

El aire que respiramos: impacto de la contaminación atmosférica en la salud humana

Autora: Elena Boldo Pascua

– Licenciada en Biología y doctora por la Universidad Autónoma de Madrid

– Miembro de la Sociedad Española de Epidemiología

Imprime y edita Club de Amigos de la Unesco (CAUM)

Septiembre 2024

San Bernardo, 20

28015 Madrid

913 691 652

caum.es · caummadrid@gmail.com

Facebook: ClubAmigosUnesco

Twitter: @comparteCAUM

DEPÓSITO LEGAL: M-3219-2024



ÍNDICE

1. LA SALUD, EN EL AIRE.....	1
2. UN VIAJE POR LA HISTORIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	1
3. ASPECTOS CLAVE DE LA ATMÓSFERA Y LA CALIDAD DEL AIRE	3
4. EL AIRE, UN CÓCTEL CON DIVERSOS INGREDIENTES.....	8
5. FUENTES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	18
6. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD.....	19
7. LA IMPLICACIÓN DE LA SOCIEDAD PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	28
8. ¿QUÉ AIRES NOS TRAERÁ EL FUTURO?.....	30
9. BIBLIOGRAFÍA.....	31



1. LA SALUD, EN EL AIRE

Las acciones del ser humano han alterado profundamente la naturaleza, desequilibrando los sistemas ecológicos. Nos enfrentamos a retos como la pérdida de biodiversidad, el calentamiento global, la destrucción de la capa de ozono, la desertificación o la acumulación de residuos tóxicos, entre otros. Estas crisis ecológicas son el resultado de la explotación intensiva de los recursos naturales, que son limitados, para cumplir con las demandas de un estilo de vida que requiere un consumo creciente de estos recursos. Esto conduce inevitablemente a la contaminación y al agotamiento de los recursos del planeta.

Paralelamente, la inquietud por la salud del planeta es hoy más relevante que nunca. La sociedad exige que el progreso y la mejora de la calidad de vida avancen sin poner en riesgo la viabilidad del planeta. Se presenta así un gran desafío social: lograr un balance entre el consumo de recursos naturales y el respeto de las leyes de la naturaleza, protegiendo los sistemas biofísicos del planeta. Este es un reto complejo que necesita de un compromiso colectivo y una acción conjunta para garantizar un futuro sostenible.

La calidad del aire ilustra esta tensión, donde la contaminación generada por el hombre se opone a la necesidad de proteger un recurso vital. Este conflicto evidencia la paradoja de ser a la vez víctima y agente del deterioro ambiental, forzando a la sociedad a plantear estrategias eficaces para la gestión responsable y sostenible del entorno. Reflexionar sobre el origen de la degradación de la calidad del aire es fundamental para comprender y abordar este desafío ambiental.

2. UN VIAJE POR LA HISTORIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

La atmósfera terrestre es dinámica, lo que significa que ha experimentado transformaciones en su composición y temperatura desde la formación del planeta. La actividad humana ha intensificado estas variaciones, sobre todo en los últimos doscientos años, modificando la atmósfera a un ritmo sin precedentes. La historia de la calidad del aire es un relato de evolución y desafíos, marcado por hitos que han cambiado su composición y han planteado riesgos para la salud humana y para la estabilidad del medio ambiente.

Los albores de la contaminación

El uso del fuego por los humanos primitivos, aunque crucial para su desarrollo, marcó el comienzo de la contaminación atmosférica antropogénica. Nuestros antepasados aprendieron a hacer fuego, lo que les permitió cocinar alimentos y calentarse, pero también añadió humo y gases en el aire. 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. Con el tiempo, la

sedentarización y la agricultura llevaron a la sobreexplotación de recursos como la madera y a la búsqueda de combustibles alternativos, como el carbón, contribuyendo aún más a la contaminación del aire.

Las momias egipcias revelan signos de exposición a sustancias tóxicas del aire. En la antigua Grecia, ciertas enfermedades ya se asociaban con la mala calidad del aire. De este modo, los griegos valoraban la planificación urbana para asegurar un aire limpio. En la Roma imperial, la contaminación atmosférica era también un problema conocido, con quejas registradas por el emperador Nerón y el escritor Horacio sobre los efectos del humo. Las leyes romanas reflejaban una conciencia ambiental, con registros de medidas contra la contaminación y consideraciones sobre los vientos dominantes en la planificación de las ciudades.

La era de la industrialización

"Fumifugium", escrito por John Evelyn en 1661, es uno de los primeros textos que aborda la problemática de la contaminación atmosférica. Evelyn, un científico de la época, expresaba su preocupación por los efectos negativos del humo del carbón en la salud pública, la vegetación y la arquitectura urbana. Su obra, presentada al rey Carlos II de Inglaterra, proponía trasladar las industrias contaminantes fuera de la ciudad y plantar árboles para mejorar la calidad del aire. Este documento histórico refleja una conciencia temprana sobre los problemas ambientales que se intensificarían con la Revolución Industrial. Marcó el inicio de una lucha continua contra la contaminación del aire y sus consecuencias en la sociedad y el medio ambiente.

Durante el siglo XIX, la Revolución Industrial trajo consigo un gran crecimiento de la población urbana, lo que resultó en problemas sociales significativos. La contaminación atmosférica, el hacinamiento y la falta de vivienda adecuada afectaron gravemente la salud pública. El humo de las fábricas era una preocupación mayor, ensuciando todo a su paso y dañando la salud. A pesar de las regulaciones iniciales para controlar la contaminación en países como el Reino Unido y Francia, el humo era a menudo visto como un mal necesario asociado con el progreso económico.

Conciencia y cambio

Durante el siglo XX, el progreso industrial y tecnológico trajo consigo mejoras en el transporte y en el desarrollo urbano. A su vez, exacerbó la degradación del medio ambiente y los riesgos para la salud. La contaminación atmosférica emergió como una amenaza seria, evidenciada por desastres en Europa y Estados Unidos, como los ocurridos en el Valle de Mosa, Londres y Donora. Estos episodios resaltaron la relación entre la calidad del aire y la salud, provocando un alarmante número de fallecimientos y subrayando los riesgos asociados con la residencia en entornos contaminados. Estas tragedias transformaron la visión pública y motivaron la creación de regulaciones más estrictas en cuanto a las emisiones, marcando un punto de inflexión en la historia ambiental.

Los recientes desastres industriales han dejado también una huella indeleble en el medio ambiente. Por ejemplo, el desastre de Bhopal en 1984 liberó isocianato de metilo, provocando aproximadamente 23.000 muertes y afectando a más de medio millón de personas. Años después, sus efectos aún se sienten en la región. De forma parecida, los accidentes nucleares de Chernobyl y Fukushima, ocurridos en 1986 y 2011 respectivamente, causaron enormes pérdidas humanas y una gran alarma sobre los efectos de la contaminación radiactiva. Estos incidentes recalcaron la importancia de preservar la seguridad en el ámbito industrial y de implementar una gestión eficaz de los riesgos para prevenir desastres futuros.

El desafío actual

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, sobre todo, con enfermedades cardiorrespiratorias, 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. Este enorme impacto exige una voluntad firme, tanto de los gobiernos como de la sociedad en su conjunto, para actuar en defensa de una atmósfera menos contaminada y, en definitiva, de la vida en la Tierra.

Actualmente, la lucha contra la contaminación atmosférica refleja una conciencia ecológica en aumento que se propaga globalmente. Las medidas iniciales de control de la calidad del aire han logrado una reducción significativa de los contaminantes y el establecimiento de sistemas de vigilancia de la calidad ambiental. Sin embargo, a pesar de los avances, el deterioro ambiental no se ha detenido por completo. Por ello, sigue siendo fundamental actuar para preservar un entorno limpio y saludable, sobre todo en zonas con alta densidad de población. El compromiso y la colaboración internacional son esenciales para proteger el aire que todos respiramos.

3. ASPECTOS CLAVE DE LA ATMÓSFERA Y LA CALIDAD DEL AIRE

Las actividades diarias que realizamos, tales como iluminar nuestros hogares, usar aparatos eléctricos o viajar en coche, conllevan la liberación de contaminantes y el consumo de recursos naturales que nuestro planeta tarda en regenerar. Centrándonos en la importancia del aire, resulta evidente que es un recurso esencial que necesitamos preservar para garantizar nuestra supervivencia. Por tanto, es fundamental comenzar por entender qué es la contaminación atmosférica.

Una definición de la contaminación atmosférica

Este fenómeno se refiere a cualquier alteración que desequilibre la composición natural de la atmósfera, esencialmente una combinación crítica de gases para la existencia en la Tierra. Implica cambiar la proporción de sus componentes o añadir elementos perjudiciales, como materias, sustancias o formas de energía que dañen la

salud, el entorno o los bienes materiales. Esta definición se extiende para abarcar no solo los contaminantes químicos, sino también formas de energía como el ruido y la radiación, así como altas concentraciones de elementos biológicos, como el incremento de polen durante la primavera. Estos cambios impactan negativamente en la salud o el bienestar humano, en los bienes y en el entorno natural.

La función de la atmósfera terrestre

Sin esta envoltura gaseosa, nuestro planeta sería un lugar inhóspito, incapaz de albergar la vida tal como la conocemos. Protege a la Tierra de las condiciones extremas del espacio, la radiación solar y los meteoritos. Además, regula la temperatura, haciendo posible un clima idóneo para la vida. La composición y las características de las capas atmosféricas, especialmente la troposfera y la estratosfera, son esenciales para entender y mitigar la contaminación del aire.

La **troposfera**, que es la capa más cercana a la superficie terrestre, es el escenario de la mayoría de los eventos meteorológicos y contiene el aire que respiramos. Se extiende hasta unos 15 kilómetros por encima del nivel del mar y está compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, junto con gases traza, como el dióxido de carbono y el metano. A pesar de su baja concentración, estos gases traza juegan un papel importante en la regulación del clima y la calidad del aire por sus propiedades de efecto invernadero.

Por otro lado, la **estratosfera**, que se eleva hasta 50 kilómetros sobre nosotros, contiene la capa de ozono. Esta capa actúa como un escudo frente a los dañinos rayos ultravioleta del sol, siendo fundamental para la continuidad de la vida en nuestro planeta. Sin embargo, la interacción de ciertos contaminantes con el ozono puede adelgazar esta barrera, incrementando la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la Tierra, con consecuencias importantes para nuestra salud y los ecosistemas.

De la emisión de contaminantes atmosféricos a la exposición de las poblaciones

La **emisión** de contaminantes es solo el comienzo de un proceso complejo que puede llevar a la exposición de las poblaciones a sustancias nocivas. Este término se refiere a la liberación de sustancias contaminantes en la atmósfera desde una fuente específica. Se expresa en unidad de masa por unidad de tiempo (kg/h, t/año). Una vez en el ambiente, los contaminantes son transformados por reacciones físicas y químicas que cambian su naturaleza y forma de dispersión en el aire. Además, la distribución de estos elementos tóxicos depende de factores como las condiciones meteorológicas o la topografía del terreno. Por tanto, la cantidad de emisiones indica el volumen de contaminantes liberados, pero no necesariamente representa la exposición real de las personas a estos elementos.

Por otro lado, la **inmisión** representa la concentración de contaminantes en el aire en un tiempo y lugar concretos, ofreciendo una medida más precisa de lo que las personas podrían estar respirando. Se suele expresar en unidad de masa por unidad de

volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, incluso esta medida puede no capturar fielmente la exposición individual, que también se ve afectada por la duración, la frecuencia de contacto con el contaminante, así como por las rutas de exposición. En consecuencia, para una valoración correcta del riesgo para la salud, es esencial tener en cuenta no solo las cifras de emisión e inmisión, sino también los patrones de comportamiento y las características personales que influyen en la exposición a los contaminantes del aire (Figura 1).

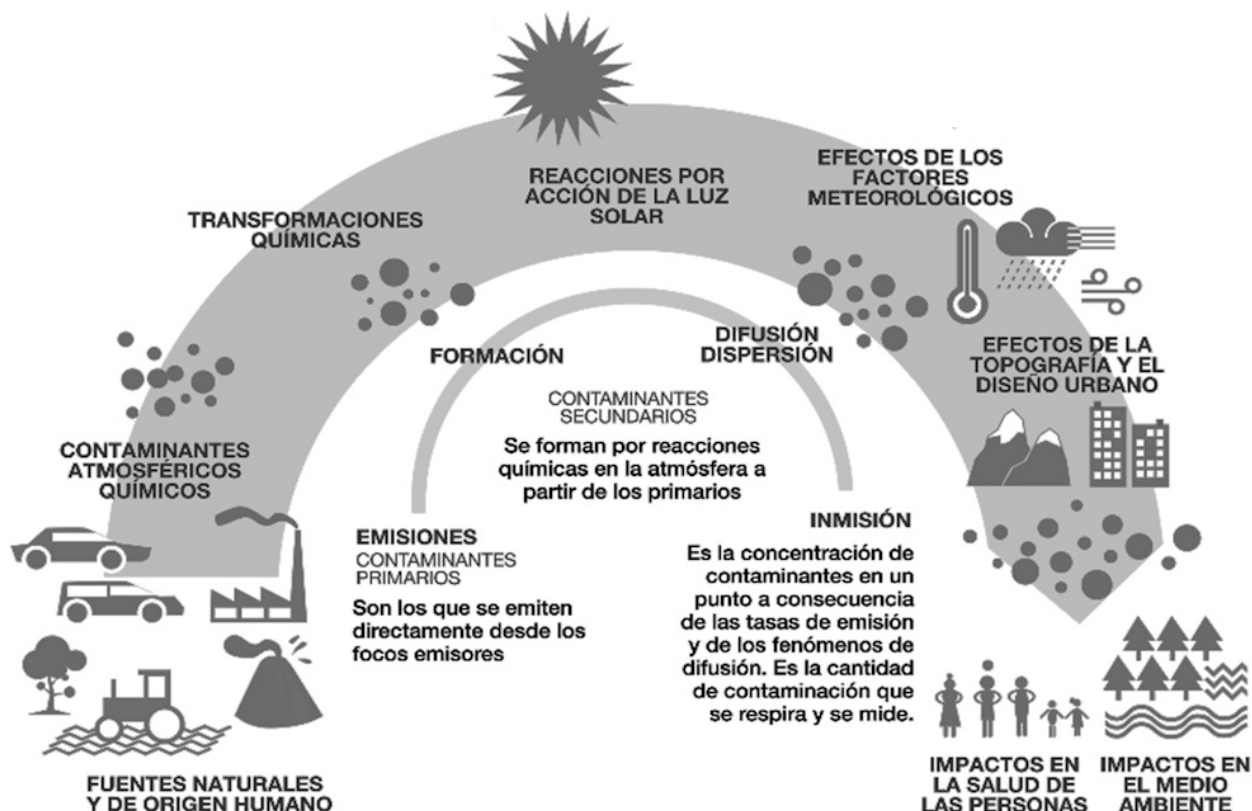


Figura 1. Emisión, transformación e inmisión de contaminantes atmosféricos. Fuente: adaptado de Medioambiente y Sostenibilidad de Zaragoza.

Cuando el aire se estanca: el impacto de la estabilidad atmosférica en nuestro entorno

La distribución de los contaminantes atmosféricos está directamente influenciada por la estabilidad de la atmósfera. El proceso natural de circulación implica que el aire cálido y menos denso asciende desde la superficie terrestre, mientras que el aire más frío y pesado desciende desde altitudes mayores. Este intercambio vertical dispersa los contaminantes y disminuye su concentración en zonas concretas. La **inestabilidad en la atmósfera**, por lo tanto, contribuye a una diseminación más amplia de los contaminantes. Este fenómeno de intercambio de aire también es esencial para regular la temperatura y la humedad en distintas capas de la atmósfera, lo cual tiene un efecto significativo en los sistemas meteorológicos y los patrones climáticos globales.

Por el contrario, en situaciones de **estabilidad atmosférica**, la ausencia de corrientes verticales provoca que los contaminantes se acumulen, ya que no hay un mecanismo natural que los disperse. Durante el invierno, es común que se produzca una **inversión**

térmica, la cual impide la mezcla del aire al tener capas de aire más frío en la superficie que en las alturas, lo que detiene la circulación normal del aire y resulta en la concentración de contaminantes cerca del suelo. Así, el aire contaminado y frío, que es más pesado, forma una especie de neblina densa sobre las ciudades.

Esta capa de contaminación se asienta sobre la ciudad como una “boina” visible y grisácea, denominada así por su apariencia semejante a un sombrero que cubre la ciudad (Figura 2). Puede persistir hasta que un cambio en la temperatura o un frente de presión traiga consigo viento o lluvia, lo cual puede tardar días o semanas. Conviene prestar especial atención a los índices de calidad del aire durante los bellos días de invierno, que se caracterizan por un sol radiante y ausencia de viento. La presencia de un cielo despejado y una visibilidad excelente no implican, por defecto, que el aire esté limpio.

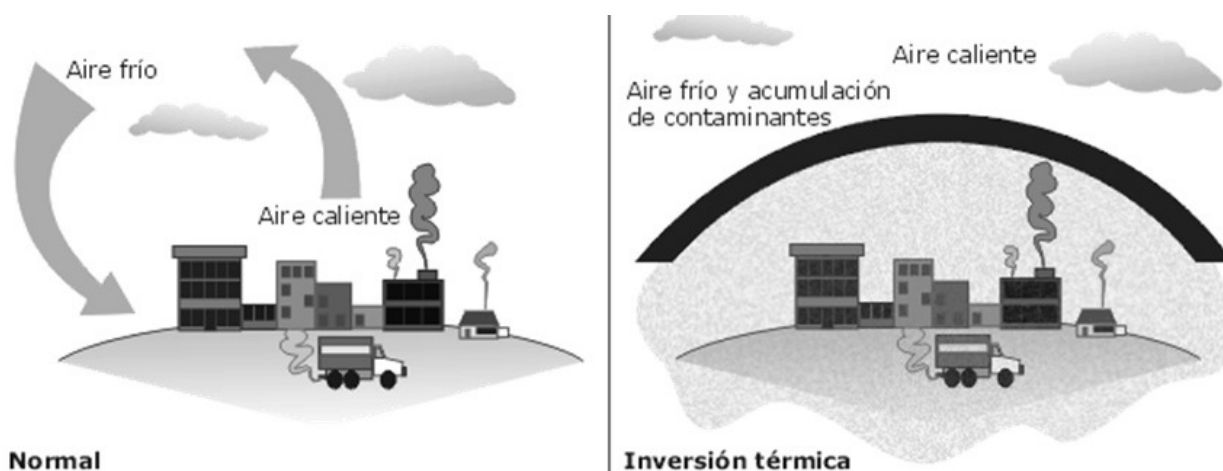


Figura 2. Circulación normal del aire y en situación de inversión térmica

Smog fotoquímico

El smog fotoquímico está relacionado con la “boina” y se produce por reacciones químicas entre los contaminantes del aire y la luz solar. Este fenómeno es más común en grandes ciudades con altos niveles de tráfico y actividad industrial. En estos casos, los contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles reaccionan en presencia de luz solar para formar ozono troposférico y otros contaminantes secundarios.

La presencia de smog fotoquímico tiene consecuencias negativas tanto para el medio ambiente como para la salud humana, contribuyendo a problemas como la lluvia ácida, que daña ecosistemas e infraestructuras y compromete la calidad del agua. La exposición a este tipo de contaminación puede causar irritación en los ojos, nariz y garganta, y empeorar enfermedades cardíacas y pulmonares preexistentes. Además, puede desencadenar ataques de asma y reducir la función pulmonar, lo que resulta especialmente peligroso para los niños y los ancianos.

La calidad del aire en interiores puede estar más deteriorada que en ambientes exteriores. Pasamos una gran cantidad de nuestro tiempo en interiores, por lo que la calidad del aire que respiramos dentro de estos espacios es una cuestión importante. Aunque no se presta la atención debida, la contaminación del aire interior puede ser más perjudicial que la del exterior, ya que los contaminantes tienden a acumularse en sitios reducidos. Es esencial ser conscientes de esto y buscar maneras de mejorar el ambiente que nos rodea en nuestro día a día.

Actividades diarias como fumar, cocinar y limpiar son fuentes de contaminación del aire interior. Por otro lado, los materiales de construcción y el mobiliario liberan también sustancias químicas nocivas. Entre los contaminantes habituales en estos entornos se encuentran el radón, el humo del tabaco, los gases de la combustión, diversos productos químicos, alérgenos y microorganismos patógenos como virus y bacterias. La concentración de dióxido de carbono, que exhalamos al respirar, también puede ser considerable. Sin olvidar que existe una constante transferencia de contaminantes entre el aire interior y el exterior.

Para entender a lo que nos referimos, es suficiente recordar el olor de una casa que acaba de ser pintada o los característicos aromas de los productos de limpieza y los pestilentes insecticidas. Los muebles nuevos, fabricados de madera contrachapada o laminada, las alfombras recién instaladas y ciertos tejidos que no requieren ser planchados, emanan un olor intenso debido al formaldehído que liberan, aunque este se atenúa con el tiempo. Este compuesto orgánico volátil es conocido por causar irritación y una sensación de ardor en los ojos, la nariz y la garganta.

Por otro lado, el radón es un gas radiactivo que se forma de manera natural a partir de la desintegración del uranio en el suelo, las rocas y el agua. Aunque es invisible e inodoro, puede representar un riesgo significativo para la salud si se acumula en interiores, ya que la exposición prolongada ha sido asociada con un aumento en el riesgo de cáncer de pulmón.

Para reducir la contaminación del aire en espacios cerrados, es recomendable incrementar la ventilación. El aire fresco del exterior dispersa los contaminantes presentes en el ambiente interior. Además, se aconseja emplear productos de limpieza que sean respetuosos con el medio ambiente y evitar aquellos que liberen compuestos orgánicos volátiles nocivos. También es importante realizar un mantenimiento regular de los sistemas de climatización, así como elegir materiales de construcción y decorativos que emitan la menor cantidad posible de sustancias contaminantes. En definitiva, optar por alternativas más armónicas con la naturaleza no solo contribuye a la salud del planeta, sino que también promueve un entorno más seguro y saludable para nosotros.

4. EL AIRE, UN CÓCTEL CON DIVERSOS INGREDIENTES

El aire es una mezcla de gases esenciales para la vida en la Tierra y su composición es relativamente constante en la troposfera: nitrógeno (78,08 %), oxígeno (20,94 %), argón (0,93 %), dióxido de carbono (0,03 %) y vapor de agua (0,40 %), junto con cantidades menores de otros gases como neón, helio, metano, kriptón, hidrógeno y amoníaco. Además, el aire contiene partículas en suspensión que pueden influir en su calidad y propiedades.

Esta composición puede variar debido a factores como la altitud, la contaminación o las condiciones meteorológicas. Aunque no los veamos, estamos constantemente rodeados de una variedad de contaminantes químicos en el aire que respiramos, los cuales tienen un impacto significativo tanto en la atmósfera como en nuestra salud. Diariamente, inhalamos alrededor de 8.000 litros de aire, cantidad que se incrementa a 10.000 litros durante actividades físicas intensas. Cada vez que respiramos, nuestro cuerpo absorbe una combinación de gases, vapores y partículas en suspensión, que no podemos evitar ni elegir.

La capacidad para vigilar sistemáticamente estas sustancias es limitada, enfocándose principalmente en aquellos contaminantes regulados por ley, como las partículas en suspensión, óxidos de nitrógeno y azufre, ozono y monóxido de carbono. Estos se utilizan como indicadores de la calidad del aire. Por ello, es esencial intensificar la investigación sobre estos contaminantes clave para mejorar nuestra comprensión y gestión de la calidad del aire.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

Las partículas en suspensión, comúnmente referidas como PM por sus siglas en inglés (particulate matter), son un tipo de contaminante que se observa en forma de densas nubes de polvo o neblinas. No son una sustancia química única, sino un conjunto diverso de compuestos orgánicos e inorgánicos. Estas partículas, que pueden adoptar estados sólidos o líquidos, se distinguen por su variabilidad en tamaño, composición y comportamiento en la atmósfera. Se encuentran en el aire de entornos urbanos y rurales, afectando no solo la calidad del aire sino también la salud humana, los ecosistemas y el clima del planeta.

La complejidad de las PM se debe a la diversidad de sus fuentes y procesos de formación. Algunas partículas se originan de manera natural, como las emitidas durante erupciones volcánicas o la sal marina dispersada por el viento en regiones costeras. Otras tienen un origen antropogénico, es decir, son generadas por actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles en vehículos motorizados, la demolición de edificios o la industria. Además, las PM pueden formarse directamente en la fuente (primarias) o en la atmósfera a partir de la transformación o reacción química de gases precursores (secundarias).

Estas partículas secundarias llegan a constituir hasta un 70 % del total de partículas. Sulfatos y nitratos amónicos, que pueden representar hasta el 40 % de las partículas más pequeñas ($PM_{2,5}$), se forman a partir de precursores inorgánicos como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. Las partículas proporcionan un medio para que diferentes elementos o sustancias presentes en la atmósfera viajen con ellas. Entre ellos, se encuentran virus o bacterias, metales y metaloides, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas y furanos.

Las partículas se clasifican según su tamaño, que determina su comportamiento en la atmósfera y su capacidad de penetración en los sistemas respiratorio y circulatorio. Las PM_{10} (partículas gruesas), por ejemplo, tienen un diámetro menor a 10 micrómetros, y las $PM_{2,5}$ (partículas finas), de menos de 2,5 micrómetros (Figura 3). Las más grandes se depositan con rapidez por efecto de la gravedad, pero las más finas pueden permanecer suspendidas en el aire y viajar largas distancias con el viento.

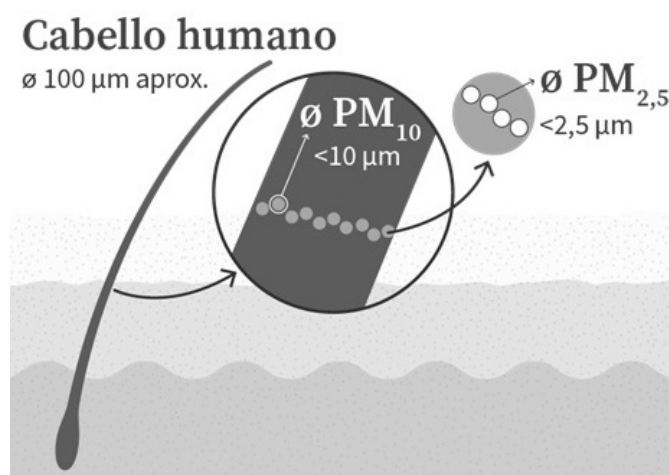


Figura 3. Tamaño de partículas en suspensión en relación con el cabello humano: partículas finas ($PM_{2,5}$) y partículas gruesas (PM_{10}). Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA).

No existe un nivel de exposición a estas partículas que sea considerado seguro, y los estándares de calidad del aire se establecen en función del tamaño: PST (partículas suspendidas totales), PM_{10} , $PM_{2,5}$ y $PM_{0,1}$ (partículas ultrafinas), diámetro menor de 0,1 micrómetros. Las partículas grandes son interceptadas por las vías respiratorias superiores, pero las más finas pueden llegar a los pulmones e incluso pasar al sistema circulatorio, por lo que son más peligrosas. Estos compuestos pueden causar daños en la reproducción, en el desarrollo y en el sistema inmunológico, interferir con el sistema hormonal, así como provocar enfermedades cardiorrespiratorias o cáncer.

Durante las estaciones de primavera y verano, se observa un incremento en los niveles de partículas en el aire, alcanzando un máximo en marzo. Las causas de este fenómeno incluyen las frecuentes intrusiones de aire sahariano y los periodos de estancamiento atmosférico, así como la contaminación a nivel regional. La formación acelerada de partículas secundarias en estos meses se debe a la mayor radiación solar.

El término **intrusión sahariana** describe el proceso por el cual el viento transporta arena y polvo del Sahara a grandes distancias, afectando la calidad del aire en Europa y,

en particular, en España. Este transporte de polvo puede provocar la "calima", una neblina que disminuye la visibilidad y ocasiona cielos anaranjados. Cuando se deposita en las superficies, causa lo que se conoce como "lluvia de barro".

Estos eventos pueden repercutir negativamente en la salud, especialmente en individuos con enfermedades cardiorrespiratorias. Se ha estimado que, por cada aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los niveles de polvo desértico de PM_{10} , se incrementa un 2 % el riesgo de muerte cardiovascular. Además, el polvo sahariano tiene un impacto en los ecosistemas, ya que aporta nutrientes al mar y puede influir en los patrones climáticos de manera prolongada.

Las autoridades sanitarias y medioambientales recomiendan a la población mantenerse informada sobre los niveles de calidad del aire durante estos eventos y tomar medidas preventivas, especialmente aquellas personas con enfermedades cardiorrespiratorias, niños, ancianos y trabajadores al aire libre. Algunas recomendaciones incluyen permanecer en interiores tanto como sea posible, cerrar ventanas para evitar la entrada de polvo y utilizar mascarillas, si fuera necesario, para salir.

En los últimos años, se ha observado un aumento en la frecuencia e intensidad de estas intrusiones, lo que ha llevado a un mayor interés en su estudio y seguimiento. El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, así como la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), proporcionan predicciones y análisis de estos episodios. Además, estudios recientes han revelado que el cambio climático podría estar influyendo en este incremento, alterando los patrones de circulación atmosférica y posiblemente haciendo que estos eventos sean más comunes y severos.

La reducción de las partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ es un objetivo previsto en la agenda medioambiental de España. El Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera incluye estrategias para reducir las emisiones de partículas de fuentes industriales y de transporte. Además, el Real Decreto 1052/2022 establece objetivos ambiciosos para reducir a la mitad los valores límite de calidad del aire anuales de contaminantes atmosféricos como las PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ para 2030. Estas iniciativas son fundamentales para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública.

GASES

En contraste con las partículas, la distribución espacial de los contaminantes gaseosos en la atmósfera muestra una variabilidad significativa, lo que representa un desafío adicional para la investigación de sus impactos en la salud humana. Dentro de la categoría de gases, es posible identificar varios compuestos de nitrógeno como el amoníaco (NH_3), el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), así como el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO), el ozono (O_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), todos los cuales tienen implicaciones importantes para la calidad del aire y la salud pública.

Dióxido de azufre (SO₂)

El azufre, precursor del dióxido de azufre (SO₂), es un elemento natural que se encuentra presente en el petróleo, el carbón y los minerales metálicos como aluminio, cobre, zinc, plomo y hierro. La actividad humana es la principal causante de la emisión de SO₂, especialmente debido a la combustión de combustibles fósiles en procesos industriales y la generación de energía eléctrica, procesos que requieren temperaturas elevadas. El carbón y el fueloil, con su alto contenido de azufre comparado con el gas natural, gasolina o diésel, son contribuyentes notables a estas emisiones. Por otro lado, las fuentes naturales de SO₂ incluyen, principalmente, las erupciones volcánicas y las emisiones desde los océanos.

Este compuesto químico se caracteriza por su penetrante olor y propiedades irritantes. Puede reaccionar con el vapor de agua y otros elementos en la atmósfera para formar ácido sulfúrico, un compuesto altamente corrosivo y destructivo que es una de las causas principales de la lluvia ácida. Esta lluvia puede tener efectos nocivos en regiones distantes a su origen. Además, el dióxido de azufre SO₂ contribuye a la generación de sulfato de amonio, incrementando así las partículas secundarias en el aire, como las PM₁₀ y PM_{2,5}.

La contaminación por este gas tiende a ser más alta alrededor del mediodía y se mantiene estable, incluso en días no laborables, con incremento notable durante la temporada de invierno. Esta situación se atribuye principalmente a la intensa actividad de industrias, como plantas de energía y refinerías, y al uso de sistemas de calefacción que queman combustibles con azufre, especialmente bajo condiciones meteorológicas adversas en otoño e invierno. En los últimos años, España ha logrado mantener los niveles de SO₂ dentro de los límites legales, sin registrar ninguna superación en 2022. La implementación de tecnologías de desulfuración en combustibles desde 2008, con el Plan Nacional de Reducción de Emisiones, ha sido fundamental para el control de los niveles de concentración de este contaminante.

Compuestos orgánicos volátiles no metánicos

Los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) incluyen una amplia gama de sustancias químicas orgánicas, como alcoholes, aldehídos, alcanos, cetonas y ciertos compuestos aromáticos. Se les denomina "volátiles" debido a su capacidad de evaporarse a temperatura ambiente, lo que les permite integrarse fácilmente en el aire del entorno. Esta característica proporciona un extenso abanico de aplicaciones industriales y domésticas. La presencia de estos compuestos en la atmósfera supone una preocupación ambiental significativa, ya que su acumulación puede llevar a condiciones atmosféricas perjudiciales para los ecosistemas y la población en general.

Las emisiones de COVNM provienen de múltiples fuentes, tanto naturales como antropogénicas, lo que supone una gran complejidad para su regulación normativa. Las plantas, por ejemplo, emiten naturalmente estos compuestos, que pueden funcionar como señales para los insectos polinizadores o como mecanismos de defensa contra

herbívoros. En cuanto a las fuentes antropogénicas, los COVNM pueden originarse de la industria, la producción agrícola, el uso de disolventes y productos de limpieza, así como de la combustión incompleta de combustibles fósiles en vehículos y maquinaria.

Los aldehídos, como el formaldehído, son componentes habituales en materiales de construcción y en productos de madera manufacturada. Los alcanos, que incluyen sustancias como el hexano, se usan en adhesivos y también se encuentran en la gasolina. Las cetonas, siendo la acetona uno de los más conocidos, son solventes comunes en la industria de pinturas y revestimientos. Además, compuestos aromáticos específicos como el tolueno y el xileno, también clasificados como COVNM, se emplean en la elaboración de pinturas, barnices y pegamentos.

Los efectos en la salud de los COVNM pueden ser significativos, variando según la composición y toxicidad de cada compuesto. Algunos, como el benceno, el cloruro de vinilo y el 1,2-dicloroetano, son conocidos por su potencial cancerígeno. Otros son conocidos por causar irritación de ojos y garganta, mareos y exacerbación de afecciones respiratorias. Además, actúan como agentes precursores en la formación de ozono troposférico, un elemento esencial del smog fotoquímico, que representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

A pesar de su relevancia, los COVNM no han recibido la misma atención en estudios científicos que otros agentes contaminantes. Esta situación subraya la necesidad de una mayor investigación para comprender mejor su comportamiento en la atmósfera y sus efectos tanto en el medio ambiente como en la salud. Las políticas y estrategias para reducir su concentración en la atmósfera incluyen la implementación de tecnologías de control más eficientes, el desarrollo de productos con menor contenido de COVNM y la promoción de prácticas sostenibles en la industria y la agricultura.

Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)

Los óxidos de nitrógeno, conocidos como NO_x, abarcan gases como el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), ambos altamente reactivos y contaminantes. El NO se convierte rápidamente en NO₂, la forma más dañina para la salud, vinculada a afecciones respiratorias y cardiovasculares.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) proceden de fuentes naturales y de actividades humanas. La acción de los microorganismos del suelo, las erupciones volcánicas, los incendios y las tormentas eléctricas son ejemplos naturales que contribuyen a su formación. En contraste, las actividades humanas generan NO_x principalmente a través de la oxidación del nitrógeno en el aire durante la combustión a altas temperaturas, como en los motores de los vehículos diésel y en la industria. En áreas urbanas, el tráfico es responsable de más del 75 % del NO₂ presente en la atmósfera. Además, los NO_x son precursores del ozono troposférico, así como responsables de la generación del smog fotoquímico y partículas secundarias, como los nitratos.

Este tipo de contaminación del aire presenta patrones regulares diarios y anuales. En los días hábiles, se observan dos picos de concentración: uno temprano en la mañana y

otro a partir de las seis de la tarde, reflejando el aumento del tráfico por el desplazamiento laboral y otras actividades. En días festivos, los niveles más altos se presentan en la tarde y noche, aunque son inferiores a los registrados durante la semana. Las ciudades del interior de la península registran los niveles más bajos de contaminación en agosto, coincidiendo con el período vacacional, mientras que los niveles más altos se dan en invierno. Por otro lado, las ciudades costeras ven incrementados sus niveles de contaminación en verano, debido al aumento del turismo.

La reducción global de las emisiones de NO_x se ha visto impulsada por reformas legislativas ambientales, avances tecnológicos y la transición hacia energías renovables. Sin embargo, todavía persiste la preocupación en áreas urbanas densamente pobladas y tráfico intenso. Las políticas públicas son esenciales, incluyendo normativas más rigurosas para vehículos, la promoción del transporte público, el teletrabajo y el establecimiento de zonas de baja emisión en grandes urbes. A pesar de los esfuerzos, las metrópolis continúan enfrentándose al desafío de mantener las emisiones de NO_x dentro de límites que no comprometan la salud pública.

La pandemia de COVID-19 en 2020 resultó en una notable reducción de la contaminación por dióxido de nitrógeno, gracias a las restricciones en movilidad y producción industrial. Los estudios de aquel periodo brindaron una visión clara del impacto humano en la calidad del aire urbano. Sin embargo, con la eliminación de las medidas restrictivas y la vuelta a la actividad habitual, la contaminación ha vuelto a subir, especialmente en áreas urbanas con alta densidad de tráfico, según lo indican diversas investigaciones realizadas después del confinamiento.

Amoníaco (NH₃)

El amoníaco (NH₃) es un gas con un olor característico y penetrante, presente de forma natural en el aire en niveles bajos. Es notorio por su reactividad y los impactos negativos en el medio ambiente, tales como la acidificación y la eutrofización de ecosistemas. Las emisiones de este gas se han incrementado desde 1860, duplicándose hasta 1993, y se estima que podrían volver a duplicarse para el 2050. Según el Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera, la agricultura y la ganadería intensiva son responsables de más del 90 % de estas emisiones, principalmente por el uso de fertilizantes nitrogenados y la gestión de residuos animales (estiércol). Aunque las emisiones de amoníaco también provienen del tratamiento de residuos y de procesos industriales, su contribución es menor al 10 % del total.

Estas emisiones son críticas para la calidad del aire, considerando las toneladas emitidas cada año y la amplia dispersión de la contaminación. El amoníaco atmosférico forma partículas secundarias como nitrato y sulfato amónico, contaminantes persistentes que pueden durar mucho tiempo en el aire y viajar más de 100 km desde su origen rural hasta zonas urbanas. Además, el amoníaco es una sustancia acidificante

que, al depositarse, puede dañar los ecosistemas terrestres y acuáticos, provocando alteraciones ecológicas y pérdida de biodiversidad. La inhalación de este gas puede causar problemas respiratorios graves.

Es fundamental abordar las emisiones de amoníaco identificando y regulando sus fuentes. Recientemente, científicos europeos han elaborado el primer mapa mundial de emisiones de amoníaco, utilizando datos obtenidos por satélites. Este avance proporciona una visión más clara sobre cómo se distribuyen y la intensidad con que se presentan estas emisiones en diferentes regiones. Disponer de esta información es de gran importancia para formular tácticas de mitigación más eficaces y para el desarrollo de políticas que aspiren a minimizar los efectos negativos en el medio ambiente y salvaguardar la salud de las personas.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro y muy inflamable, que resulta de la combustión incompleta de materia orgánica como el gas, la gasolina, el carbón y la madera. Entre las principales fuentes de emisión se encuentran los procesos de combustión en sectores no industriales, seguidos por las actividades del sector agropecuario y los procesos industriales, como las metalúrgicas y la producción de papel. Además, los aparatos domésticos que queman combustibles fósiles y los vehículos a motor son fuentes comunes de este gas. También se produce de manera natural a través de la oxidación del metano, procedente de la descomposición orgánica, y puede ser emitido durante incendios forestales o tormentas eléctricas.

A pesar de los esfuerzos regulatorios y los controles, la intoxicación por CO sigue siendo motivo de preocupación. Este gas es altamente tóxico debido a su capacidad de adherirse a la hemoglobina de la sangre más eficientemente que el oxígeno, lo que interfiere con el transporte de oxígeno a los tejidos corporales. La exposición a altos niveles de CO puede ocasionar síntomas como dolores de cabeza, mareos, debilidad, náuseas, confusión, y en situaciones extremas, pérdida del conocimiento y muerte. La acumulación de CO es particularmente peligrosa porque no es irritante y no puede ser detectada por el olfato, lo que dificulta su percepción. Por la amenaza que representa el CO, se debe mantener debidamente los equipos de combustión y ventilar regularmente los espacios cerrados para prevenir la acumulación de este gas.

También influye sobre el clima, ya que contribuye a la formación de gases de efecto invernadero. Su vida media en la atmósfera es de unos tres meses, lo que permite su lenta oxidación para formar CO₂, proceso durante el cual también se genera ozono. Su concentración ha disminuido progresivamente en años recientes, gracias a los avances tecnológicos en los vehículos motorizados, que son la principal fuente de este contaminante. El avance en la investigación y el desarrollo de tecnologías de detección más sensibles son importantes para garantizar la seguridad y minimizar la presencia de este gas en el ambiente.

Ozono (O₃)

El ozono, un gas incoloro formado por tres átomos de oxígeno (O₃), tiene un doble papel en la atmósfera terrestre. En la estratosfera, la “capa de ozono” desempeña una función protectora al filtrar la radiación ultravioleta nociva (UV-A y UV-B). Por el contrario, en la troposfera, se convierte en un potente oxidante perjudicial para la salud y el medio ambiente. En esta capa, se convierte en un contaminante secundario, lo que significa que no se emite directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de reacciones fotoquímicas entre contaminantes primarios en determinadas condiciones meteorológicas.

La producción de ozono en la troposfera comienza con la emisión de gases precursores como los óxidos de nitrógeno (NO_x), metano (CH₄) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos compuestos se liberan en grandes cantidades en entornos urbanos y zonas industriales, pero pueden viajar largas distancias. La radiación solar y las altas temperaturas promueven reacciones fotoquímicas que convierten estos precursores en ozono. En las ciudades, la concentración de ozono suele ser menor debido a la presencia de óxidos de nitrógeno que lo descomponen con rapidez. En contraste, las zonas rurales experimentan la acumulación de ozono debido a la menor cantidad de contaminantes que reaccionan con él (Figura 4).

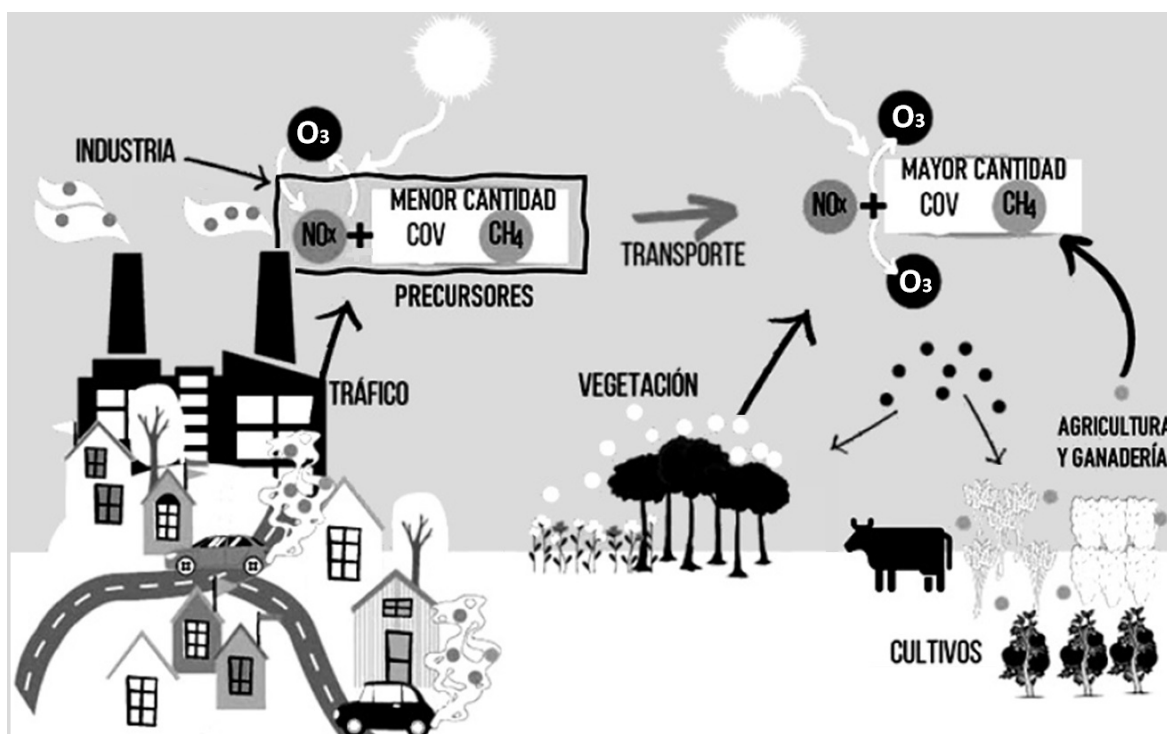


Figura 4. Formación del ozono troposférico mediante gases precursores: NO_x, COV y CH₄. Fuente: Los efectos negativos del ozono troposférico en la polinización. Samuel Prieto Benítez et al. Unidad de Ecotoxicología de la Contaminación Atmosférica, Departamento de Medio Ambiente, CIEMAT Madrid.

En general, los niveles de ozono presentan un marcado ciclo diario donde los valores máximos se alcanzan a mediodía, cuando la radiación solar es más intensa y la temperatura es más elevada, y descienden al caer la tarde, siendo mínimos durante la noche. Además, la concentración de ozono fluctúa con las estaciones del año. En zonas

afectadas por fuentes emisoras de precursores de ozono, las máximas concentraciones ocurren en primavera y verano, cuando las condiciones meteorológicas favorecen las reacciones fotoquímicas que lo forman. Por otro lado, los niveles más bajos se registran en las frías madrugadas de invierno.

Desde una perspectiva sanitaria, el incremento del ozono troposférico tiene un impacto directo en la salud humana. Este gas, irritante y oxidante, es perjudicial para la salud respiratoria y puede exacerbar enfermedades como el asma o la bronquitis. Su presencia incrementa también la vulnerabilidad a infecciones del tracto respiratorio y se ha vinculado con problemas cardiovasculares y nacimientos prematuros. En contraste, la reducción del ozono en la estratosfera resulta en una mayor exposición a la radiación ultravioleta en la superficie terrestre, lo que puede conducir a un incremento en la incidencia de cáncer de piel y cataratas, además de provocar daños en los ecosistemas (Figura 5).

Aunque ambos fenómenos están vinculados al cambio climático, afectan al medio ambiente de maneras diferentes. El ozono estratosférico influye en las alteraciones de los patrones de lluvia, mientras que el ozono troposférico actúa como un gas de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global (Figura 5). Las políticas ambientales y las mejoras tecnológicas han contribuido a reducir las emisiones de los precursores del ozono, lo que podría ayudar a mitigar estos impactos a largo plazo.

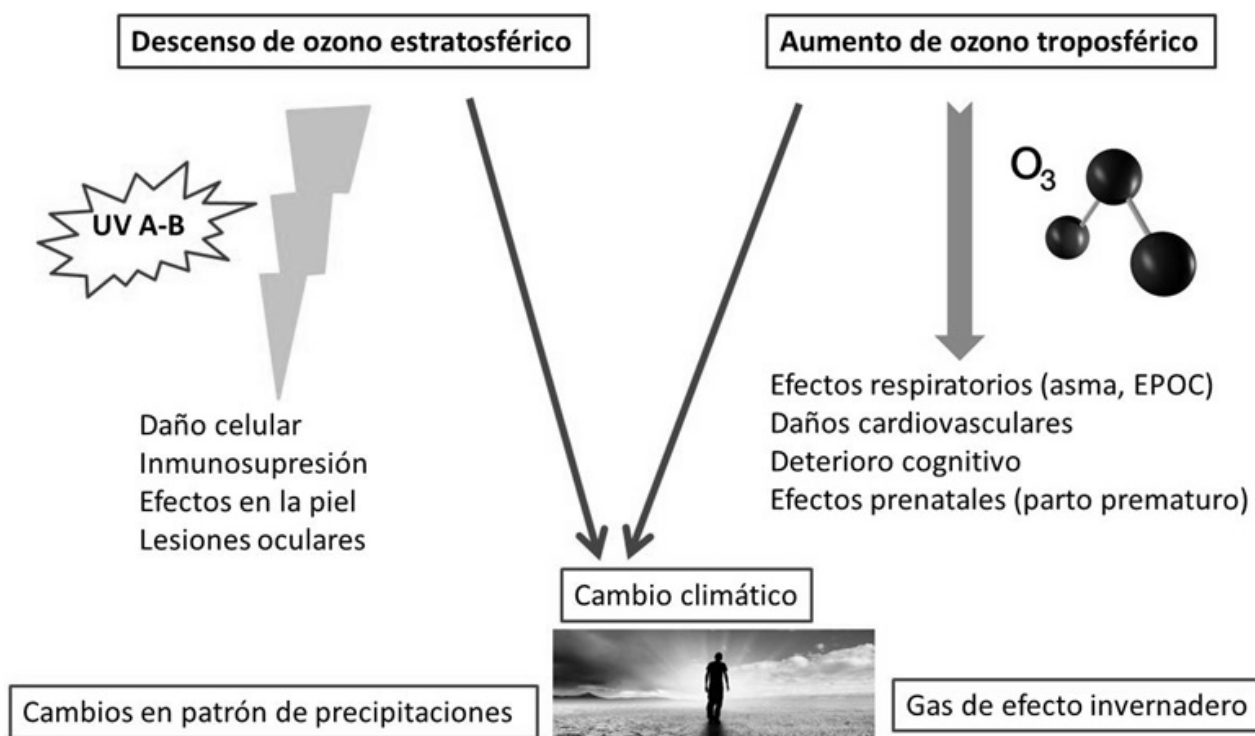


Figura 5. Efectos del ozono troposférico y estratosférico en la salud y el medio ambiente.

Nuevos contaminantes en el aire

Recientemente, la detección y análisis de nuevos tipos de contaminantes atmosféricos se ha vuelto un eje central en la investigación ambiental. Estos contaminantes emergentes, frecuentemente derivados de procesos industriales y tecnológicos modernos, complican aún más la comprensión de este complejo factor de riesgo. Estos nuevos elementos, a diferencia de los contaminantes conocidos como el monóxido de carbono o el dióxido de azufre, presentan retos distintos en cuanto a su identificación, medición y los efectos que ocasionan en la salud humana.

Los microplásticos, pequeñas partículas resultantes de la fragmentación de residuos plásticos más grandes, se están convirtiendo en un contaminante atmosférico emergente. Estas partículas pueden ser inhaladas y potencialmente pueden provocar problemas respiratorios. Además, al interactuar con procesos atmosféricos naturales, pueden generar reacciones químicas complejas que resultan en la formación de contaminantes secundarios, a menudo más perjudiciales que los originales. La presencia de microplásticos incluso en lugares remotos evidencia su capacidad de dispersarse por el aire a grandes distancias. Recientemente, se ha detectado también en el aire trazas de productos farmacéuticos y cosméticos, lo que genera preocupación por los efectos que su inhalación pueda tener a largo plazo.

Las fuentes de estos nuevos agentes contaminantes son variadas y están vinculadas con las dinámicas de la economía y la industria a nivel mundial. Este es el caso del incremento en el uso de químicos sintéticos en sectores como la agricultura y la industria, que resulta en la emisión de nuevos compuestos al aire. La producción y consumo de energía, críticos para el desarrollo económico, también emiten cantidades significativas de partículas y gases de efecto invernadero, exacerbando aún más la contaminación del aire.

La preocupación por la distribución de estas nuevas sustancias contaminantes es creciente. Su carácter transfronterizo exige la implementación de políticas internacionales y cooperación para su regulación y mitigación efectiva. Además, el ritmo acelerado de la innovación tecnológica, aunque proporciona soluciones potenciales, también puede introducir nuevos tipos de contaminantes. Esto supone un reto constante para investigadores y legisladores en la gestión de la calidad del aire para mitigar los potenciales nuevos impactos en la salud.

5. FUENTES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Las fuentes de contaminantes atmosféricos son variadas y se clasifican principalmente en naturales y antropogénicas. Las fuentes naturales incluyen fenómenos como erupciones volcánicas, incendios forestales y tormentas de polvo, que liberan partículas y gases a la atmósfera. Por otro lado, las actividades humanas, como la industria, la agricultura y el transporte, son responsables de una gran cantidad de emisiones nocivas. Estas emisiones incluyen gases como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas en suspensión, que pueden tener efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

El siguiente gráfico ilustra la proporción de diversas fuentes de contaminación del aire, incluyendo las partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} , el amoniaco, el dióxido de azufre, los compuestos orgánicos volátiles no metánicos y los óxidos de nitrógeno (Figura 6). Estos datos son importantes para entender la contribución relativa de cada fuente y para desarrollar estrategias efectivas que mitiguen la contaminación atmosférica.

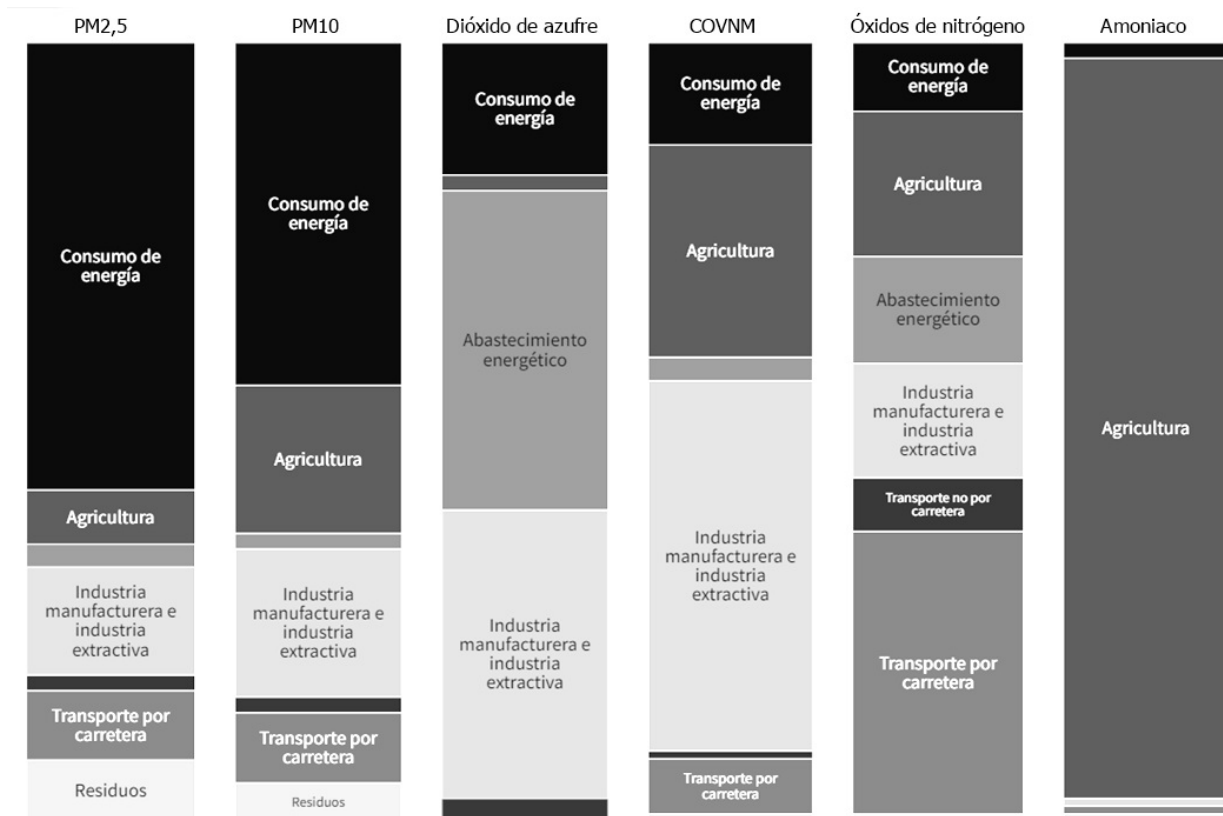


Figura 6. Fuentes de contaminantes atmosféricos. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente.

Como puede observarse, la emisión de contaminantes al aire proviene de múltiples sectores. Por ejemplo, el consumo de energía es el principal contribuyente a las partículas $PM_{2,5}$, con un 58 %, y también es responsable de un 44 % de las emisiones de PM_{10} . En cuanto al dióxido de azufre, el suministro de energía es el mayor emisor, con un 41 %, seguido por la industria manufacturera y extractiva, con un 37 %. Los compuestos orgánicos volátiles no metánicos proceden, en su mayoría, de la industria manufacturera y extractiva, con un 47 %. El sector del transporte terrestre lidera la

emisión de óxidos de nitrógeno, con un 37 %, mientras que la agricultura es casi la única fuente de amoniaco, con un 94 %.

Para mitigar estas emisiones, es crucial gestionar la agricultura de manera sostenible y avanzar hacia el uso de energías renovables. La adopción de tecnologías limpias y eficientes en la industria y el transporte también puede reducir significativamente la contaminación del aire. La sensibilización y la acción conjunta son esenciales para abordar este reto ambiental a nivel mundial.

6. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SALUD

La contaminación atmosférica representa un grave riesgo para la salud pública global. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), un porcentaje muy elevado de la población mundial respira aire que supera los límites recomendados y contiene altos niveles de contaminantes. Estos contaminantes pueden provocar enfermedades respiratorias, cardiovasculares, neurológicas y cáncer, especialmente en niños, mujeres y ancianos (Figura 7).

La exposición a la contaminación del aire no solo afecta a la salud, sino que también contribuye al cambio climático, lo que a su vez puede empeorar la calidad del aire. Por ello, la OMS insta a acelerar la adopción de medidas para proteger la salud humana y combatir la crisis climática. La implementación de políticas para reducir la contaminación del aire, como la transición a energías limpias y renovables, no solo mejoraría la salud pública, sino que también tendría beneficios a largo plazo para el clima del planeta.

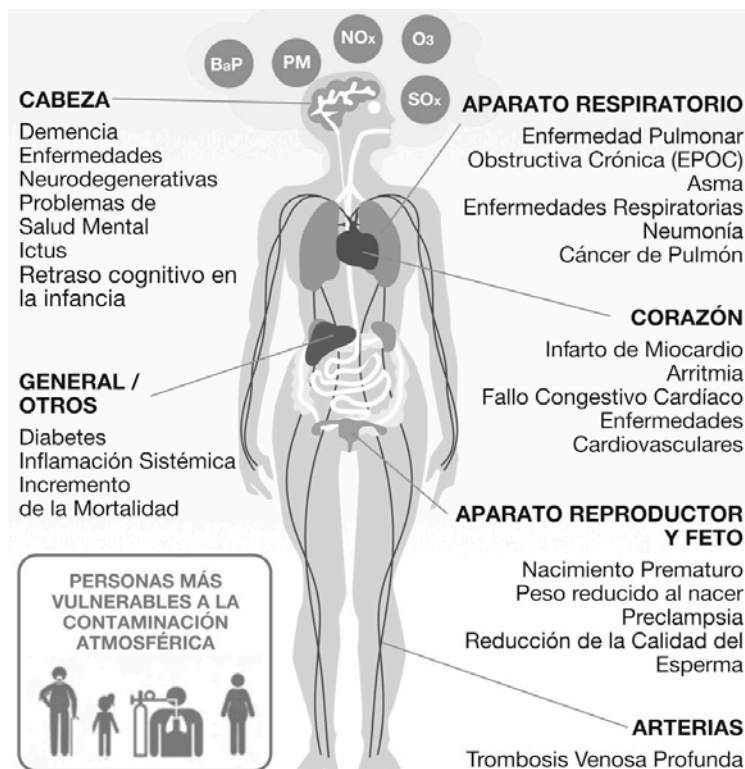


Figura 7. Efectos de la contaminación del aire en el cuerpo humano.

La contaminación del aire daña partes del organismo y reduce la esperanza de vida

La calidad del aire escapa del control personal, por lo que respiramos las sustancias que contenga sin ninguna posibilidad de elección. La exposición a un aire deteriorado perjudica a toda la población en menor o mayor medida, provocando una gran variedad de efectos en la salud con distinto grado de severidad, desde cambios funcionales subclínicos –no detectados por la persona– a diversos síntomas, visitas a los servicios de urgencias sanitarias, hospitalizaciones por diversas patologías y muertes prematuras. Dado que se asume que toda la población está expuesta, el número de casos atribuibles a este factor de riesgo ambiental es elevado.

El impacto en la salud se observa especialmente entre los grupos más susceptibles y vulnerables, que sufren con más rigor las consecuencias de vivir en entornos insanos. 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.

Las sustancias inhaladas 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 pueden llegar a distintas zonas del sistema respiratorio. Mientras que el SO₂ no suele pasar de la región traqueobronquial, el NO₂ y el O₃ pueden avanzar hasta los alveolos de los pulmones.

Los efectos de las partículas se relacionan directamente con su tamaño y composición química. Las partículas más pequeñas tienen una mayor capacidad para penetrar en el organismo, ofrecen una mayor superficie de contacto con los sistemas biológicos y presentan una reactividad química elevada. Esto puede resultar en un aumento del riesgo de lesión a tejidos y órganos, especialmente si las partículas contienen sustancias químicas perjudiciales. Considerando estas características, las partículas se han clasificado en fracciones según su diámetro aerodinámico.

La fracción inhalable (PM₁₀) incluye aquellas partículas que entran por la nariz y la boca, donde se retienen y sedimentan provocando el estornudo. Si logran pasar esta barrera inicial, llegan a la faringe y la laringe, donde pueden quedar atrapadas en la mucosidad y ser posteriormente expulsadas.

La **fracción torácica** (PM_{2,5}) comprende las partículas que llegan más allá de la laringe, es decir, a la tráquea y los bronquios. En esta región del sistema respiratorio, las partículas reducen su velocidad, se sedimentan y pueden ser expulsadas por la acción de los cilios a través de la tos.

La **fracción respirable** ($PM_{0,1}$) se refiere a las partículas que penetran en las zonas más profundas del sistema respiratorio y se depositan en los alvéolos pulmonares. En esta zona son mucho más difíciles de eliminar y pueden causar daños en los tejidos celulares. Estas partículas son capaces de atravesar la barrera alveolocapilar y, de este modo, pueden diseminarse por el torrente sanguíneo a otros órganos vitales, como el corazón y el cerebro (Figura 8).

En los alvéolos, los macrófagos, que son células del sistema inmunitario, actúan eficientemente para eliminar sustancias nocivas. Sin embargo, el efecto protector del sistema inmunitario puede reducirse al incrementarse la duración de la exposición a partículas respirables y el carácter tóxico de las sustancias.

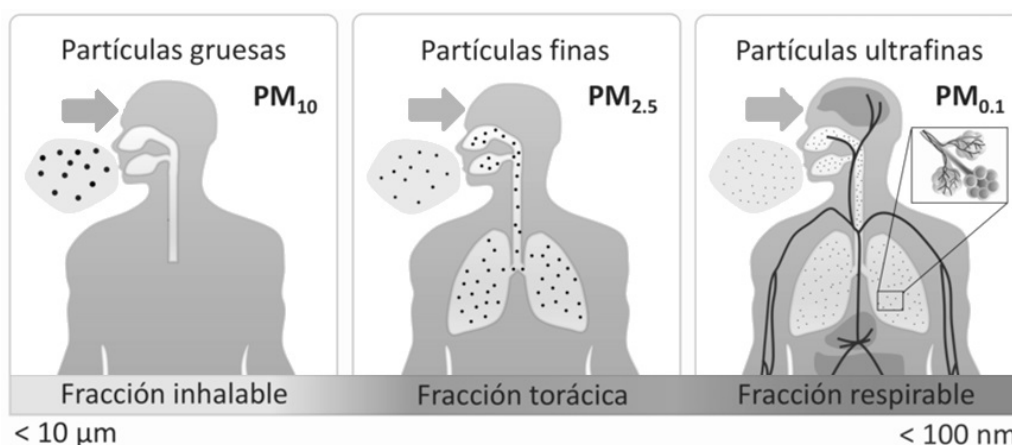


Figura 8. Potencial de penetración en el sistema respiratorio de cada fracción de partículas en suspensión. Fuente: Ilustración elaborada por Brayan Bustamante. Publicada en: Bustamante B. y Ortega Rosas C. I. Partículas contaminantes y cambio climático: detonantes de alergias por pólenes y esporas. Elementos 134 (2024) 111-116.

La contaminación atmosférica daña el sistema respiratorio

La inhalación de gases y partículas contaminantes a través del sistema respiratorio desencadena una serie de efectos agudos y crónicos en el organismo. Síntomas como la tos y la irritación de las vías respiratorias son frecuentes. Además, se vincula con la reducción de la función pulmonar, así como con la inflamación y la obstrucción bronquial. La exposición continua a agentes contaminantes del aire puede agravar enfermedades respiratorias preexistentes, tales como el asma, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y la bronquitis. Se incrementa así el riesgo de mortalidad asociado a complicaciones respiratorias y disminuye la esperanza de vida.

La exposición a contaminantes ambientales interfiere con el desarrollo normal de los sistemas respiratorio e inmunológico. Como consecuencia, puede producirse una disminución en la función pulmonar y una menor resistencia a las infecciones respiratorias. Esta situación se asocia, además, con un incremento en la incidencia de alergias y asma. En particular, los niños que crecen en ambientes con alta contaminación aérea pueden ver comprometido el desarrollo de sus pulmones, lo que predispone a una mayor fragilidad pulmonar durante su vida. Además, vivir en áreas con elevada presencia de partículas, como $PM_{2,5}$, y NO_2 aumenta la probabilidad de

sufrir síntomas respiratorios recurrentes, episodios de bronquitis, infecciones -como la neumonía-, ataques de asma y, potencialmente, cáncer de pulmón.

La contaminación atmosférica afecta al sistema cardiovascular

La carga de enfermedad derivada de este riesgo ambiental 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 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 segunda causa de muerte más frecuente en España. Esto explica en parte que este peligro ambiental cause muchas más muertes relacionadas con estas dolencias. El aire contaminado no sólo influye en la exacerbación de enfermedades cardíacas, sino que también interfiere en el desarrollo de estas patologías.

La Sociedad Europea de Cardiología estima que este factor de riesgo ambiental es responsable de más de un 3 % de años de vida ajustados por discapacidad. Esta entidad elaboró un documento de consenso de expertos que resumía las relaciones entre la contaminación atmosférica y las enfermedades cardiovasculares.

La exposición a las partículas finas incrementa la presión arterial y la viscosidad plasmática, además de modificar la coagulación sanguínea. Todos estos factores favorecen el desarrollo de trombos y coágulos, que explican una mayor incidencia de la cardiopatía isquémica (infartos de miocardio y anginas de pecho). Se ha demostrado su implicación en la fisiología cardiovascular, en la enfermedad coronaria, en la insuficiencia cardíaca, los accidentes cerebrovasculares, la fibrilación auricular, la mayor incidencia de cardiopatías congénitas, la muerte súbita y la mayor mortalidad en pacientes trasplantados de corazón.

La contaminación atmosférica produce cáncer

La contaminación atmosférica ha sido identificada como un factor de riesgo significativo para el desarrollo de cáncer. En 2013, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC), organismo especializado de la Organización Mundial de la Salud –OMS–, declaró la contaminación atmosférica como cancerígena para humanos (Grupo 1). Específicamente señalaron que existe suficiente evidencia para las PM_{2,5} y el cáncer de pulmón. Estas partículas pueden desencadenar una respuesta que agrava la inflamación pulmonar y promueve el crecimiento tumoral. En la Unión Europea se asocia a este factor de riesgo entre el 10-20 % de los casos de cáncer de pulmón.

La IARC también ha clasificado como carcinógenos determinados contaminantes que pueden estar presentes en el aire, incluyendo algunos compuestos orgánicos volátiles (benceno, formaldehído, cloruro de vinilo, óxido de etileno), metales (arsénico, cadmio,

romo, níquel), 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.

Por otro lado, la IARC determinó que existe una asociación positiva con el incremento de cáncer de vejiga. Se está examinando la relación con otros tipos de cáncer aunque, hasta la fecha, los resultados no son concluyentes. El cáncer de mama se ha encontrado asociado principalmente con el NO₂ y las PM_{2,5}. La evidencia actual sugiere una posible conexión entre la contaminación atmosférica y la leucemia mieloide, un tipo de cáncer que afecta a las células de la médula ósea y altera la producción normal de células sanguíneas. Estudios han sugerido que ciertos contaminantes presentes en el aire, como el benceno y otros hidrocarburos aromáticos policíclicos, pueden tener un papel en el desarrollo de trastornos hematológicos, incluyendo varios tipos de leucemia.

La contaminación atmosférica se relaciona con la muerte prematura

La contaminación atmosférica tiene un impacto negativo en la salud que puede resultar en una disminución de la calidad de vida y una esperanza de vida más corta. Según la Organización Mundial de la Salud, el aire contaminado fue el causante de alrededor de 8,1 millones de fallecimientos en 2023, lo que lo sitúa como uno de los principales riesgos para la salud a nivel global. La mayoría de estas muertes están relacionadas con enfermedades cardiovasculares (80 %), seguidas por problemas respiratorios (11 %) y cáncer de pulmón (6 %). El uso de combustibles fósiles, especialmente en interiores, ha tenido un efecto considerable en regiones como África y Asia, donde la exposición a estos contaminantes es particularmente alta.

La contaminación del aire es también una preocupación significativa en Europa. La Agencia Europea de Medio Ambiente atribuye a este factor de riesgo ambiental unas 400.000 muertes prematuras al año. En el caso específico de España, la cifra alcanza las 21.000 muertes anuales, principalmente por la exposición a partículas PM_{2,5}, NO₂ y O₃. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico estima que el impacto económico de la contaminación atmosférica en Europa oscila entre 330.000 y 940.000 millones de euros, lo que representa un porcentaje significativo del PIB de la Unión Europea (entre el 3 y el 9 %).

Para enfrentar este problema, la Unión Europea ha implementado nuevas directivas destinadas a mejorar la calidad del aire. Sin embargo, el desafío de reducir el impacto de la contaminación atmosférica persiste. La implementación de políticas más rigurosas y el seguimiento de las directrices de la Organización Mundial de la Salud podrían disminuir notablemente el número de muertes y mejorar la salud pública. En este sentido, entre 2005 y 2020, el número de muertes prematuras por exposición a PM_{2,5} disminuyó un 45 % en la UE. Si esta tendencia continúa, se espera que la UE cumpla el objetivo del Plan de Acción “Contaminación Cero” de reducir en un 55 % las muertes prematuras causadas por la contaminación atmosférica de aquí a 2030, tomando como referencia los datos de 2005.

Los niños son particularmente vulnerables a la contaminación atmosférica

Según la OMS, cerca del 93 % de los menores de 15 años del mundo respiran aire tan contaminado que pone en grave peligro su salud y su crecimiento. 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). Este parámetro sanitario es trascendental porque se correlaciona con una mayor morbilidad perinatal y con el estado de salud a lo largo de la vida de la persona: menor peso al nacimiento, peor salud. La exposición prenatal a $PM_{2,5}$ y NO_2 se asocia con infecciones respiratorias y desarrollo de asma durante la niñez. Algunos tipos de leucemia infantil se han asociado con la contaminación del aire.

Además, las $PM_{2,5}$ y el NO_2 influyen en la capacidad cognitiva y el desarrollo neurológico, que es el proceso de evolución del sistema nervioso que se extiende desde el período embrionario –estadio inicial del embarazo– hasta la adolescencia. Los estudios experimentales sugieren que la contaminación atmosférica puede ocasionar un serio impacto en el sistema nervioso central, ya que se ha observado efectos tales como la inflamación crónica del cerebro, la activación de las células microglía (principal línea de defensa del sistema nervioso central) y daños en la sustancia blanca. Además, la investigación científica ha demostrado que la exposición temprana a la contaminación atmosférica puede estar asociada con un mayor riesgo de padecer algún Trastorno del Espectro Autista (TEA) o el Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH).



Figura 9. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud infantil. Fuente: OPS-OMS.

La contaminación atmosférica representa un riesgo significativo para la salud de las personas mayores

Desde un punto de vista biológico, el envejecimiento resulta de la acumulación de daños moleculares y celulares a lo largo del tiempo, lo que conduce a un declive gradual de las capacidades físicas y mentales. Sin embargo, la experiencia del envejecimiento es muy diversa y está influenciada por una variedad de factores, incluyendo la genética, el estilo de vida, el entorno y las intervenciones médicas. La contaminación atmosférica está relacionada con condiciones crónicas y discapacidades relacionadas con la edad, como la EPOC, la diabetes, las enfermedades cardiorrespiratorias, el cáncer, la depresión y la demencia.

Las partículas contaminantes del aire pueden acelerar los procesos neurodegenerativos mediante enfermedades cerebrovasculares y cardiovasculares. En particular, estudios recientes han demostrado una relación consistente entre este riesgo ambiental y la demencia clínica. Esta patología puede estar provocada por varias enfermedades, de las cuales el alzhéimer es la más frecuente y la responsable de cerca del 70 % de los casos. Otras causas de demencia son la demencia vascular, la enfermedad de Parkinson, la demencia con cuerpos de Lewy o la demencia frontotemporal.

En Europa, se estima que la contaminación contribuye al 6,3 % de los casos de demencia, lo que equivale a más de medio millón de afectados. El impacto económico y social de la demencia es significativo, con costes que ascienden a 392.000 millones de euros en Europa. Cada aumento de 2 a 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la exposición media anual a las $\text{PM}_{2,5}$ aumenta el riesgo de desarrollar demencia en un 4 %. La evidencia sugiere que reducir la exposición a la contaminación del aire podría prevenir o retrasar muchos casos de demencia, lo que tiene importantes implicaciones políticas y de salud pública.

Las personas que viven en las ciudades son las más afectadas

La contaminación atmosférica incide con mayor gravedad en entornos urbanos que rurales, originada por la concentración de actividades propias de la urbanización. La densidad de población en ciudades conlleva un incremento de operaciones industriales, uso de sistemas de calefacción, construcciones y un notable tráfico de vehículos, todos contribuyentes significativos a la emisión de contaminantes. Además, la configuración arquitectónica urbana, con sus altos edificios y calles angostas, obstruye la circulación del aire, lo que resulta en una acumulación de sustancias nocivas. Adicionalmente, la infraestructura de las ciudades frecuentemente retiene el calor, generando "islas de calor" que pueden intensificar los efectos de ciertos agentes contaminantes.

Por otro lado, las zonas rurales suelen gozar de una mejor calidad de aire en comparación con las urbanas, gracias a la baja densidad de población y a la reducción de fuentes de contaminación. La presencia de vegetación y espacios abiertos facilita la dispersión de contaminantes, atenuando sus efectos nocivos. Sin embargo, es fundamental reconocer el impacto ambiental negativo que pueden tener algunas

prácticas agrícolas. El uso de pesticidas y fertilizantes, así como la quema de residuos, son actividades que pueden incrementar la contaminación. Además, los contaminantes pueden viajar desde ciudades a zonas rurales por medio de fenómenos meteorológicos, como los vientos, extendiendo su alcance.

Las políticas de control de la calidad del aire deben seguir las recomendaciones de la OMS para proteger la salud de la población

Las Directrices de la OMS sobre la calidad del aire, actualizadas en 2021, señalan unos límites de contaminantes atmosféricos que no deberían sobrepasarse para una adecuada protección de la salud. Estas recomendaciones se fundamentan en la evidencia científica mundial existente sobre los efectos de estos compuestos sobre la salud. Generalmente, la OMS plantea metas mucho más estrictas que las reguladas por las normativas sobre calidad del aire. A modo de ejemplo, la OMS aconseja un máximo anual de $PM_{2,5}$ de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que es significativamente más bajo que el valor límite establecido por la Unión Europea de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El cumplimiento de estas recomendaciones no solo beneficiaría la salud de las poblaciones, sino que también contribuiría a la lucha contra el cambio climático, ya que muchos de los contaminantes atmosféricos también son gases de efecto invernadero. Sin embargo, alcanzar estos estándares es todavía un desafío considerable. Los países europeos, a pesar de haber realizado avances significativos en la regulación de emisiones nocivas, todavía se encuentran lejos de cumplir con las metas propuestas por la OMS. Esto se debe a una combinación de factores, incluyendo la infraestructura existente, las políticas económicas y sociales, y la necesidad de equilibrar el crecimiento económico con la protección ambiental.

La reducción de exposición a la contaminación siempre es beneficiosa para la salud, por lo que cuanto más se aproxime la legislación –y su cumplimiento– a la recomendación de la OMS mayor protección a la salud se espera. No obstante, en 2022, la mayoría de la población urbana de la UE continuó estando expuesta a niveles de contaminantes del aire que son perjudiciales para la salud (Figura 10).

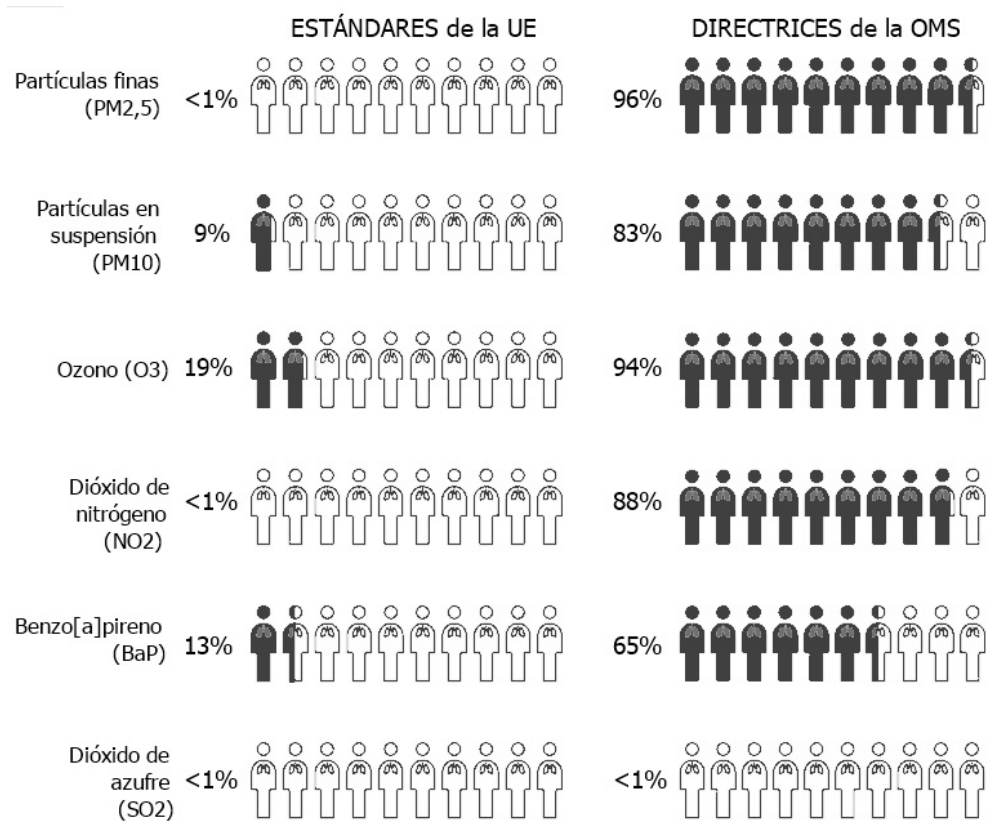


Figura 10. Porcentaje de la población urbana de la UE expuesta a concentraciones de contaminantes atmosféricos por encima de ciertos estándares de la UE y directrices de la OMS en 2022.

Exposición por encima de los estándares de la UE: la población urbana de la UE está expuesta a concentraciones anuales de PM_{2,5} por encima de los 25 µg/m³; concentraciones diarias de PM₁₀ por encima de los 50 µg/m³ durante más de 35 días al año; concentraciones máximas diarias medias de 8 horas de O₃ por encima de los 120 µg/m³ durante más de 25 días al año; concentraciones anuales de NO₂ por encima de los 40 µg/m³; concentraciones anuales de Benzo[a]pireno (BaP) por encima de 1 ng/m³; y concentraciones diarias de SO₂ por encima de los 125 µg/m³ durante más de tres días al año.

Exposición por encima de las directrices de la OMS: la población urbana de la UE está expuesta a concentraciones anuales de PM_{2,5} por encima de los 5 µg/m³; concentraciones anuales de PM₁₀ por encima de los 15 µg/m³; concentraciones máximas diarias medias de 8 horas de O₃ que superan los 100 µg/m³ durante más de 3-4 días al año; concentraciones anuales de NO₂ por encima de 10 µg/m³; concentraciones anuales de BaP por encima de los 0,12 ng/m³; y concentraciones diarias de SO₂ por encima de los 40 µg/m³ durante más de tres o cuatro días al año. Fuente: AEMA 2024.

Big data, inteligencia artificial y salud pública

"Big data" designa conjuntos de información de gran volumen y complejidad que superan la capacidad de las aplicaciones tradicionales de procesamiento de datos. La inteligencia artificial se nutre de estos datos para profundizar en la comprensión de los desafíos ambientales y su impacto en la salud. Este conocimiento impulsa decisiones informadas para abordar la contaminación del aire y fortalecer la salud comunitaria.

El análisis de big data revela patrones y tendencias en la contaminación atmosférica, lo que facilita la prevención de riesgos. Esta capacidad predictiva es fundamental para el diseño de urbes más sostenibles y la mejora de la calidad de vida urbana. Estas nuevas herramientas posibilitan la vigilancia de la calidad del aire en tiempo real, la predicción

de niveles de contaminación futuros y el desarrollo de estrategias más efectivas para su mitigación.

La innovación en la recopilación de datos, como los sensores gestionados por los ciudadanos, mejora la monitorización ambiental y la evaluación de la exposición a contaminantes. La integración de datos de múltiples fuentes, incluyendo satélites y redes digitales, permite realizar análisis más precisos sobre contaminantes y sus efectos. Estas tecnologías detectan zonas de mayor riesgo y poblaciones vulnerables, lo que permite optimizar la distribución de recursos y las estrategias en salud pública.

7. IMPLICACIÓN DE LA SOCIEDAD EN LA MEJORA DE 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 calidad del aire y la salud debe ser priorizada 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.).

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. Organizaciones de distintos ámbitos recomiendan acciones que reduzcan la exposición cotidiana a la contaminación atmosférica, tales como limitar las actividades al aire libre durante episodios de contaminación. También promueven estilos de vida y hábitos saludables, incluyendo la práctica de ejercicio físico o una dieta rica en antioxidantes. Además, instan a una vigilancia activa de la salud, 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.

En grandes ciudades, los planes dirigidos al control del tráfico motorizado suelen ser muy beneficiosos en términos de calidad del aire y de salud pública. Ejemplos de estas medidas incluyen la creación de las zonas de bajas emisiones -implantadas ya en muchas ciudades europeas-, la limitación de la velocidad máxima o del estacionamiento del vehículo privado, el peaje urbano o las circunvalaciones para el tránsito rodado que bordean los núcleos urbanos. Otras iniciativas serían el fomento del transporte público o la bicicleta, la renovación de la flota de transporte, los servicios públicos prestados por vehículos híbridos o eléctricos, la peatonalización de calles o los caminos escolares seguros, el acceso restringido a residentes en determinadas áreas o la aprobación de protocolos específicos para episodios de alta contaminación de ciertos contaminantes, como el NO₂.

8. ¿QUÉ AIRES NOS TRAERÁ EL FUTURO?

La ciencia ha demostrado que la contaminación atmosférica produce efectos nocivos para la salud, especialmente en lo que se refiere a la morbilidad y mortalidad 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 ciudadana representa el derecho de las personas a estar informados y de tomar parte activa en las decisiones que modifican su entorno vital.

En definitiva, la calidad del aire en el futuro dependerá de una combinación de factores, incluyendo políticas ambientales, avances tecnológicos y compromiso social. Aunque la contaminación atmosférica sigue siendo un motivo de preocupación sanitaria, existen posibilidades de actuación para mitigar sus efectos adversos. La colaboración 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”.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alahmad B, Khraishah H, Althalji K, Borchert W, Al-Mulla F, Koutrakis P. Connections Between Air Pollution, Climate Change, and Cardiovascular Health. *Can J Cardiol.* 2023 Sep;39(9):1182-1190. doi: 10.1016/j.cjca.2023.03.025. Epub 2023 Apr 6. PMID: 37030516; PMCID: PMC11097327.
- Boldo E. La contaminación del aire. Editorial Catarata. ISBN (Catarata): 978-84-9097-228-1. ISBN (ISCI): 978-84-95463-55-5. NIPO: 725160248. Ref: MQS003. 128 páginas. Octubre 2016. Descarga libre del libro: <http://gesdoc.isciii.es/gesdoccontroller?action=download&id=22/01/2019-4c9d67e7e3>
- Chen F, Zhang W, Mfarrej MFB, Saleem MH, Khan KA, Ma J, Raposo A, Han H. Breathing in danger: Understanding the multifaceted impact of air pollution on health impacts. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2024 Jul 15;280:116532. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116532. Epub 2024 Jun 7. PMID: 38850696.
- Karimi B, Samadi S. Long-term exposure to air pollution on cardio-respiratory, and lung cancer mortality: a systematic review and meta-analysis. *J Environ Health Sci Eng.* 2024 May 9;22(1):75-95. doi: 10.1007/s40201-024-00900-6. PMID: 38887768; PMCID: PMC11180069.
- Fiter RJ, Murphy LJ, Gong MN, Cleven KL. The impact of air pollution on asthma: clinical outcomes, current epidemiology, and health disparities. *Expert Rev Respir Med.* 2023 Dec;17(12):1237-1247. doi: 10.1080/17476348.2024.2307545. Epub 2024 Jan 25. PMID: 38247719.
- Mazumder H, Rimu FH, Shimul MH, Das J, Gain EP, Liaw W, Hossain MM. Maternal health outcomes associated with ambient air pollution: An umbrella review of systematic reviews and meta-analyses. *Sci Total Environ.* 2024 Mar 1;914:169792. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169792. Epub 2024 Jan 9. PMID: 38199356.
- Peden DB. Respiratory Health Effects of Air Pollutants. *Immunol Allergy Clin North Am.* 2024 Feb;44(1):15-33. doi: 10.1016/j.iac.2023.07.004. Epub 2023 Sep 7. PMID: 37973257.
- Pham KT, Chiew KS. The impact of air pollution on neurocognitive development: Adverse effects and health disparities. *Dev Psychobiol.* 2023 Dec;65(8): e22440. doi: 10.1002/dev.22440. PMID: 38010305; PMCID: PMC10683861.
- Ramamoorthy T, Nath A, Singh S, Mathew S, Pant A, Sheela S, Kaur G, Sathishkumar K, Mathur P. Assessing the Global Impact of Ambient Air Pollution on Cancer Incidence and Mortality: A Comprehensive Meta-Analysis. *JCO Glob Oncol.* 2024 Mar;10: e2300427. doi: 10.1200/GO.23.00427. PMID: 38513187; PMCID: PMC10965216.
- Wilker E H, Osman M, Weisskopf M G. Ambient air pollution and clinical dementia: systematic review and meta-analysis *BMJ* 2023; 381: e071620 doi: 10.1136/bmj-2022-071620

Causam

Club de Amigos de la Unesco de Madrid