocasiones, como cuando una manzana partida y expuesta al aire se pone de color café o que el cobre torne a color verde con el tiempo. El estrés oxidativo ocurre cuando hay un desequilibrio redox (reducción-oxidación) en nuestras células debido a un aumento en los prooxidantes (radicales libres y otras especies reactivas) y/o una disminución en los antioxidantes. Con el tiempo, la supremacía de los oxidantes frente a los antioxidantes se traduce en un daño oxidativo a las macromoléculas que son decisivas para los procesos bioquímicos o fisiológicos del cuerpo humano. Como consecuencia se reduce la actividad biológica y la función celular. Posteriormente, la activación del sistema inmune puede finalizar deteriorando nuestros tejidos. Este fenómeno es uno de los causantes del envejecimiento y está implicado en múltiples patologías crónicas tales como el cáncer, la hipertensión, el párkinson, el alzhéimer o la diabetes.

La contaminación atmosférica contiene altas concentraciones de potentes oxidantes y prooxidantes, tales como el ozono o los óxidos de nitrógeno, que actúan de forma directa sobre los lípidos y las proteínas, o bien de forma indirecta mediante la activación de las reacciones oxidantes intracelulares. De aquí se deriva la importancia del consumo de alimentos ricos en antioxidantes, como frutas y verduras, dado que pueden inactivar los compuestos oxidantes y reducir sus secuelas en el organismo.

Por otro lado, la inflamación es un proceso que todos hemos observado en nuestro cuerpo alguna vez. Las reacciones inflamatorias pueden manifestarse, por ejemplo, por la hinchazón, la tos o la expectoración. Se trata de una respuesta de carácter protector cuyo objetivo es liberar a nuestro organismo

de la causa inicial de la lesión celular y de sus consecuencias. No obstante, la inflamación en sí misma también es una fuente potente de estrés oxidativo y un desencadenante de la respuesta inmune que puede ocasionar finalmente un impacto en los tejidos sanos. Este mecanismo está muy relacionado con el subsiguiente proceso de reparación que, ante fenómenos agudos, normalmente finaliza recuperando la funcionalidad de los tejidos y órganos. En cambio, ante un proceso inflamatorio crónico derivado de una exposición prolongada, la reparación puede finalizar con la fibrosis o cicatriz. En este caso, se desarrolla un tejido conectivo fibroso (imaginemos como si fuera un tejido de relleno) en la parte dañada del órgano, pero ya no recupera su funcionalidad porque no es su constituyente normal.

Los contaminantes del aire promueven la respuesta inflamatoria en el sistema respiratorio, lo que conlleva a su vez una cascada de alteraciones en el sistema vascular. Se ha observado que se producen variaciones en los biomarcadores de inflamación del sistema cardiovascular, tales como la proteína C reactiva (PCR) y el fibrinógeno, ambas proteínas producidas en el hígado. La PCR aumenta sus niveles en sangre como respuesta a la inflamación, así que puede considerarse como un marcador de riesgo cardiovascular, como también lo es el colesterol LDL (malo). Esta proteína es un predictor de la incidencia de infarto de miocardio, ictus, enfermedad arterial periférica y muerte súbita cardiaca. Por otro lado, el fibrinógeno ayuda a detener el sangrado al favorecer la formación de coágulos de sangre. El aumento de la viscosidad de la sangre y la generación de trombos han sido relacionados de forma consistente con enfermedades cardiovasculares y con la muerte. También puede producirse la alteración de los procesos eléctricos del corazón o del ritmo cardiaco y el estrechamiento del diámetro de los vasos sanguíneos, que conduce a una elevada presión arterial de la sangre.

La exposición continua a la contaminación atmosférica derivaría asimismo en procesos de inflamación crónica, con la

generación de fibrosis en nuestro organismo. Por otro lado, la aterosclerosis es el resultado de un largo proceso en el que se va acumulando grasa, colesterol, calcio y otras sustancias que se encuentran en la sangre sobre las paredes de las arterias. A largo plazo, también se han asociado los contaminantes del aire con marcadores preclínicos de la aterosclerosis, como el grosor íntima-media de la arteria carótida y la calcificación arterial coronaria, y con la progresión de esta patología de elevada relevancia para las enfermedades cardiovasculares.

Por otra parte, las personas que padecen una inflamación sistémica subclínica (presencia crónica de distintos biomarcadores inflamatorios en concentraciones más elevadas que en individuos sanos), como los obesos o los diabéticos, pueden sufrir efectos más serios como consecuencia de la exposición a los contaminantes atmosféricos o empeorar su situación clínica. Por último, las interferencias producidas entre la respuesta inflamatoria y los mecanismos de defensa pulmonar conducen a un mayor riesgo de contraer infecciones en el sistema respiratorio.

POBLACIONES MÁS EXPUESTAS O MÁS SENSIBLES A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación del aire es importante en la determinación de la calidad de vida y del estado de salud de la población. Por regla general, la gran mayoría de los individuos no sienten nada anormal por estar expuestos a concentraciones bajas o moderadas de contaminación atmosférica, las que habitualmente están presentes en las ciudades europeas o norteamericanas. Pero, incluso a esos niveles relativamente discretos de contaminación, ciertos colectivos pueden sufrir alteraciones de su salud. Esto supone que el riesgo no se distribuye en partes iguales en toda la población, si no que probablemente plantea una grave

amenaza para determinadas personas, aunque aparentemente estén sanas.

Varios factores influyen en la toxicidad para que un individuo sea afectado finalmente por la contaminación atmosférica. Entre ellos, pueden mencionarse los contaminantes del aire a los que la persona se ve expuesta en su medio de vida (propiedades físico-químicas o biológicas), la dosis que se alcanza en puntos críticos de los tejidos, la frecuencia y la duración de exposición a los contaminantes (exposición puntual, repetida, aguda o crónica), la susceptibilidad de cada individuo a los efectos perjudiciales de la contaminación (el estado de salud del momento de exposición, la edad o la predisposición genética) y los hábitos o circunstancias de la vida de la persona (el tabaquismo o trabajar en ambientes exteriores). El grado y lesión esperados pueden cambiar en función de las posibles reacciones de combinación entre contaminantes (sinergias), la sensibilidad de los receptores y la capacidad de respuesta del organismo frente a la sustancia.

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

Los fetos y los bebés son especialmente susceptibles a los efectos de los agentes ambientales que interrumpen el proceso de desarrollo, lo que puede ocasionar secuelas para el resto de la vida. Los factores de estrés en etapas pre y postnatales, como pueden ser los contaminantes atmosféricos, pueden cambiar permanentemente la estructura del cuerpo, la fisiología, el

metabolismo y predisponer a los individuos para el desarrollo de patologías crónicas graves a lo largo de su vida (por ejemplo, enfermedades cardiovasculares, respiratorias, metabólicas o neurodegenerativas).

En comparación con los adultos, los niños son particularmente susceptibles a los contaminantes atmosféricos por múltiples razones. Los sistemas respiratorio e inmunológico, así como los mecanismos de desintoxicación y defensivos del organismo no están completamente desarrollados en los niños, lo que conduce a una mayor sensibilidad frente a los contaminantes ambientales. Como son pequeños, la dosis de exposición es mayor por peso corporal y superficie del pulmón, lo que potencialmente puede ocasionar efectos irreversibles en el desarrollo del pulmón. Son más activos y pasan más tiempo en ambientes exteriores, lo que también aumenta la potencial dosis efectiva de contaminantes. En países subdesarrollados, los niños soportan generalmente una mayor exposición en el interior de los domicilios como consecuencia de los combustibles y tecnologías ineficientes empleados para el cocinado y la calefacción.

Los efectos ocasionados por la contaminación atmosférica en la salud infantil pueden ser importantes precursores de la morbilidad y la mortalidad en la edad adulta. El coste, no solo en términos económicos, asociado con estas consecuencias a lo largo de la vida puede ser sustancial. Sin embargo, la asociación entre las exposiciones ambientales tempranas y el riesgo de enfermar más tarde ha sido apenas evaluado desde un punto de vista epidemiológico, principalmente por las escasas cohortes de embarazadas o de nacimiento que han sido seguidas hasta alcanzar la edad adulta. Además, estos estudios son fundamentales para proporcionar pistas sobre los mecanismos biológicos de actuación de los contaminantes, como la disrupción endocrina y metabólica o la disfunción del sistema inmune, así como para determinar los patrones de enfermedad en relación

con los peligros ambientales. Por todas estas razones, el mantenimiento de este tipo de cohortes debería ser una prioridad en la investigación futura.

En España, destaca la cohorte INMA (Infancia y Medio Ambiente) (www.proyectoinma.org), constituida desde el año 2003 con el objetivo de estudiar las consecuencias de las exposiciones ambientales y la dieta en el desarrollo fetal e infantil en diversas zonas de nuestra geografía. El estudio comenzó con el seguimiento de unas 4.000 embarazadas y sus hijos, desde el inicio del embarazo, en siete cohortes españolas: tres previas a la creación de la Red INMA (Ribera del Ebro, Menorca y Granada) y cuatro de nueva creación (Valencia, Sabadell, Asturias y País Vasco). A lo largo de su existencia, se han analizado diversos contaminantes internos, como los compuestos organoclorados y organobromados, metales y metaloides (plomo, mercurio, arsénico), contaminantes emergentes (bisfenol A), sustancias perfluoroalquiladas o la exposición al humo del tabaco. Los efectos adversos encontrados en los niños a exposiciones comunes en la población general sugieren que los fetos, los bebés y los niños requieren más protección de la que se les proporciona actualmente.

Las personas mayores, especialmente a partir de los 65 años, parecen ser hipersensibles a la contaminación atmosférica. El envejecimiento provoca un deterioro natural de los sistemas y una declinación gradual de los procesos fisiológicos, lo que acarrea una salud más frágil. Como resultado, durante la senectud se observa una disminución en una serie de factores que explican la mayor susceptibilidad a las exposiciones ambientales. Entre otros, presentan menor fuerza de los músculos inspiratorios, menor efectividad de la tos, menor percepción de la obstrucción bronquial, menor depuración de las vías respiratorias, así como menor capacidad antioxidante y de adaptación de sus sistemas de defensa. Además, los ancianos presentan una mayor rigidez torácica y mayor prevalencia

de enfermedades preexistentes, como EPOC, aterosclerosis, hipertensión o diabetes. Esto les convierte en más susceptibles, especialmente para los efectos agudos, dado que pueden no tener todavía reconocida la existencia de una dolencia o pueden sufrir una crisis o un agravamiento de su estado de salud. Además de los efectos cardiorrespiratorios, se está investigando la posible relación entre los contaminantes atmosféricos y el deterioro cognitivo, considerando patologías tales como el párkinson o el alzhéimer.

Por otra parte, es importante destacar la especial peligrosidad que supone para los ancianos las olas de calor, caracterizadas por una elevación extrema de la temperatura, en las que concurre un episodio de alta contaminación atmosférica. Este fenómeno levantó la alarma en Europa en el año 2003 provocando una elevada mortalidad. Solo en Francia, sin contar con otros países afectados, supuso la muerte prematura de unas 15.000 personas, sobre todo ancianas, por el efecto conjunto de la temperatura elevada y el incremento de las concentraciones de $PM_{2,5}$, O_3 y NO_2 . Este hecho supuso la revisión y mejora de los sistemas de vigilancia sanitaria en muchos países europeos, especialmente durante el periodo estival. En los países mediterráneos con veranos calurosos, como es el caso de España, no debe bajarse la guardia ni la atención durante esta estación ante la previsible combinación de calor más contaminación atmosférica.

En relación con la contaminación atmosférica, muchos estudios epidemiológicos publicados hasta el momento no han diferenciado sus resultados por sexo. Esto motiva que la evidencia científica no sea todavía consistente como para establecer diferencias en los efectos en la salud por género. Sin embargo, en comparación con los hombres, las mujeres presentan diferencias estructurales —menor tamaño pulmonar o del diámetro de las vías respiratorias— y hormonales —la progesterona y los estrógenos influyen en el sistema pulmonar— que pueden conducir a una mayor hiperreactividad de las vías

respiratorias. En cualquier caso, sí se ha constatado que el género influye en la tasa de depósito y en la localización de las partículas depositadas en el tracto respiratorio, debido a diferencias de tamaño corporal o de las vías respiratorias y de parámetros de ventilación. Por otra parte, las embarazadas presentan una incrementada susceptibilidad alérgica. Por último, no olvidemos que en países en vías de desarrollo, las mujeres de familias pobres asumen una carga desproporcionada de los impactos de la contaminación del aire, debido a su mayor exposición al humo procedente de los combustibles sólidos de baja calidad que utilizan para cocinar y para calefacción.

Continuando con este último aspecto, las poblaciones con nivel socioeconómico más bajo padecen mayores problemas de salud. De acuerdo con la OMS, la pobreza es la causa principal de enfermedad y muerte en el mundo, ejerciendo su influencia destructiva en todos los estadios de la vida, es decir, desde el momento de la concepción hasta la muerte. En la actualidad, la pobreza se concibe como el resultado de una combinación de factores en la que los ingresos económicos solo son un elemento más. La contaminación atmosférica también puede contribuir a las desigualdades sociales por dos vías: por una mayor exposición por el país, por la localización concreta de la residencia o por la ocupación desarrollada o, bien, por un aumento de la vulnerabilidad.

Las personas con menores recursos a menudo residen en un medio más degradado, en viviendas de mala calidad situadas en las proximidades de instalaciones industriales o de carreteras muy transitadas, con lo que la exposición puede ser más elevada en cuanto a ruido y sustancias químicas en el aire. Además, suelen ocupar empleos en los que las condiciones de trabajo no son las más óptimas, estando más expuestos a contaminantes del aire y/o diversos factores de riesgo, tales como horarios irregulares, cargas físicas, ruido, labores estresantes y utilización de máquinas o sustancias peligrosas.

La vulnerabilidad también marca la diferencia para los más desfavorecidos socialmente. Incluso viviendo o trabajando en medios menos contaminados, estos colectivos sufren unas consecuencias sanitarias más marcadas frente a la contaminación atmosférica, porque su estado de salud es globalmente más frágil y presentan mayores prevalencias de enfermedades preexistentes. La ciencia muestra que las tasas de ciertas enfermedades cardiovasculares (infarto de miocardio o accidentes cerebrovasculares), respiratorias (asma, cáncer de pulmón, EPOC), así como de mortalidad ligadas a esas enfermedades aumentan gradualmente a medida que disminuyen los recursos socioeconómicos. Esto se explica en parte por unos modos de vida menos saludables, tales como la realización de menos deporte o las deficiencias en la nutrición, con mayor ingesta de productos menos sanos o con menor carácter antioxidante. Además, el acceso a diversos recursos y servicios es más restringido, lo que muchas veces se traduce en una menor información o formación educativa, menor demanda de los sistemas de cuidado sanitario o menor adquisición y consumo de medicamentos esenciales.

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

UNA PIRÁMIDE DE CONSECUENCIAS PARA LA SALUD ASOCIADAS A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

A diferencia de otros factores de riesgos modificables o evitables, como el tabaco, la exposición a la contaminación atmosférica afecta a toda la población en menor o mayor medida. La investigación científica ha evaluado la relación entre la exposición a corto plazo a la contaminación del aire y una gran variedad de efectos en la salud con distinto grado de severidad, desde cambios funcionales subclínicos —no detectados por la persona— a diversos síntomas, visitas a los servicios de urgencias sanitarias, hospitalizaciones por diversas patologías y muertes. Los daños en el sistema cardiovascular y respiratorio son los más frecuentemente investigados, especialmente en relación con las partículas.

FIGURA 5

REPRESENTACIÓN DEL RANGO DE EFECTOS QUE PUEDEN PRODUCIRSE POR LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y NÚMERO DE PERSONAS POTENCIALMENTE AFECTADAS POR DICHS EFECTOS



Fuente: Adaptación de WHO (2005): *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update.*

La epidemiología ha empleado un esquema clásico para describir los problemas de salud derivados de la exposición a

contaminantes del aire. La figura 5 refleja cómo se mantiene una gradación entre la gravedad de las consecuencias de la contaminación atmosférica y el tamaño de la población en riesgo afectada. Las molestias o síntomas mal definidos causados por la contaminación atmosférica podrían afectar a un porcentaje importante de la población, son la base de la pirámide. Los efectos más graves son, por fortuna, menos frecuentes entre la población y están representados por la punta de la pirámide.

EFFECTOS PRENATALES Y POSTNATALES DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Aunque parezca increíble, antes de nacer ya estamos expuestos a riesgos por la contaminación atmosférica. La literatura científica relaciona la exposición de las embarazadas a la contaminación atmosférica, especialmente por O_3 , NO_2 , CO , PM_{10} y $PM_{2.5}$, con el parto prematuro (por debajo de la semana 37 de gestación) y el bajo peso al nacimiento de sus bebés (bajo <2.500 g; muy bajo <1.500 g). Reuniendo datos de 14 cohortes europeas de recién nacidos, se ha concluido que el riesgo de bajo peso al nacimiento es de un 18% por cada incremento de $5 \mu g/m^3$ en las partículas finas. Este parámetro sanitario es trascendental porque se correlaciona con el estado de salud a lo largo de la vida: a menor peso, peor salud. Por su parte, los partos prematuros están asociados con un aumento de la probabilidad de morir en la etapa perinatal, que va desde las 28 semanas de embarazo hasta la primera semana de vida, o bien de enfermar a largo plazo.

Relativamente reciente es la preocupación surgida sobre los efectos de la contaminación atmosférica sobre el neurodesarrollo, que es el proceso de evolución del sistema nervioso que se extiende desde el periodo embrionario —estadio inicial

del embarazo— hasta la adolescencia. Los estudios experimentales sugieren que la contaminación atmosférica puede ocasionar un serio impacto en el sistema nervioso central ya que se han observado efectos tales como la inflamación crónica del cerebro, la disrupción de la barrera sangre-cerebro, la activación de las células microglía (principal línea de defensa del sistema nervioso central) y daños en la sustancia blanca. Podría ocurrir un efecto general en el cerebro o en determinadas zonas específicas, como el lóbulo frontal, el hipocampo, el cuerpo estriado y la sustancia gris, lo que se relaciona con alteraciones en el funcionamiento cognitivo y psicomotor. El potencial efecto neurotóxico de la contaminación atmosférica sobre el funcionamiento del cerebro en fetos y bebés es de particular interés porque los mecanismos de desintoxicación todavía son inmaduros.

La exposición a los HAP ha sido relacionada en estudios científicos con descensos en la función cognitiva (disminución del coeficiente intelectual), incrementos en los problemas del comportamiento y cambios en la estructura del cerebro. Consabido es también que la exposición al plomo está relacionada con este efecto de descenso del coeficiente intelectual. Por otro lado, actualmente se conocen los resultados de un metanálisis de seis cohortes europeas mostrando que se produce un descenso en la función psicomotora, en niños de uno a seis años de edad, relacionado con la exposición prenatal a contaminantes emitidos por el tráfico, principalmente el NO_2 (0,68 puntos de reducción de la escala sobre el desarrollo psicomotor global por cada incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en NO_2). Finalmente, en la última década varias revisiones sistemáticas y metanálisis de estudios científicos han descrito una evidencia bastante consistente entre la asociación de la exposición pre y postnatal a las partículas y NO_2 y el diagnóstico de autismo, pero todavía es necesaria más investigación para confirmar este extremo.

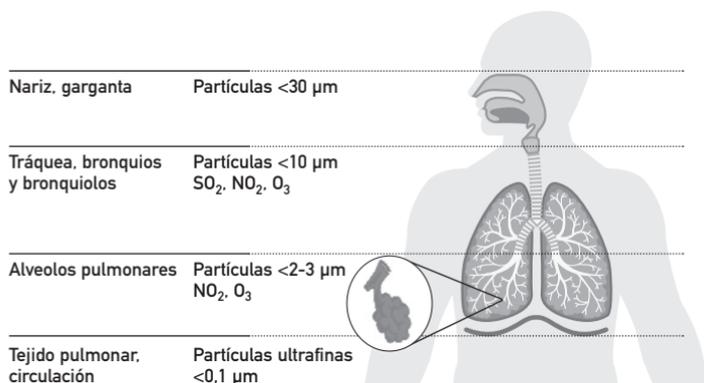
EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL SISTEMA RESPIRATORIO

Los contaminantes inhalados con el aire viajan a distintas partes de nuestro sistema respiratorio y pueden incluso alcanzar otras partes de nuestro organismo. Por un lado, los gases llegan a distintas zonas del sistema respiratorio. Mientras que el SO_2 no suele pasar de la región traqueobronquial, el NO_2 y el O_3 pueden avanzar hasta los alveolos de los pulmones. Por otra parte, las partículas se han ganado la triste fama de ser el contaminante atmosférico más perjudicial para la salud. Sus efectos dependen fundamentalmente del tamaño y de la composición química de la partícula. A menor tamaño, mayor capacidad de penetración en el organismo, mayor superficie de contacto con los sistemas biológicos y mayor reactividad química. Esto implica un potencial incremento del riesgo de lesión en tejidos y órganos, dependiendo de las sustancias químicas nocivas que contengan.

En cuanto al tamaño, las partículas más grandes de $10\ \mu\text{m}$, como el polvo o el polen, generalmente no alcanzan los pulmones al quedar atrapadas por la nariz y la garganta. Por consiguiente, la investigación epidemiológica centra sus esfuerzos en las fracciones PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$, con probados efectos perjudiciales para la salud cardiorrespiratoria. Las partículas menores de $10\ \mu\text{m}$ llegan a las vías altas respiratorias, donde pueden ser capturadas y eliminadas por la tos, la expectoración o la deglución. Las que son menores de $5\ \mu\text{m}$ pueden entrar en los bronquios, en la parte superior de los pulmones. Las partículas menores de $3\ \mu\text{m}$ pueden penetrar hasta las partes más profundas del pulmón, los alveolos, donde se produce el intercambio gaseoso. Las partículas ultrafinas pueden atravesar la barrera alveolo-capilar y continuar su viaje por la circulación sanguínea hacia otros órganos, como el corazón, el hígado, los riñones y el cerebro. Las partículas ultrafinas también podrían alcanzar el cerebro por la vía del nervio olfatorio.

FIGURA 6

PENETRACIÓN DE DIVERSOS CONTAMINANTES EN EL SISTEMA RESPIRATORIO



Fuente: Adaptado de N. Künzli, L. Pérez y R. Rapp (2010): *Air Quality and Health*. European Respiratory Society (ERS).

En relación con los componentes de las partículas, se está investigando actualmente cuáles pueden revestir especial peligrosidad para la salud. El mayor impacto en la salud parece que viene determinado por una serie de especies químicas, entre las que destacan las partículas de carbono elemental, los compuestos orgánicos (concretamente los HAP), los sulfatos y los nitratos, así como determinados metales (As, Cd, Fe, Zn, Ni). Especial interés despierta la fracción $\text{PM}_{2,5}$, porque puede contener muchos de esos componentes, y la fracción $\text{PM}_{0,1}$, porque están constituidas por compuestos con actividad redox y potencialmente cancerígenos, como los HAP. Finalmente, si las partículas o determinados componentes son solubles en agua, pueden pasar directamente a la sangre por los capilares alveolares. Si no son solubles en agua, son retenidas en las profundidades del pulmón durante largos periodos.

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

entre las que destacan la tos y la expectoración, la reacción inflamatoria e irritación de las vías respiratorias, las deficiencias en la función pulmonar, la hiperreactividad y la obstrucción bronquial, el agravamiento de enfermedades respiratorias preexistentes (asma, EPOC, bronquitis), los nuevos casos de asma o bronquitis crónica, el incremento de infecciones, así como el aumento del riesgo de morir por causa respiratoria y la disminución de la esperanza de vida. Las partículas se señalan específicamente como las causantes de los efectos más graves en el sistema respiratorio, provocando además cáncer de pulmón. Evidentemente todas estas dolencias ocasionadas por la inhalación de contaminantes atmosféricos se relacionan con una mayor frecuencia de consumo de medicamentos y una mayor demanda de los servicios sanitarios, incluyendo las hospitalizaciones, especialmente entre los asmáticos y los enfermos de EPOC.

La disrupción en el desarrollo de los sistemas respiratorio e inmune por los contaminantes ambientales puede conducir a una capacidad reducida para combatir las infecciones, a una deficiente función pulmonar y a un incremento en el riesgo de desarrollo de alergias y asma. Los niños expuestos a la contaminación atmosférica sufren un menor desarrollo de la estructura y función del sistema respiratorio, lo que puede suponer unos pulmones más frágiles a lo largo de la vida. Los que viven en zonas más contaminadas, por ejemplo con partículas y NO_2 , tienen mayor riesgo de padecer más tos, más bronquitis agudas, más enfermedades infecciosas —como la neumonía— y más crisis asmáticas.

En España, las enfermedades del sistema respiratorio suelen figurar como la tercera causa de mortalidad. En 2014, ocasionaron un 11% de las defunciones de nuestro país (43.841 muertes; tasa de 94 fallecidos por cada 100.000 habitantes). La contaminación atmosférica sería un riesgo modificable de estas patologías.

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE EL SISTEMA CARDIOVASCULAR

Contrariamente a la creencia popular, la carga de enfermedad derivada de la exposición a la contaminación atmosférica es más elevada para las enfermedades cardiovasculares que para las respiratorias. Aunque el mecanismo de entrada en el organismo se produzca a través de la respiración, diversos contaminantes químicos tóxicos pueden llegar hasta el sistema cardiovascular directamente y causar todo tipo de lesiones. En general, las patologías cardiovasculares son la causa más importante de morbimortalidad en el mundo desarrollado, siendo la primera causa de muerte en España. En 2014, las enfermedades del sistema circulatorio provocaron un 30% de las defunciones de nuestro país (117.393 muertes; tasa de 253 fallecidos por cada 100.000 habitantes). Esto explica en parte que este peligro ambiental cause muchas más muertes relacionadas con estas enfermedades.

La investigación científica sugiere una relación causal entre la exposición a los contaminantes del aire y las enfermedades cardiovasculares, con mayor evidencia para las partículas (especialmente por las fracciones fina y ultrafina) que para los contaminantes gaseosos (como el O_3 , NO_2 , CO y SO_2). También han sido relacionadas estas enfermedades con fuentes específicas de contaminación, como el tráfico. Los grupos de población más susceptibles son las personas de edad avanzada, con enfermedad cardíaca previa o con algún otro factor de riesgo cardiovascular, como es el caso de la diabetes o la obesidad.

Diversas manifestaciones de la enfermedad cardiovascular se han asociado con la exposición a la contaminación del aire, tanto a corto como a largo plazo. Esto significa que el deterioro de la calidad del aire está implicado tanto en eventos cardíacos y agravamiento de las patologías preexistentes, como en el proceso de desarrollo de dichas enfermedades. Se

investigan todavía los mecanismos biológicos subyacentes que pueden explicar esta relación, entre los que se citan: la inflamación sistémica, el estrés oxidativo, el desequilibrio del sistema nervioso autónomo, los cambios en la respuesta vascular, la alteración de la estructura cardíaca, el aumento de la presión arterial y el desarrollo de la aterosclerosis.

En 2015, la Sociedad Europea de Cardiología elaboró un documento de consenso de expertos que resumía las relaciones entre la contaminación atmosférica y las enfermedades cardiovasculares. A corto plazo, la exposición a las partículas finas está asociada con la alteración del control cardíaco por el sistema nervioso autónomo y cambios significativos en muchos índices cardiovasculares, como la frecuencia cardíaca y la variabilidad del ritmo cardíaco. Además, este contaminante se ha relacionado con incrementos de la presión arterial y de la viscosidad plasmática, así como con modificaciones de la coagulación sanguínea (por incremento de los niveles de fibrinógeno, plaquetas y leucocitos), lo que favorece el desarrollo de trombos y coágulos. Todos estos factores pueden explicar una mayor incidencia de la cardiopatía isquémica, desencadenando infartos de miocardio y anginas de pecho. No obstante, los estudios epidemiológicos también observan asociaciones significativas para las arritmias, las insuficiencias cardíacas, los accidentes cerebrovasculares y las muertes por cualquier causa cardiovascular, especialmente en las personas con antecedentes previos de enfermedad cardíaca.

Otro fenómeno importante relacionado con la exposición a la contaminación del aire es la disfunción endotelial, considerada como una de las primeras manifestaciones de la enfermedad vascular y la arteriosclerosis (patología que consiste en el endurecimiento de las arterias, lo que dificulta la circulación sanguínea). El endotelio es una monocapa de células que reviste y protege la pared interna de los vasos sanguíneos frente al desarrollo de lesiones. Juega un papel fundamental en la

homeostasis vascular, es decir, en la regulación, mantenimiento y control de las propiedades y funciones cardiocirculatorias (por ejemplo, con mecanismos antitrombóticos o mediante el control de la presión arterial). Entre los factores emergentes que producen la disfunción del endotelio se encuentran los radicales libres del oxígeno (estrés oxidativo), por lo que la contaminación atmosférica podría también contribuir al daño de este endotelio y otras patologías cardiovasculares subyacentes.

Por otra parte, la exposición crónica y mantenida a la contaminación atmosférica también promueve la morbimortalidad cardiovascular en un grado significativamente mayor que la exposición aguda. Con el tiempo, la placa formada en la aterosclerosis se endurece y estrecha las arterias, lo que limita el flujo sanguíneo hasta el punto de poder ser detenido, de forma análoga a lo que ocurriría con el caudal del agua en una tubería atascada. Esto podría derivar en una cardiopatía isquémica, la complicación cardiovascular predominante con la exposición al aire contaminado, o en un accidente cerebrovascular. Actualmente se investigan los mecanismos por los cuales las partículas podrían contribuir al inicio, progresión, desestabilización o ruptura de la placa aterosclerótica, desencadenando un episodio cardiovascular grave. Una de las líneas que se analiza, como en el programa estadounidense MESA Air¹², es el posible engrosamiento más rápido de esta placa en aquellos individuos que soportan concentraciones más altas de contaminantes atmosféricos. En cualquier caso, la evidencia científica actual es suficiente como para considerar esta exposición ambiental como un factor de riesgo modificable para este tipo de enfermedades crónicas.

12 . MESA Air: Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution.

EFFECTOS CANCERÍGENOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El cáncer es un proceso por el cual las células cancerosas adquieren la capacidad de multiplicarse y diseminarse por todo el organismo sin control. Puede aparecer prácticamente en cualquier lugar del cuerpo. El tumor suele invadir el tejido circundante y puede provocar metástasis en puntos distantes del organismo. Se estima que un 40% de los cánceres se deben a la acción de agentes externos —por tanto, factores de riesgo modificables— que actúan sobre el organismo, causando alteraciones en las células. Para los agentes carcinogénicos, se considera que no existe umbral de concentración en el que no se esperen efectos adversos para la salud. Dicho de otro modo, cualquier nivel de exposición a sustancias que producen cáncer es inseguro, aunque cuanta más dosis se reciba más daños se pueden producir sobre la salud.

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

Un número elevado de los contaminantes anteriormente mencionados están relacionados con el cáncer de pulmón, que

es uno de los más comunes entre la población urbana, tiene muy mal pronóstico y su letalidad es muy elevada. La supervivencia sigue siendo obstinadamente corta, especialmente entre aquellos detectados en fases avanzadas, siendo del 10% en hombres y del 15% en mujeres a los cinco años desde el diagnóstico. En el mundo, este tumor maligno ocupa la primera posición en incidencia (1.242.000 casos nuevos en hombres y 583.000 en mujeres en 2012) y mortalidad por cáncer (1.099.000 hombres y 491.000 mujeres para el mismo año). Alrededor de un 10-15% de todos los casos se producen en no fumadores. Además, un 6% de todas las muertes por cáncer de pulmón, se atribuyen a la contaminación del aire ambiente. En España, los tumores de bronquios y de pulmón son también los responsables de la mayor mortalidad por cáncer. En 2014, la incidencia fue de 76,8 casos por 100.000 habitantes y fallecieron por esta causa 21.251 personas (17.194 hombres y 4.057 mujeres).

El cáncer de pulmón es una enfermedad de etiología multifactorial. Entre los factores de riesgo, el más importante es el consumo de tabaco, responsable de un 80-90% de los casos. La alta prevalencia de tabaquismo explica en gran medida esta pesada carga y que las intervenciones se hayan centrado sobre todo en la reducción del hábito tabáquico, además de un diagnóstico temprano y tratamientos mejorados. El riesgo de los fumadores es hasta 9 veces superior al riesgo de los no fumadores. El tabaquismo pasivo es también un factor de riesgo demostrado en ambientes interiores, dado que implica la exposición a nicotina, carcinógenos (benceno, benzo(a)pireno, entre otros) y otros compuestos tóxicos. Además del fuerte aumento del riesgo de cáncer de pulmón que conlleva esta adicción, fumar se asocia con otras localizaciones tumorales, como el cáncer de la cavidad oral y nasal, de faringe y de laringe, entre otras. En general, el riesgo de desarrollar cáncer aumenta en proporción a cuánto se fuma y durante cuánto tiempo. Dejar de fumar, sea cual sea la edad, evita que aumente el riesgo de cáncer.

Por otro lado, el radón residencial es la segunda causa de cáncer de pulmón y la primera en sujetos que nunca han fumado. Declarado como carcinógeno para humanos por la IARC, este gas radiactivo, incoloro e inodoro se produce naturalmente cuando se descompone el uranio en el suelo y las rocas. Emanado de manera natural por la superficie terrestre y se localiza tanto en el aire ambiente, a baja concentración, como en el interior de las edificaciones, donde tiende a acumularse ocasionando la exposición de sus ocupantes. El radón se desintegra en elementos sólidos radiactivos conocidos como partículas de la progenie del radón (como polonio-218, polonio-214 y plomo-214), que pueden adherirse al polvo y a otras partículas y ser inhaladas hasta los pulmones. A medida que el radón y la progenie de este se desintegran en el aire, liberan radiación que puede dañar el ADN de las células en el interior del cuerpo.

En España, las mayores concentraciones de radón en ambientes interiores se presentan en Galicia, debido a la naturaleza granítica del subsuelo y porque en áreas rurales muchas edificaciones están construidas con granito. Un estudio conducido por investigadores de la Universidad de Santiago de Compostela ha mostrado que la mortalidad atribuible solo al radón, por encima de 200 Bq/m^3 , es del orden del 3-5% para el cáncer de pulmón, mientras que la exposición combinada del tabaco y el radón aumentaría dicho efecto hasta el 22%.

Por otra parte, existe una abundante evidencia proveniente de estudios epidemiológicos mostrando el aumento de riesgo de cáncer de pulmón asociado a la contaminación del aire ambiente. El tráfico o determinadas sustancias, como las partículas y el NO_2 , se han asociado con un mayor riesgo de padecer esta localización tumoral. En Europa, el proyecto ESCAPE encontró relación entre la exposición a largo plazo de las partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ y el incremento del riesgo de padecer cáncer de pulmón. Además, estimaron que por cada aumento del tráfico en más de 4.000 vehículos diarios, dentro de un radio de 100 m

de la residencia, se produce un aumento del 9% en el riesgo de incidencia de cáncer de pulmón.

Finalmente, otros tumores están siendo analizados, pero las evidencias científicas aún no son concluyentes. El cáncer de mama se ha encontrado asociado principalmente con el NO_2 , aunque también se estudia su relación con los contaminantes relacionados con el tráfico. La leucemia mieloide, causada por el benceno en adultos, está en proceso de investigación con el tráfico y el NO_2 tanto para niños como para adultos.

EL RETO DE CONCILIAR CIENCIA, POLÍTICA Y SOCIEDAD PARA UN AIRE DE CALIDAD

Los ambientes más sanos preservan mejor la salud. Reducir la contaminación del aire dentro y fuera de los hogares salvaría millones de vidas y paliaría los daños en la salud de muchos millones más en todo el mundo. Este reto medioambiental y sanitario exige la interacción coordinada entre ciencia, política y sociedad. La investigación científica sigue siendo precisa para analizar los graves efectos que ocasiona en la salud, así como para determinar la magnitud del impacto en términos de salud pública y los beneficios potenciales de la reducción de la exposición a los contaminantes atmosféricos. Estos descubrimientos de la ciencia impulsan la toma de decisiones sobre políticas que minimicen la carga de este factor de riesgo ambiental y obligan a la revisión periódica del marco normativo. Aunque la responsabilidad de los gobiernos es elevada en la lucha contra la contaminación atmosférica, es evidente que la resolución de los grandes problemas ambientales requiere de un fuerte compromiso social y personal. Para la sociedad de nuestro tiempo, la calidad ambiental del entorno es precisamente una de las preocupaciones

más importantes. Por tanto, la adecuada protección y conservación del aire que respiramos representa uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta la humanidad.

LA CARGA DE ENFERMEDAD ATRIBUIBLE A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: UN GRAN PESO EN EL MUNDO EN TÉRMINOS DE SALUD PÚBLICA

Según las últimas estimaciones de la OMS, “una de cada ocho muertes que suceden en el mundo se puede atribuir a la exposición a la contaminación atmosférica”, lo que constituye el riesgo ambiental para la salud más importante del mundo. Globalmente, en el año 2012, unos siete millones de personas murieron prematuramente como consecuencia de la contaminación atmosférica, considerando la exposición tanto en ambientes interiores como exteriores. Como muchas personas soportan el solapamiento de exposiciones, la mortalidad atribuida a las dos fuentes —interior y exterior— no puede simplemente sumarse, de ahí la estimación total de unos siete millones de muertes en 2012 (y no unos ocho millones que sumarían los datos totales de las tablas que a continuación se muestran).

El mayor impacto de la contaminación del aire interior se produce en los países de ingresos bajos y medios. Las regiones que la OMS denomina Asia Sudoriental (sobre todo, India) y Pacífico Occidental (especialmente, China) soportan la carga de 1,69 y 1,62 millones de muertes, respectivamente. África ocupa el tercer lugar en este *ranking* indeseable, con unas 600.000 muertes, seguido del Mediterráneo Oriental (200.000 muertes), Europa (99.000 muertes) y las Américas (81.000 muertes). En los países de ingresos elevados se producen las restantes 19.000 muertes. Esta desigual vulnerabilidad en la salud responde al complicado entramado social y económico del

mundo, donde las condiciones de vida de las clases más pobres están sumidas en una situación de privación crónica —alimentación, viviendas, escuelas, equipamientos sanitarios y asistenciales— que se ve agravada por el riesgo que supone además respirar aire contaminado.

En relación con la contaminación del *aire ambiente*, la carga de enfermedad se produce también en países de ingresos bajos y medios (88%), donde es de esperar que la estimación sea mayor, y por tanto más preocupante, en los años siguientes, puesto que los índices de contaminación siguen creciendo en estos países. La mortalidad atribuible a la polución del aire se produce, sobre todo, por enfermedades cardiovasculares (80%), seguidas de las respiratorias, como la EPOC (11%) y el cáncer de pulmón (6%) (tabla 1). De especial relevancia es el hecho de que la mortalidad debida a infecciones agudas de las vías respiratorias bajas se produce en la infancia, en niños menores de cinco años (127.000 muertes atribuibles al aire ambiente). En este caso, provoca mayor carga de enfermedad el aire degradado que se encuentra en hogares mal ventilados en la mayor parte de los países menos desarrollados (534.000 muertes). En el interior de estas viviendas, por el uso de combustibles contaminantes, pueden alcanzarse concentraciones de partículas finas 100 veces superiores a las aceptables. Este entorno degradado casi duplica el riesgo de neumonía en la niñez, lo que explica la mortalidad infantil estimada.

En Europa, la lacra de respirar un aire contaminado supone unas 400.000 muertes prematuras anuales y un coste económico estimado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico entre 330.000 y 940.000 millones de euros (entre el 3 y el 9% del PIB de la UE). Todas estas cifras no dejan otra opción que emprender acciones sin más demora y actuar responsablemente para proteger y conservar la atmósfera, o lo que es lo mismo, nuestra propia salud, dado que es también lo que está en juego.

TABLA 1

MORTALIDAD ATRIBUIBLE A NIVEL MUNDIAL A LA CONTAMINACIÓN INTERIOR Y AMBIENTE EN 2012, POR ENFERMEDAD

ENFERMEDAD	NÚMERO DE MUERTES ATRIBUIBLES AL AIRE INTERIOR (%)	NÚMERO DE MUERTES ATRIBUIBLES AL AIRE AMBIENTE (%)
Cardiopatía isquémica	1.096.000 (26)	1.505.000 (40)
Accidente cerebrovascular	1.462.000 (34)	1.485.000 (40)
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	928.000 (22)	389.000 (11)
Cáncer de pulmón	272.000 (6)	227.000 (6)
Infecciones agudas de las vías respiratorias bajas	534.000 (12)	127.000 (3)
Total	4.292.000	3.733.000

Fuente: OMS (Burden of Disease from Ambient and Household Air Pollution for 2012).

TABLA 2

MORTALIDAD ATRIBUIBLE A NIVEL MUNDIAL A LA CONTAMINACIÓN INTERIOR Y AMBIENTE EN 2012, POR EDAD Y SEXO

POBLACIÓN (EDAD)	NÚMERO DE MUERTES ATRIBUIBLES AL AIRE INTERIOR (%)	NÚMERO DE MUERTES ATRIBUIBLES AL AIRE AMBIENTE (%)
Niños (<5 años)	534.000 (13)	127.000 (3)
Mujeres (>25 años)	1.767.000 (41)	1.632.000 (44)
Hombres (>25 años)	1.991.000 (46)	1.973.000 (53)

Fuente: OMS (Burden of Disease from Ambient and Household Air Pollution for 2012).

EVALUACIÓN DE IMPACTO EN SALUD: UNA METODOLOGÍA PARA INCORPORAR EL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO EN EL PROCESO DE TOMA DE DECISIONES POLÍTICAS

La Evaluación de Impacto en Salud (EIS), propuesta por la OMS en 1999, promueve la transferencia del conocimiento científico —como la investigación epidemiológica— a las decisiones políticas que afectan a la salud. Potencia, además, la

implicación de los responsables políticos, la colaboración intersectorial y la participación de la sociedad. Estos estudios responden a la necesidad de evaluar el efecto de las políticas en la salud que, aunque no procedan del ámbito sanitario, determinan parte de la misma. En relación con la contaminación atmosférica, la estimación de los impactos en la salud constituye una forma directa de comunicar las claves de ese problema medioambiental para la sociedad en su conjunto.

Para estos análisis se desarrolla un proceso por el cual se analiza la evidencia científica disponible para estimar los potenciales impactos sobre la salud de la población, que vendrían asociados con un cambio en la calidad del aire determinado por la implantación de una serie de medidas. Para el supuesto de la exposición al aire contaminado y la salud, aunque las estimaciones de efecto de los estudios epidemiológicos son débiles (es decir, las funciones concentración-respuesta son relativamente bajas), el impacto en la salud de la población es elevado. El motivo de esta aparente paradoja se debe, por un lado, a que la contaminación atmosférica se relaciona con enfermedades muy frecuentes en la población, como el asma o los infartos de miocardio. Por otro lado, influye la frecuencia de la exposición que, en este caso, se considera que toda la población está expuesta.

En función de la información disponible, se cuantifica el impacto a través de una serie de etapas (figura 7): 1) identificación de los indicadores de la salud (por ejemplo, hospitalizaciones cardiacas o mortalidad respiratoria); 2) cálculo de la frecuencia de esos efectos en la salud en la población analizada (por ejemplo, número total de ingresos hospitalarios por causas cardiacas o de muertes por causas respiratorias en una población en un periodo determinado); 3) evaluación de la exposición mediante la selección de un indicador de la contaminación atmosférica (por ejemplo, niveles de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos de las redes de vigilancia de la calidad del aire); 4) selección de las funciones concentración-respuesta

en relación con la morbilidad, investigadores de la Escuela de Salud Pública Johns Hopkins Bloomberg estimaron que una reducción a corto plazo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2,5}$ ahorraría unas 11.000 hospitalizaciones por causas cardiovasculares y respiratorias entre los ancianos norteamericanos participantes del estudio Medicare.

En Europa, el programa APHEIS¹³ (1999-2003) cuantificó por primera vez en distintas ciudades europeas el impacto atribuible a una reducción de la exposición a largo plazo de $\text{PM}_{2,5}$. Los escenarios de reducción anual de $\text{PM}_{2,5}$ (desde la concentración registrada por la ciudad hasta 25, 20 o $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se establecieron teniendo en cuenta el fuerte debate que existía en Europa antes de que fueran regulados los valores límite de este contaminante en la Directiva de 2008, sobre calidad del aire ambiente y aire más limpio para Europa. Se estimó que casi 17.000 muertes se podrían prevenir anualmente, incluyendo más de 11.000 muertes por causas cardiopulmonares y casi 2.000 por cáncer de pulmón, si la exposición a largo plazo a las $\text{PM}_{2,5}$ fuera reducida hasta $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en cada una de las 23 ciudades europeas participantes en APHEIS. Dicha reducción supondría un incremento de la esperanza de vida entre un mes y más de dos años en función de la ciudad. El porcentaje de disminución de la mortalidad prematura podría haber aumentado hasta más de siete veces (3% versus 0,4%) si se hubiera regulado en la Directiva europea de 2008 el valor guía anual recomendado por la OMS para este contaminante ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A pesar del consejo científico, el valor límite anual de $\text{PM}_{2,5}$ regulado finalmente por dicha Directiva fue de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta el año 2015 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el año 2020).

Posteriormente, el proyecto europeo APHEKOM¹⁴ (2008-2011) estimó el impacto de reducir a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la exposición a largo plazo a $\text{PM}_{2,5}$ en 25 ciudades europeas (12 países) con una

13. APHEIS: Air Pollution and Health: A European Information System.

14. APHEKOM: Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe.

población cercana a 39 millones. Si la concentración de este contaminante no superara la recomendación de la OMS, anualmente podrían evitarse 19.000 defunciones prematuras por todas las causas, de las cuales 2.719 se producirían en seis ciudades españolas participantes del proyecto (Barcelona, Valencia, Sevilla, Bilbao, Granada y Málaga). El coste económico estimado por este programa del impacto en la salud ascendería a 31.500 millones de euros anuales para todas las ciudades participantes. Los resultados de este tipo de análisis en Europa informan y aportan nuevos argumentos en relación con las regulaciones futuras de los límites de concentración para $PM_{2,5}$ en las directivas europeas y animan a invertir esfuerzos para alcanzar los valores guía de la OMS.

En el marco del proyecto SERCA¹⁵ (2008-2012) se cuantificó en España el impacto atribuible a una reducción de la exposición a largo plazo a las concentraciones de $PM_{2,5}$. Los escenarios de reducción de $PM_{2,5}$ se establecieron considerando una batería de medidas aprobadas y con potenciales repercusiones en la calidad del aire del territorio español en el futuro. Entre estas medidas, destacarían las que se dirigían a conseguir una reducción de emisiones en el transporte y en procesos que requieren combustión. Globalmente, la implantación de medidas de control de la polución reduciría las concentraciones de $PM_{2,5}$ en $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta aparente mínima mejora de la situación atmosférica redundaría en miles de muertes prematuras que podrían ser evitadas anualmente, estimadas entre 2.365 y 4.163 (tasa bruta entre 8 y 15 muertes por 100.000 habitantes). Del total de muertes, entre 186 y 777 (1-5 por cada 100.000 habitantes) se deberían a cáncer de pulmón y entre 654 y 1.817 (2-6 por cada 100.000 habitantes) a cardiopatía isquémica.

En conclusión, las acciones gubernamentales procedentes de distintos ámbitos, no solo del sector de la salud, son eficaces

15. SERCA: Sistema de Evaluación de Riesgos por Contaminación Atmosférica.

para actuar en la mejora de la salud de la población y para combatir los riesgos ambientales que la amenazan. Estos estudios permiten predecir y observar el enorme impacto positivo que puede derivarse de la implantación de políticas de control de la calidad del aire, así como informar y mejorar los complicados procesos de toma de decisiones.

ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN: LA MEJORA REAL DE LA CALIDAD DEL AIRE SE TRADUCE EN UN IMPACTO POSITIVO EN LA SALUD PÚBLICA

Un aire más limpio es sinónimo de mejor salud. Indiscutiblemente, la reducción de la exposición de la población a sustancias nocivas presentes en el ambiente supone un aumento en el bienestar y en la calidad de vida. Esto se ha probado empíricamente mediante los estudios de intervención, que valoran los beneficios que se producen en la salud como consecuencia de mejoras observadas en la calidad del aire, proporcionando una información muy valiosa para la toma de decisiones de los gestores y políticos. Mediante estos estudios se valora la evidencia experimental o semiexperimental de los efectos de la reducción de la contaminación atmosférica.

Mejorar la calidad del aire genera beneficios en la salud incluso mayores que las estimaciones de riesgo obtenidas en estudios epidemiológicos. La aplicación de medidas tecnológicas (por ejemplo, cambios de composición de los combustibles o modernización de procesos industriales) y no tecnológicas (como establecimiento de zonas de bajas emisiones en las ciudades o fomento del uso de la bicicleta) permiten reducir marcadamente las emisiones contaminantes. Combinaciones de este tipo de intervenciones han logrado reducir los síntomas respiratorios y las visitas hospitalarias por asma, ahorrar muertes prematuras o aumentar la esperanza

de vida, entre otros beneficios sustanciales en términos de salud pública.

ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN CON EFECTOS A CORTO PLAZO

Las investigaciones científicas muestran que los cambios rápidos a corto plazo en los niveles de los contaminantes del aire suponen una mejora significativa en términos de salud pública. Estos estudios revelan que la introducción rápida de intervenciones que mejoran la calidad del aire, como por ejemplo cambios en el tráfico o en las emisiones industriales, pueden reducir la morbilidad asociada con la contaminación atmosférica a corto plazo. Un caso práctico es la celebración de Olimpiadas, dado que supone la puesta en marcha de una batería de medidas en las ciudades organizadoras del evento, que suele conducir a un descenso de contaminantes del aire a corto plazo.

Durante la celebración de los Juegos Olímpicos de Pekín en 2008, el Gobierno chino implantó medidas muy estrictas para controlar la calidad del aire, 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 temporal de industrias muy contaminantes o el aumento de zonas verdes. La puesta en marcha de todas las medidas supuso que la emisión de contaminantes tales como el CO, el SO₂, el NO₂ o las PM descendiera en un 61%, 39%, 11% y 20% respectivamente. Un estudio científico estimó una reducción significativa de hospitalizaciones por crisis asmáticas paralela a la bajada de los niveles de contaminantes, también observada en los Juegos Olímpicos de Corea en 2002. Otros análisis mostraron las mejoras en la variabilidad del ritmo cardiaco en ancianos y taxistas, así como la reducción de biomarcadores de inflamación respiratoria aguda en escolares. El ahorro en el coste sanitario durante los días de celebración de las Olimpiadas también fue sustancial.

ESTUDIOS DE INTERVENCIÓN CON EFECTOS A LARGO PLAZO

Otros estudios han examinado directamente si los beneficios en la salud pública pueden ser mostrados como resultado de un descenso planificado o imprevisto de la contaminación atmosférica a largo plazo. El impacto positivo en la salud es mayor a largo plazo, dado que se reduce la tendencia de la media anual de las muertes por todas las causas y por causas específicas, en particular por causa respiratoria y cardiovascular. Paralelamente, conlleva un aumento de la esperanza de vida.

En este sentido, un ejemplo muy conocido es el ocurrido en el Valle de Utah (EE UU), donde se produjo un conflicto laboral que paró la actividad de una gran acería durante más de un año, entre agosto de 1986 y septiembre de 1987. Las concentraciones de PM_{10} en el ambiente descendieron en un 50%, 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 solo se incrementaron hasta los niveles anteriores a la huelga después de que el conflicto acabara. La mortalidad descendió un 3,2% y se redujo el absentismo escolar de los niños.

En EE UU, la US EPA estima de forma periódica las reducciones alcanzadas en la concentración media nacional de $PM_{2,5}$. Entre los años 2000 y 2010, se calculó que se había reducido en un 27%. El científico Pope y sus colaboradores estimaron en 51 ciudades de 211 condados de EE UU los cambios producidos en la esperanza de vida en los años ochenta y noventa, como consecuencia de la reducción de $PM_{2,5}$ ocurrida entre los años 1980 y 2000. Un descenso de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de las $PM_{2,5}$ se asoció con un aumento estimado de la esperanza de vida de $0,61 \pm 0,20$ años (15%) en el área de estudio.

En Tokio se aprobaron una serie de normas para reducir las emisiones de los vehículos diésel. Durante el periodo 2006-2008 se observó un descenso de los niveles de concentración

de NO₂ y partículas, que ha sido asociado con la reducción de las tasas de enfermedades cerebrovasculares.

En Delhi se adoptaron medidas radicales para mejorar la calidad del aire. A modo de ejemplo, se cambiaron todos los vehículos comerciales a gas natural comprimido y se cerraron industrias contaminantes situadas en áreas residenciales entre 2000 y 2002. Tras estas intervenciones, se observaron significativas mejoras en la salud respiratoria y estos efectos fueron mucho más marcados entre los individuos que pasaban gran parte de su tiempo al aire libre.

Estudios europeos, como la cohorte SAPALDIA¹⁶, han mostrado que una pequeña mejora en la calidad del aire en Suiza mantenida durante 10 años ha supuesto un descenso en el registro de síntomas respiratorios de los niños y los adultos, e incluso se ha logrado atenuar la pérdida de la función pulmonar de adultos.

Por otro lado, las iniciativas relacionadas con el tráfico suelen ser muy beneficiosas en términos de calidad del aire y de salud. Se describen ejemplos tales como las zonas de bajas emisiones —implantadas ya en muchas ciudades europeas—, la reducción de la velocidad o el uso de las circunvalaciones para el tránsito rodado que bordean los núcleos urbanos. A modo de ejemplo, Londres estableció en 2008 una amplia zona de bajas emisiones en la que no podían entrar los vehículos diésel más antiguos y más contaminantes (camiones, autobuses, etc.), excluyendo coches y motocicletas. Los estudios posteriores han puesto de manifiesto que las consultas por enfermedades respiratorias y prescripciones por asma se han reducido entre un 5% y un 10% en los pacientes más expuestos a la intervención en comparación con los que no están expuestos.

Por otra parte, los cambios en los combustibles para la calefacción y el transporte suponen una forma de disminuir a

16. SAPALDIA: Swiss Cohort Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults.

largo plazo la contaminación atmosférica ocasionada. Una muestra de ello se produjo en Irlanda, donde el Gobierno prohibió la venta de carbón en la ciudad de Dublín en 1990. Este hecho condujo a una reducción inmediata y permanente en la media mensual de las concentraciones de SO_2 (34%) y de partículas (71%). 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 6%, por causa respiratoria del 15%, y por causa cardiaca del 10%.

Por otro lado, el Distrito del Aire del Valle de San Joaquín (California, EE UU) emite diariamente las declaraciones del estatus para la quema de leña en el hogar durante el invierno. En función de la calidad del aire de cada condado, el ciudadano conoce a diario si tiene permitida la quema en su residencia según el tipo de dispositivo del que disponga. Un estudio de investigación ha estimado que esta intervención ha reducido el riesgo de mortalidad por cardiopatía isquémica en un 4,8% y, por enfermedades cerebrovasculares, en un 5,4%.

Otro ejemplo destacado ocurrió en Hong Kong en 1990, donde se introdujo repentinamente una medida por la que el contenido de azufre en los combustibles no debía superar el 0,5% por peso. Después del primer año de esta intervención, se observó que la media de reducción en SO_2 fue del 53% y también descendieron otros contaminantes atmosféricos, entre los que se encontraban las PM_{10} . 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. Los síntomas respiratorios y la mortalidad en la población infantil también descendieron. Asimismo, se constató un descenso de la tendencia anual en las muertes en un 2% (4% en respiratorias y 3% en cardiovasculares). La intervención a

largo plazo ha supuesto paralelamente un aumento en la esperanza de vida de 0,73 años.

En resumen, los estudios de intervención ilustran cómo la implantación de planes y programas conllevan una reducción efectiva de la contaminación atmosférica que se acompaña de beneficios sustanciales y apreciables en términos de salud pública. Estos análisis confirman la evidencia empírica de que la morbimortalidad se reduce cuando mejora la calidad del aire, lo que supone además otro argumento para apoyar la causalidad de las asociaciones observadas en los estudios epidemiológicos. Los resultados obtenidos sirven de argumentos para persuadir a los responsables políticos sobre la importancia de adaptar medidas de control de las emisiones contaminantes.

POLÍTICAS PÚBLICAS DE CONTROL Y GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

El derecho a la salud está recogido en la Declaración Universal de Derechos Humanos (1948) en su artículo 25, si bien fue en la Constitución de la OMS (1946) cuando se proclamó por primera vez el derecho a “disfrutar del nivel más alto posible de salud”. Del respeto y cumplimiento de este derecho, como del de todos los demás derechos humanos, son responsables los estados. Así, por un lado, los gobiernos deben destinar los recursos necesarios para garantizar que la población mantenga un estado óptimo de salud. Por otro, deben crear las condiciones que permitan que todas las personas puedan vivir lo más saludablemente posible.

Las políticas son las respuestas de los estados a las demandas sociales, que vienen marcadas por un uso estratégico de los recursos disponibles —siempre limitados—. Estas medidas, a priori, reflejan las necesidades, los intereses y las preferencias más importantes de una sociedad, y su puesta en marcha implica

un proceso de toma de decisiones para alcanzar unos objetivos. Las acciones de gobierno, bien sean políticas sanitarias como no sanitarias, tienen claras repercusiones sobre la salud de la población.

El interés y la preocupación social que despierta la contaminación atmosférica ha llevado al establecimiento de políticas de control de la calidad del aire, que persiguen prevenir o disminuir los efectos nocivos para la salud humana y para el medio ambiente en su conjunto. Se trata, por tanto, de marcar los límites del uso del aire como recurso natural. En este sentido, la calidad del aire significa mantener los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos por debajo de los límites que señalan las normativas desarrolladas por los países. Las intervenciones públicas sobre contaminación atmosférica se fundamentan básicamente en dos estrategias: 1) la reducción de las emisiones multisectoriales y de la exposición, que sería la opción más deseable; y 2) la eliminación de las sustancias ya generadas mediante técnicas adecuadas.

Las redes de vigilancia de la calidad del aire son las que deben controlar el cumplimiento de la legislación y, si se detectan desviaciones de la misma por las emisiones de los focos contaminantes, establecer medidas y planes de actuación para una rápida actuación, sobre todo en situaciones de emergencia. Además, estas redes tienen entre sus objetivos informar al ciudadano de la calidad del aire y de la concentración de contaminantes, así como predecir el comportamiento de los contaminantes según las condiciones meteorológicas. Los procesos de recogida de datos se hallan normalizados para que la información sea comparable entre estaciones de medida y distintas zonas geográficas, como ciudades o países. Los registros de estas redes proporcionan soporte a los programas de prevención de la contaminación atmosférica.

Dado que el deterioro de la calidad del aire es un problema ambiental tanto local como transfronterizo, las redes y las

medidas de control han de establecerse desde el ámbito municipal al internacional. Empezando por la escala mundial, los países ratifican diversos acuerdos internacionales que tienen como objetivo la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera, así como la puesta en marcha de programas de vigilancia, de intervenciones y de investigación para lograr dicha reducción. Estos acuerdos conciernen a fenómenos de contaminación atmosférica a gran escala que necesitan de una gobernanza internacional, como el transporte de contaminantes a larga distancia, la destrucción de la capa de ozono o el calentamiento climático. El control, en este caso, precisa de redes mundiales, como la red BAPMON¹⁷ que se encarga del análisis y evolución de datos sobre gases de efecto invernadero o del agujero de la capa de ozono, o redes transnacionales, como la red CAMP¹⁸ que recibe datos sobre contaminación del nordeste del Atlántico y analiza sus efectos sobre el medio marino.

A los compromisos internacionales globales se suma la legislación europea —con reglamentos, directivas y decisiones—, creando un marco de acción contra la contaminación atmosférica que deben cumplir los países miembros. Por un lado, se regulan límites de emisión de contaminantes específicos estableciendo valores objetivo (no vinculantes legalmente y que pueden superarse por causas justificadas) y valores límite (vinculantes jurídicamente y que no deben superarse). Por otro lado, se fijan techos nacionales de emisión, que son las cantidades máximas anuales de sustancias que puede emitir un país, limitando por ejemplo las emisiones de contaminantes acidificantes y eutrofizantes, así como los precursores del ozono. Además, se crean normativas más específicas dirigidas a sectores contaminantes, como la industria (como las grandes

17. BAPMON: Background Air Pollution Monitoring Network.

18. CAMP: Comprehensive Atmospheric Monitoring Programme.

instalaciones de combustión o la incineración de residuos) o los vehículos (normas Euro), o a la calidad de los combustibles.

La implantación de estándares europeos de calidad del aire para algunas sustancias se establece por criterios de coste-beneficio y suele ser progresiva o por fases cada vez más restrictivas en los niveles de concentración permitidos. Se llevan a cabo continuas actualizaciones con el fin de regular nuevas sustancias o revisar las ya legisladas. Redes europeas vigilan la calidad del aire en Europa, como la red EMEP¹⁹ dedicada a la contaminación transfronteriza en los países de la UE. Esta red cuenta con una serie de estaciones distribuidas por los países de la UE, con el fin de suministrar información a los gobiernos sobre la concentración y la deposición de los contaminantes del aire.

En España, las comunidades autónomas y las entidades locales, según sus competencias establecidas en la legislación vigente, son responsables de gestionar las redes regionales o urbanas de calidad del aire. En líneas generales, las políticas ya implantadas en el ámbito europeo, transpuestas a nuestro marco normativo, han logrado un progreso considerable en la reducción de emisiones de ciertos contaminantes atmosféricos, como el SO₂, el plomo o los compuestos orgánicos volátiles. Sin embargo, siguen siendo preocupantes otros contaminantes, como el O₃ a escala nacional o el NO₂ en nuestras grandes ciudades.

En el ámbito urbano, distintas ciudades han abordado diferentes iniciativas contra la contaminación atmosférica, como restricciones al tráfico, fomento del transporte público, cambio de la flota de transporte y servicios públicos por vehículos híbridos o eléctricos, reducción de la velocidad en las carreteras (cinturones periféricos), favorecer el uso de la bicicleta con carriles específicos, peatonalización de calles, acceso restringido a residentes en determinadas áreas, peaje urbano o aprobación de protocolos específicos para episodios de alta

19. EMEP: European Monitoring and Evaluation of Long-Range Air Pollutants.

contaminación de determinados contaminantes (como el NO_2). A pesar de las grandes mejoras observadas en la reducción de contaminación en las ciudades, todavía es preciso un mayor control de la calidad del aire para proteger a la población urbana y más programas de sensibilización ambiental que aborden esta problemática cuestión.

Una de las grandes asignaturas pendientes en la gestión de la calidad del aire es la estimación y el control de las emisiones contaminantes a la atmósfera derivadas del sector agropecuario. Esto no suele constituir una prioridad en los programas regionales o nacionales. Una serie de limitaciones pueden explicar este hecho, como la incertidumbre asociada a los datos de emisión de este sector debida a las diferencias existentes en las prácticas agrícolas entre regiones geográficas, la ausencia de estadísticas acerca del uso de fertilizantes y poblaciones animales o la carencia de estimaciones reales de la quema de biomasa, entre otros.

Finalmente, es importante destacar que la lucha contra la contaminación atmosférica no se reduce a las políticas que van dirigidas estrictamente a la calidad del aire. La integración con otras políticas sectoriales es necesaria y complementaria, como la Directiva IPPC (Directiva 96/61/CE, de control integrado de la contaminación), que tiene por objeto regular y controlar de forma integrada las emisiones a los distintos medios (aire, agua, suelos, residuos). Otras políticas influyentes en la calidad del aire son las que se dirigen a la generación de energía —sobre todo las que priman las fuentes renovables— y a la eficiencia energética, o las que promueven cambios estructurales, como la planificación del uso del suelo. Otro ejemplo sería el desarrollo urbanístico, especialmente cuando se planifica a una distancia razonable de grandes vías de tráfico y de industrias contaminantes, así como considerando la dirección predominante de los vientos. Por último, especialmente importante es la coordinación entre las políticas de calidad del aire con las que van dirigidas a combatir el cambio climático.

LOS VALORES DE CALIDAD DEL AIRE REGULADOS POR LA NORMATIVA EUROPEA SUPERAN LAS RECOMENDACIONES DE LA OMS

Las guías de calidad del aire de la OMS recomiendan una serie de niveles máximos de concentración de contaminantes que no deberían sobrepasarse para una adecuada protección de la salud. En general, los valores guías de la OMS, que atienden estrictamente a criterios de salud, son más exigentes que los establecidos por las normas europeas. A pesar de los progresos realizados para controlar emisiones nocivas en las últimas décadas, en líneas generales, los países europeos aún se encuentran lejos de alcanzar estos valores recomendados por la OMS para una adecuada protección de la salud de la población. La tabla 3 muestra las marcadas diferencias entre los valores legislados en Europa y las directrices de la OMS. Cabe destacar que la recomendación de la OMS para $PM_{2,5}$ ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es menos de la mitad que el valor límite europeo ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

TABLA 3

COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES REGULADOS POR LA DIRECTIVA EUROPEA Y LOS VALORES GUÍA DE LA OMS PARA DETERMINADOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS. EXPRESADOS EN $\mu\text{g}/\text{m}^3$

PARÁMETRO DE REFERENCIA	VALOR LÍMITE ANUAL		VALOR LÍMITE DIARIO		VALOR LÍMITE HORARIO	
	DIRECTIVA EUROPEA ¹	OMS ²	DIRECTIVA EUROPEA ¹	OMS ²	DIRECTIVA EUROPEA ¹	OMS ²
PM ₁₀	40	20	50	50		
PM _{2,5}	Fase I: 25 (2015) Fase II: 20 (2020)	10		25		
NO ₂	40	40			200	
O ₃			120	100		
SO ₂			125	20	350	

1. Directiva europea: Valor de la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

2. OMS: Valor guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1999; WHO, 2005). WHO (1999): *Air Quality Guidelines for Europe*. 2ª ed., WHO Regional Office for Europe, Copenhagen; WHO (2005): *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide*. Global update.

La Agencia Europea de Medio Ambiente ha manifestado que se han reducido emisiones al aire de diversas fuentes en el periodo 2002-2011, principalmente de SO₂, CO, benceno y plomo. A pesar de este hecho positivo, este organismo ha expresado su preocupación dado que la población europea sigue estando expuesta a niveles de contaminación atmosférica que sobrepasan las directrices de la OMS. Así, se estima que más del 90% de los europeos todavía soporta niveles de O₃ y PM_{2,5} por encima de los valores guía de la OMS, los parámetros más problemáticos para la salud en Europa. Por otra parte, España cumple con el estándar europeo de PM_{2,5}, pero supera los de PM₁₀, NO₂, O₃ y en mucha menor proporción de SO₂. Esto provoca que gran parte de nuestra población esté expuesta a niveles insalubres de polución.

'AÑO DEL AIRE': NUEVO PAQUETE EUROPEO DE POLÍTICAS DE CALIDAD DEL AIRE

La Comisión Europea (CE) declaró 2013 el "Año del Aire". En esa fecha, la CE aprobó un nuevo paquete de políticas que contenía un nuevo Programa de "Aire Puro" para Europa, una revisión de la Directiva de Techos Nacionales de Emisión y una nueva Directiva para Instalaciones Medias de Combustión²⁰. A corto plazo el Programa "Aire Puro" para Europa plantea cumplir en 2020 con la legislación vigente en parámetros críticos en los que se observan incumplimientos, como O₃, PM y NO₂. A largo plazo la estrategia pretende un mayor acercamiento a las directrices de la OMS en 2030, exigiendo un esfuerzo adicional de reducción de emisiones. De esta forma, la CE prevé evitar 58.000 muertes prematuras

20. El Consejo Europeo adoptó, en diciembre de 2015, la Directiva sobre las instalaciones de combustión medianas. Para la Directiva sobre los techos nacionales de emisión, se espera la decisión del Parlamento Europeo.

para 2030 y ahorrar aproximadamente 40.000 millones de euros anuales en costes sanitarios.

Esta nueva estrategia se presentó en el marco de incumplimiento generalizado de la normativa de la UE, principalmente por las repetidas superaciones de los valores límite de las PM_{10} y el NO_2 . Consciente de este hecho, la CE propuso una legislación para reducir a más largo plazo las emisiones nocivas que contribuyen a la mala calidad del aire y a los daños al medio natural. Este retraso en el compromiso de disminución de emisiones contaminantes causó un gran malestar en la comunidad científica, que cuestionó fuertemente estas medidas ante las evidencias de los efectos que la contaminación atmosférica ocasiona en la salud, que marcan además que los niveles de concentración regulados hasta el momento parecen no ser los adecuados para proteger la salud de la población. Por otra parte, no menos importante es que continúan sin regulación emisiones importantes, como los productos de abrasión de ruedas, frenos y firme de rodadura (alrededor del 50% de las partículas que emite un coche), o sustancias que actualmente preocupan en Europa, como el benzo(a)pireno.

Los problemas de salud relacionados con la mala calidad del aire son particularmente graves en zonas urbanas edificadas, donde más población se concentra y donde la calidad del aire es generalmente peor como consecuencia del tráfico. El endurecimiento progresivo de las normas Euro —destinadas a los vehículos— no ha conseguido el efecto positivo esperado en el ámbito urbano en relación con el NO_2 , como sí lo tuvo para partículas y CO. En consecuencia, la solución más efectiva e inmediata en las ciudades exigiría la implantación urgente de medidas no tecnológicas dirigidas, primordialmente, a una reducción drástica del tráfico privado urbano en favor del transporte público.

En efecto, una de las mayores dificultades en las ciudades es reducir las emisiones de NO_x ($NO+NO_2$) procedentes de vehículos diésel ligeros y de pasajeros, dado que los más modernos emiten no mucho menos NO_x que los más antiguos

en condiciones de circulación urbana. Los valores límite de las emisiones de los motores fijados en las normas Euro procedían de test de circulación que no tenían en cuenta las posibles variaciones que se producen en condiciones reales de conducción en zonas urbanas (paradas y arranques frecuentes). Esto genera un desfase entre las emisiones de NO_x de la prueba de laboratorio y la conducción real, especialmente para los vehículos diésel que superan notablemente a las estimadas experimentalmente. Este hecho, sumado tanto al aumento del parque móvil, como al incremento de la circulación y la "dieselización", ha provocado un enorme impacto en las concentraciones de NO_2 , O_3 y partículas secundarias en toda Europa.

Hasta el momento, la industria automovilística no ha conseguido un mayor control de las emisiones de NO_x en condiciones reales de conducción, en consonancia con lo exigido por las normas Euro vigentes. Ahora además se conoce que no se debe solo a cuestiones técnicas de diferencias entre distintas pruebas para medir las emisiones, sino a un engaño deliberado del sector industrial automovilístico que ha obviado impunemente el impacto que ocasionaba en la salud. La crisis de las emisiones de los vehículos, iniciada en 2015 por Volkswagen y que afecta a otras marcas comerciales, ha dejado entrever las malas prácticas de los fabricantes de vehículos. La instalación de un programa informático en millones de vehículos diésel limitaba las emisiones de NO_x solo en el momento de las pruebas de inspección técnica, esquivando así los controles medioambientales.

Ante tal circunstancia, un comité técnico integrado por expertos de los estados miembros de la UE decidió autorizar a dichos fabricantes para que sobrepasaran los límites de emisiones establecidos por la legislación europea. La aplicación de esta decisión supondría que sería legal que los turismos diésel sobrepasaran los umbrales de emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) en un 110%. En 2016, el Parlamento Europeo decidió apoyar esta política en contra de la opinión de gran parte de los alcaldes de las

grandes ciudades europeas. Hechos como este ilustran la complejidad de la madeja social, económica y política implicada en las cuestiones ambientales, como la que nos ocupa, donde concurren muchos intereses enfrentados que no siempre acaban favoreciendo el bien común, en este caso, un aire más limpio.

LA PROTECCIÓN DE LA SALUD DE LA POBLACIÓN PASA POR REDUCIR LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica perjudica a la salud humana y al medio ambiente. Aun comprendiendo claramente esta premisa, la mayoría de los individuos asume que el aire contaminado es un fenómeno peligroso en términos de salud pública, pero con escasa relevancia personal sobre todo a corto plazo. Es decir, es un riesgo impersonal por el cual los efectos en la salud les ocurren a otras personas, preocupando muy poco las posibles consecuencias directas sobre uno mismo.

Asimismo, sucede lo que se conoce como efecto halo, que es un curioso proceso por el que los individuos generalmente perciben su barrio como menos contaminado que otras zonas de la ciudad. Además, gran parte de los ciudadanos confía ciegamente en el empleo de pistas sensoriales (olfativas, visuales o táctiles —“huele a quemado”, “edificios negros”, “piel más sucia”, etc.—) para “medir” los niveles de contaminación atmosférica, como si la mala calidad del aire siempre se detectara tan fácilmente. Finalmente, no menos recurrente es creer en la llegada de soluciones milagrosas científico-técnicas que remediarán este problema ambiental.

La calidad del aire debe ser objeto de preocupación y de reivindicación social, dado que afecta a uno de los derechos humanos más apreciados, la salud. Para ello, urge que el ciudadano tenga acceso a información técnica —pero inteligible—

sobre calidad del aire y sobre el efecto que provoca en la salud este riesgo ambiental. La ciudadanía debe percibir el riesgo de la exposición a sustancias contaminantes en su justa medida, interiorizando que es también una amenaza para su propia salud y que depende en cierto modo de ciertas decisiones y elecciones personales. Esta responsabilidad individual y colectiva no es óbice para que la ciudadanía reclame una correcta gestión de la calidad del aire por parte de los gobiernos, que son en primera instancia los que deben velar por un entorno saludable que garantice el mayor bienestar posible de la población.

Gran parte de las intervenciones dirigidas a reducir el impacto del aire contaminado pretenden fomentar cambios en el comportamiento de los individuos. Diversas instituciones públicas, asociaciones de profesionales o de pacientes, así como grupos de defensa del medio ambiente y organizaciones no gubernamentales elaboran y proporcionan consejos para minimizar el riesgo derivado de la exposición humana a sustancias contaminantes del aire. Todas estas entidades recomiendan, básicamente, la adopción de acciones deliberadas que limiten la exposición cotidiana a la contaminación atmosférica. Además, orientan para la adquisición de estilos de vida y hábitos saludables, así como animan al control de la salud y la enfermedad, especialmente entre la población más susceptible. La progresiva sensibilización ambiental de los ciudadanos aumentará la adopción paulatina de estas medidas de protección frente a la contaminación.

CONCIENCIA CIUDADANA: ACCIONES PARA PROTEGERSE DE LOS EFECTOS
ADVERSOS A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Nuestra salud depende en gran medida de elecciones personales cotidianas, como el ejercicio físico, la alimentación saludable o la correcta toma de medicamentos. De esta forma, podemos desempeñar un rol activo para gestionar nuestra propia salud. Respirar aire contaminado escapa en gran medida fuera de

nuestro control, por lo que requiere del impulso de medidas de las autoridades públicas que tengan como objeto reducir la exposición de la población. En cualquier caso, nuestra salud estará más protegida cuanto menos expuestos estemos a dicho riesgo. Por lo que aquí se citan algunas iniciativas que se pueden poner en práctica para proteger la salud frente a la contaminación atmosférica.

Medidas que se dirigen a limitar la exposición a la contaminación atmosférica en ambientes exteriores:

- Prestar atención a los sistemas de información sobre la calidad del aire local, así como a los avisos y alertas ante la superación de umbrales de concentración de contaminantes.
- Planificar las actividades considerando la información ofrecida por las agencias públicas medioambientales y sanitarias.
- Evitar las zonas potencialmente más contaminadas, como calles con tráfico intenso o áreas industriales, para pasear, caminar, correr o desplazarse en bicicleta.
- Limitar el tiempo de permanencia en el exterior durante los episodios de contaminación.

Medidas que se dirigen a limitar la exposición a la contaminación atmosférica en ambientes interiores:

- Ventilar cuando los niveles de concentración son generalmente más bajos. Esto suele ocurrir a primera hora de la mañana, antes de que tenga lugar la gran afluencia de vehículos por las calles. Si además es invierno, realizar esta acción antes de que comiencen a funcionar las calefacciones.
- Reducir todo lo posible los contaminantes en ambientes interiores, como el humo del tabaco o de la chimenea. Evitar los sistemas ineficientes de quema de biomasa para la calefacción doméstica.
- Averiguar la exposición potencial a la radiación de radón en el hogar y adoptar medidas para reducir sus niveles.

Medidas que orientan a la adquisición de estilos de vida y hábitos saludables:

- Comer saludablemente y no descuidar la ingesta de productos antioxidantes, como las frutas y verduras.
- Mantener un peso saludable.
- Reducir o eliminar el consumo de tabaco.
- Mantenerse activo, ya que el ejercicio físico mejora la salud y previene la enfermedad.

- Realizar las actividades deportivas al aire libre cuando los niveles de concentración son generalmente más bajos. Intentar evitar las horas de mayor afluencia del tráfico, los episodios de smog fotoquímico o las horas de más calor y concentraciones elevadas de ozono (mediodías). Elegir parques para la práctica deportiva.

- Consultar y adoptar en la medida de lo posible las instrucciones señaladas en el Código Europeo contra el Cáncer de la IARC para reducir el riesgo de cáncer.

Medidas para vigilar y controlar la salud:

- Consultar un médico en caso de aparición de síntomas (por ejemplo, dificultad al respirar) que obliguen a reducir la actividad.



LA IMPLICACIÓN DE LA SOCIEDAD PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire es dependiente de un contexto histórico, socioeconómico y político. En el entramado de relaciones e intereses de toda índole con el que lidia la gobernanza, la sociedad civil ha jugado clásicamente el papel de mero receptor de las decisiones y prioridades políticas y económicas, así como de los impactos medioambientales y en la salud derivados de las mismas. Además, estas medidas adoptadas por los gobiernos condicionan los factores que van ligados a la exposición y a la susceptibilidad, lo que explica en gran medida la desigual distribución de los problemas de salud en una población. Por ello, la mejora en los entornos ambientales y en la salud requiere la reacción de la sociedad, para que adquiera un papel más proactivo en las decisiones que impactan sobre su salud. Por su parte, las Administraciones públicas deben impulsar y facilitar el justo derecho de la participación ciudadana en la definición de intervenciones que repercutan sobre su salud. El compromiso de todos los sectores sociales es preciso para conseguir una buena calidad ambiental.

Por otra parte, la contaminación del aire desmedida no debe entenderse como una consecuencia necesaria del crecimiento. Las políticas macroeconómicas definen mercados y condiciones de trabajo que, en muchas ocasiones, marcan el rumbo de la calidad del aire que respiramos. Nuestros sistemas económicos deben plantearse cambios estructurales hacia unas pautas de producción y consumo más armónicas con las reglas de la naturaleza. Por otro lado, el cumplimiento de la normativa debe exigirse de manera coherente en todos los sectores de la industria, especialmente cuando además esté en juego la salud de los trabajadores. En definitiva, la salud y la calidad del aire deben priorizarse por encima de los (poderosos) intereses de los *lobbies* industriales.

El nivel de contaminación atmosférica está muy relacionado también con la organización social, el comportamiento y los hábitos de los ciudadanos. Las limitaciones cotidianas ligadas al marco de desarrollo de la vida (localización de la vivienda, acceso a infraestructuras, ritmos de vida, necesidad de ahorro de tiempo, etc.), a la necesidad de desplazamiento para realizar diferentes actividades (largos trayectos, lejanía de la red de transporte público, saturación de ciertas líneas, atascos, etc.) y a otras múltiples circunstancias dificultan en gran medida los cambios y adaptaciones precisas para tener un mayor compromiso con el medio ambiente. El desarrollo efectivo de posibles iniciativas, como el teletrabajo, ayudarían a la protección del medio ambiente (menos desplazamientos al trabajo, menos consumo energético, menos ruido y emisiones, etc.).

Finalmente, las instituciones públicas ofrecen información sobre distintos gestos que pueden conducir a la reducción de emisiones contaminantes. Básicamente recomiendan una serie de actuaciones con el objetivo de mejorar la calidad del aire urbano, como la conducción eficiente, el uso del transporte público, el transporte activo o el ahorro de energía. Como el medio ambiente es bastante agradecido, la suma de pequeños

esfuerzos puede tener un efecto a escala global mucho mayor del que se puede pensar a priori.

RESPONSABILIDAD CIUDADANA: ACCIONES PARA REDUCIR LAS EMISIONES CONTAMINANTES AL AIRE

La mejora de la calidad del aire como consecuencia de la reducción de emisiones es la estrategia más importante para proteger la salud, tanto a corto como a largo plazo. Muchas de las acciones que llevamos a cabo en nuestra vida diaria están relacionadas con la emisión de algún contaminante. Reducir nuestra huella energética y nuestra huella contaminante es ya un deber ineludible. Algunos consejos sencillos pueden ayudar a que nuestro impacto sobre la atmósfera sea menor, contribuyendo a un aire más limpio para todos. Veamos algunos ejemplos para revertir tendencias en niveles de contaminación y poder dibujar otro futuro.

Hogar y ocio:

- Consumir responsablemente.
- Comprar productos estacionales y regionales, sin necesidad de requerir un transporte a gran distancia.
- Reducir el consumo de carne atendiendo a los requerimientos nutricionales.
- Separar los desechos reciclables en el hogar.
- No quemar restos vegetales procedentes de podas o del huerto.
- Adquirir electrodomésticos de menor consumo energético.
- Reducir el consumo de energía (apagar luces y aparatos eléctricos que no estén en uso, llenar la lavadora y el lavavajillas, etc.).
- Utilizar productos sin disolventes o bajos en disolventes (pinturas, barnices, productos de conservación de madera, etc.).

Movilidad:

- Desplazarse a pie o en bicicleta.
- Usar regularmente el transporte público.
- Disminuir el uso del automóvil y evitar los desplazamientos innecesarios. Compartir el vehículo.
- Antes de adquirir un vehículo informarse sobre niveles de emisiones y optar por los menos contaminantes.

- Adoptar una conducción ecológica y eficiente, evitando cambios bruscos de velocidad. Evitar dejar el motor en marcha cuando no se circula.
- Contribuir todo lo posible para reducir emisiones en caso de avisos y alertas por episodios de contaminación elevada en la ciudad (evitar el uso del vehículo privado, usar transporte público, etc.).

LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: EL BIEN COMÚN QUE SUPONE RESPIRAR UN AIRE DE CALIDAD

La ciencia ha demostrado que la contaminación atmosférica produce efectos nocivos para la salud, especialmente en lo que se refiere a la morbilidad por causas respiratorias y cardiovasculares. La investigación avanza además en el descubrimiento de nuevos efectos y de los mecanismos biológicos implicados, con lo que difícilmente puede todavía precisarse la carga de enfermedad total que supone esta exposición. El impacto en la salud se observa especialmente entre los grupos más susceptibles y los más vulnerables, que sufren con más rigor las consecuencias de vivir en entornos insanos. La prevención de los daños ocasionados por este riesgo ambiental pasa por reducir la exposición de las poblaciones, prestando especial atención a los colectivos más perjudicados para evitar las desigualdades frente a los riesgos y garantizar la justa repartición de los beneficios para la salud.

Mejorar la calidad del aire es ya una cuestión ineludible que el hombre debe afrontar sin más demora. La lucha activa contra la contaminación atmosférica supone un reto mundial partiendo desde la escala local, que exige voluntad, compromiso y actuación coordinada de todos los sectores sociales. Los avances en el conocimiento científico y en la percepción social de esta amenaza ambiental presionan a las autoridades gubernamentales para

que realicen esfuerzos para proteger la salud de la población frente a la contaminación atmosférica. Integrar el impacto de las políticas sectoriales sobre la salud debería ser una prioridad de los responsables políticos, que deben actuar con valentía para la construcción y defensa de entornos saludables por encima de los intereses privados, comerciales o industriales. Es preciso apostar por aquellas políticas que marcan la diferencia en el control del deterioro del aire, favoreciendo una mayor calidad de vida y bienestar de la población.

La acción de la ciudadanía es imprescindible para sumar fuerzas en la lucha contra el aire contaminado. El impulso de programas de educación ambiental es fundamental para comunicar a la sociedad el riesgo al que se expone y para que tome conciencia de la importancia de contribuir a su solución. El aprendizaje individual y colectivo, así como la implicación efectiva de todos, juegan un papel esencial para adquirir hábitos de reducción de emisiones y de protección frente a los impactos en la salud. La participación comunitaria y de todos los grupos afectados en los procesos de gestión de este riesgo ambiental representa el derecho de las personas a estar informados y de tomar parte activa en las decisiones que modifican su contexto de vida.

Aunque la contaminación atmosférica sigue siendo un motivo de preocupación sanitaria, existen posibilidades de actuación para atenuar sus efectos adversos, siempre y cuando se alíen la voluntad política y la conciencia ciudadana. La estrecha interacción entre ciencia, política y sociedad es ahora más precisa que nunca si queremos respirar un aire de calidad. Tan esencial es esa responsabilidad colectiva que, mientras no sea asumida con firmeza, nuestra salud estará "en el aire".

BIBLIOGRAFÍA

- ATKINSON, R. W. *et al.* (2014): "Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis", *Thorax*, 69, pp. 660-665.
- BEELEN, R. *et al.* (2014): "Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multi-centre ESCAPE project", *The Lancet*, 383, pp. 785-795.
- BROOK, R. *et al.* (2010): "Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease. An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association", *Circulation*, 121, pp. 2331-2378.
- CHEN, H. *et al.* (2008): "A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases", *Reviews of Environmental Health*, 23, pp. 243-297.
- CHIN, M. (2015): "Basic mechanisms for adverse cardiovascular events associated with air pollution", *Heart*, 101(4), pp. 253-256.
- DKV SEGUROS (2010): "Estado de la cuestión: Contaminación atmosférica y salud", 2.
- EVELYN, J. (1661): *Fumifugium*, disponible en: <https://archive.org/details/fumifugiumoeeveluoft>
- FAUSTINI, A. *et al.* (2014): "Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies", *European Respiratory Journal*, 44, pp. 744-753.
- FLORES-PAJOT, M. C. *et al.* (en prensa): "Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: A review and meta-analysis", *Environmental Research* (doi: 10.1016/j.envres.2016.07.030).
- GUXENS, M. *et al.* (2014): "Air pollution during pregnancy and childhood cognitive and psychomotor development: six European birth cohorts", *Epidemiology*, 25(5), pp. 636-647.
- HENSCHEL, S.; ATKINSON, R. y ZEKA, A. *et al.* (2012): "Air pollution interventions and their impact on public health", *International Journal of Public Health*, 57, pp. 757-768.
- IARC (2013): "Air Pollution and Cancer. International Agency for Research on Cancer", 161, disponible en: <http://www.iarc.fr/en/publications/books/sp161/index.php>
- KAUFMAN, J. *et al.* (2016): "Association between air pollution and coronary artery calcification within six metropolitan areas in the USA (the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution): a longitudinal cohort study", *The Lancet*, 388 (10045), pp. 696-704.
- KUNZLI, N. (2005): "Unifying susceptibility, exposure, and time: discussion of unifying analytic approaches and future directions", *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 68, pp. 1263-1271.
- KUNZLI, N. *et al.* (2001): "Assessment of deaths attributable to air pollution: should we use risk estimates based on time series or on cohort studies?", *American Journal of Epidemiology*, 153, pp. 1050-1055.
- MARTINELLI, N. (2013): "Air particulate matter and cardiovascular disease: A narrative review", *European Journal of International Medicine*, 24, pp. 295-302.
- MAGRAMA (2012): "Los incendios forestales en España. Decenio 2001-2010",

- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/incendiosforestales2001-2010/finmodalmodi_tcm7-349255.pdf
- MÜLLER, D. *et al.* (2011): "Car indoor air pollution-analysis of potential sources", *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 16, 6(1), p. 33.
- NEWBY, D. *et al.* (2015): "Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease", *European Heart Journal*, 36, pp. 83-93 (doi:10.1093/eurheartj/ehu458).
- OLTRA, C. *et al.* (2015): "La implicación del público en los riesgos derivados de la contaminación atmosférica urbana", *Papers*, 100/4, pp. 477-492.
- ORIO, A., PALLARÉS, M. *et al.* (2013): "Análisis de la calidad del aire en España. Evolución 2001-2012", disponible en: http://www.isciii.es/ISCIII/es/contenidos/fd-el-instituto/fd-organizacion/fd-estructura-directiva/fd-subdireccion-general-servicios-aplicados-formacion-investigacion/fd-centros-unidades/fd-centro-nacional-sanidad-ambiental/fd-servicios-cientifico-tecnicos_sanidad-ambiental/Analisis_calidad_aire_Espana_2001_2012_tcm7_31112.pdf
- PÉREZ-RÍOS, M. *et al.* (2010): "Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem?", *BMC Public Health*, 10, p. 256.
- QUEROL, X. *et al.* (2012): "Bases científicas-técnicas para un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire", *Informes CSIC*. Cyan, Proyectos Editoriales, Madrid.
- SOLOMON, S. *et al.* (2016): "Emergence of healing in the Antarctic ozone layer", *Science*, 10.1126/science.aae0061, disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/early/2016/06/30/science.aae0061.full.pdf+html>
- VRIJHEID, M. *et al.* (2016): "Environmental pollutants and child health. A review of recent concerns", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 219(4-5), pp. 331-342.
- WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE, OECD (2015): "Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth", WHO Regional Office for Europe, disponible en: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impact-air-pollution-en.pdf?ua=1
- WHO (2013): "Review of evidence on health aspects of air pollution—REVIHAAP project: final technical report", WHO Regional Office for Europe, Dinamarca, disponible en: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>
- (2014): "Burden of disease from household air pollution for 2012", disponible en: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/HAP_BoD_results_March2014.pdf?ua=1

INSTITUTO DE SALUD CARLOS III

Es el principal Organismo Público de Investigación de nuestro país en el ámbito de ciencias de la salud.

Sus principales funciones son el fomento y desarrollo de una investigación de excelencia y altamente competitiva, tanto a través de su papel como agencia de financiación de la investigación como por medio de la investigación que realizan sus propios centros, y la prestación de servicios de referencia de soporte al Sistema Nacional de Salud y al conjunto de la sociedad.

Con una trayectoria de treinta años de investigación en ciencias de la salud y prestación de servicios de referencia, es además el organismo gestor de la Acción Estratégica en Salud en el marco del Plan Estatal de I+D+i.

