

Contaminación atmosférica

Objetivos del capítulo

La *atmósfera*, que es la envoltura gaseosa que se encarga de proteger nuestro planeta, se encuentra en un delicado equilibrio que permite mantener la vida en la Tierra. Sin embargo, este equilibrio, que ha permanecido sin grandes alteraciones a lo largo de millones de años, se ha visto amenazado por las actividades humanas de las últimas décadas, que han liberado una serie de contaminantes en el aire que respiramos. En este capítulo, exploraremos en detalle los componentes de la atmósfera y la diversidad de contaminantes que la afectan, así como los efectos que estas emisiones han tenido en nuestro entorno y en la salud de las personas y del resto de seres vivos.

Comenzaremos por el estudio de la estructura de la atmósfera, desglosando sus diferentes capas y composición química, para, posteriormente, introducir los principales contaminantes atmosféricos, desde partículas en suspensión hasta los gases dañinos para la salud humana y el medioambiente.

Además, abordaremos las consecuencias de la lluvia ácida, que ha transformado paisajes y suministros de agua en todo el mundo. Analizaremos la peligrosa disminución de la capa de ozono, que protege la vida en la Tierra de la dañina radiación ultravioleta. Y, por supuesto, discutiremos el fenómeno del *efecto invernadero*, que se ha convertido en un protagonista destacado en el debate global sobre el cambio climático.

Dentro de las grandes ciudades, la contaminación del aire adopta una forma particularmente dañina, manifestándose en el smog y en el ozono troposférico. Abordaremos cómo estas amenazas, a menudo invisibles, pueden tener un impacto significativo en la salud de las poblaciones urbanas y en la calidad de vida en las ciudades.

A lo largo de este capítulo, intentaremos descubrir la complejidad del equilibrio de la atmósfera y los desafíos a los que nos enfrentamos para mantenerla limpia y saludable. Comprender la compleja interacción entre la contaminación atmosférica y el bienestar de nuestro planeta es el primer paso hacia la búsqueda de soluciones efectivas para permitir un futuro más limpio y sostenible a las generaciones venideras.

1. La atmósfera

Desde el punto de visto del ingeniero medioambiental, es de vital importancia conocer la composición de la atmósfera terrestre, ya que esta es la base para comprender su comportamiento y cómo le pueden afectar los cambios tanto naturales como artificiales. La atmósfera es una compleja mezcla de gases que rodea nuestro planeta y su composición influye en una amplia gama de procesos medioambientales. En este apartado es fundamental estudiar en detalle los componentes principales de la atmósfera y su función, para, posteriormente, poder comprender cualquier problema medioambiental.

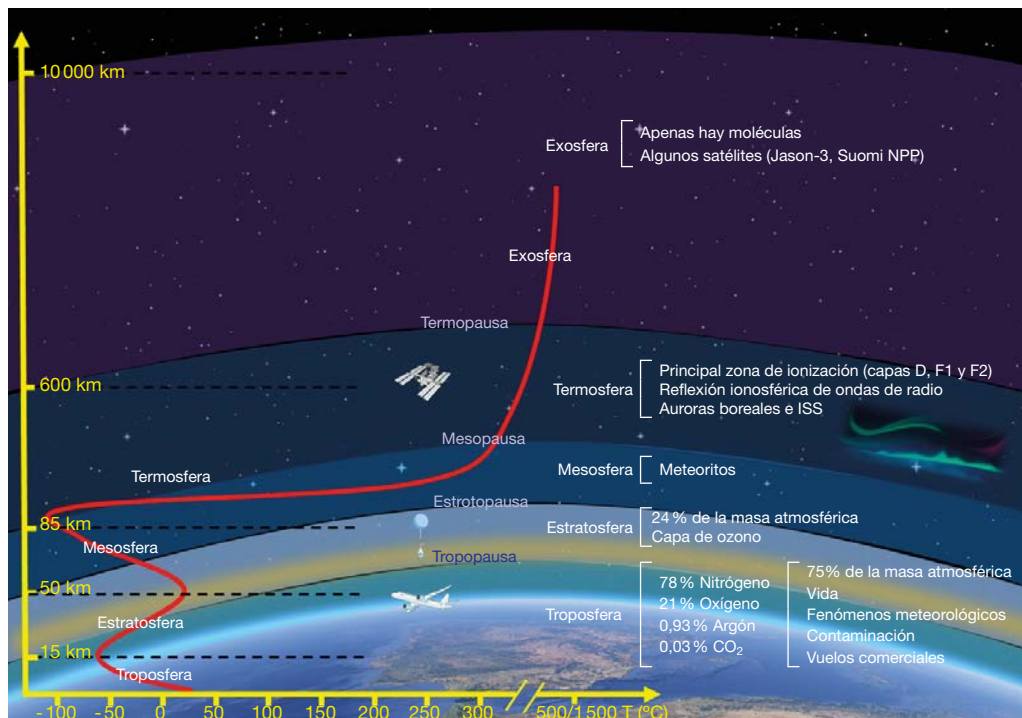
La atmósfera terrestre proporciona las condiciones esenciales para la vida y desempeña un papel fundamental en una serie de procesos físicos y químicos que afectan a la Tierra. Como ingeniero, comprender la atmósfera es crucial para diseñar y operar sistemas que interactúan con ella, como aeronaves, satélites, sistemas de control ambiental y energía renovable. En este capítulo, exploraremos en detalle la estructura y las características de la atmósfera, así como su importancia para la ciencia y la ingeniería.

Podríamos definir la *atmósfera terrestre* como una delgada capa de gases que rodea la Tierra y que se extiende desde su superficie hasta altitudes significativas, de unos 2000 km aproximadamente, y es fundamental para mantener la vida en nuestro planeta. Esta capa de gases proporciona una serie de funciones esenciales, que incluyen la absorción y la dispersión de la radiación solar, la regulación de la temperatura, la protección contra radiaciones dañinas y la participación en ciclos biogeoquímicos, como el ciclo del carbono, el del nitrógeno o el del agua.

La atmósfera terrestre, a pesar de su aparente delgadez, se revela como un entorno sumamente complejo y heterogéneo en su estructura; por ejemplo, aunque alcance los 10 000 km, el 75 % de su masa se encuentra en los primeros 11 km. Esta heterogeneidad se debe a una interacción dinámica de procesos biológicos, geológicos y químicos, a la constante influencia de radiación solar y a la influencia de la atracción gravitatoria de nuestro planeta. A medida que ascendemos desde la superficie de la Tierra, nos adentramos en una sucesión de capas con composiciones y propiedades físicas diferenciadas, las cuales se ajustan de manera precisa a las variaciones de presión y temperatura. Estas capas, que marcan las divisiones fundamentales de la atmósfera en función del perfil de temperaturas vertical, son la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la termosfera y la exosfera, como se ilustra en la figura 1. Se ha marcado con una línea roja el perfil de temperaturas vertical. Hay dos capas en las que, al aumentar la altura, disminuye la temperatura; otras dos capas en las que, al aumentar la altura, aumenta la temperatura debido a procesos de absorción solar de las moléculas que la forman; y la capa más externa, que se mantiene más o menos isoterma.

En esta clasificación no se incluye la ionosfera, ya que es una capa que se clasifica por la composición de iones que contiene, aunque la mayoría de los autores coinciden en que estaría aproximadamente en los límites que marca la termosfera. Tampoco se ha incluido la magnetosfera por el mismo motivo. En este caso, la clasificación se basaría en la interacción magnética, aunque suele coincidir con los límites fijados para la exosfera.

Figura 1. Distribución de las distintas capas de la atmósfera con sus principales características



Nota. Se ha representado el perfil de temperatura en función de la altura.

Fuente: elaboración propia.

1.1. Capas de la atmósfera

La atmósfera terrestre se divide en varias capas diferenciadas, cada una con propiedades y características únicas. Si se usa una clasificación en función de la temperatura, son cinco las capas que la conforman, que en orden ascendente serían:

- Troposfera.
- Estratosfera.
- Mesosfera.
- Termosfera.
- Exosfera.

A) Troposfera

Es la capa más cercana a la superficie de la Tierra y presenta mayor espesor en el ecuador que en los polos. Se extiende hasta una altitud de aproximadamente 17-18 km sobre el ecuador y de 8-15 km sobre los polos.

En esta capa se producen los movimientos de aire, tanto verticales como horizontales, que provocan la mayoría de los fenómenos meteorológicos. Contiene la mayor parte del vapor de agua al estar cerca de la hidrosfera, por lo que es la zona donde se suelen formar la mayor parte de las nubes. Además, es la capa que contiene el polvo y las cenizas provenientes de la litosfera.

En la troposfera, la temperatura disminuye con la altitud, razón de 0,64 °C cada 100 m de desnivel. Como norma nemotécnica se suele tomar 1 °C cada 150 m. El límite superior de esta capa se denomina *tropopausa*.

B) Estratosfera

Se encuentra por encima de la tropopausa y se extiende hasta una altitud de aproximadamente de 50 km, a cuyo límite se le denomina *estratopausa*. Una característica clave de la estratosfera es la presencia de la capa de ozono, que absorbe y filtra la radiación ultravioleta dañina del Sol.

En esta capa, la temperatura aumenta con la altitud debido a la presencia de ozono (O₃). La capa de ozono se localiza aproximadamente en el intervalo de 15 a 50 km y tiene la propiedad de absorber en el rango de las radiaciones ultravioletas (con una longitud de onda λ menor de 360 nm) que nos llegan del Sol. Por este motivo, en esta zona se produce ese efecto de calentamiento.

C) Mesosfera

Se extiende desde la estratosfera hasta una altitud aproximada de 80-85 km, que es la mesopausa. Es la capa más desconocida de la atmósfera por su dificultad para ser estudiada, ya que está demasiado alta para los globos sonda y demasiado baja para los satélites. En esta capa, la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud, y es el lugar donde ocurren los fenómenos conocidos como *meteoros* y *meteoritos*.

D) Termosfera

Se encuentra, aproximadamente, entre los 85 y 600 km de altitud. En esta capa, la temperatura aumenta a medida que subimos debido a la ionización que sufren los gases como consecuencia de la absorción de la radiación solar, fundamentalmente de rayos X y gamma,

lo que produce la ionización de las moléculas y átomos presentes a esa altura. Esta ionización que se produce es el motivo de que a una parte de esta capa se la denomine *ionosfera*. Se producen reacciones de ionización y, en función de las reacciones que se produzcan, se les dan distintos nombres a las distintas capas:

- Capa D. Es la capa más baja (70-90 km), siendo la de menor ionización.
- Capa E. Se sitúa por encima de la capa D (90-160 km) y su nivel de ionización es mayor.
- Capa F. Se divide en F1 y F2, se sitúa por encima de la capa E (160-600 km) y su nivel de ionización es el mayor.

Las capas D, E y F1 únicamente permanecen ionizadas durante el día, por efecto de las radiaciones que reciben del Sol. Durante la noche, en las capas D, E y F1 se eliminan los iones, recombinándose estos últimos con electrones y formando de nuevo átomos neutros, y solo la capa F2 se mantiene ionizada mediante la absorción de todas las radiaciones extrasolares (radiación proveniente de otras estrellas, galaxias lejanas, rayos cósmicos, etc.), que no llegan a penetrar en capas más interiores.

También es el lugar donde se encuentran la Estación Espacial Internacional (EEI) y otros satélites de órbita baja.

En la termosfera, la temperatura media es de unos 200 °C, pero la temperatura es más alta durante el día que durante la noche y, aproximadamente, 500 °C mayor cuando el Sol está muy activo. Debe tenerse en cuenta que la temperatura en la atmósfera, a 500-1 000 km de la Tierra, puede variar según la hora del día, de la ubicación y de otros factores. La temperatura en la atmósfera, a una altitud superior a los 150 km, varía según las fuentes que sean consultadas. Según el UCAR Center for Science Education, en la parte superior de la termosfera (entre 500 y 1 000 km), la temperatura puede oscilar entre 500 °C y 2 000 °C o incluso más. A pesar de ser temperaturas altas, apenas hay sensación de calor, ya que la presión es muy baja, es decir, la cantidad de átomos es muy pequeña.

Estas capas ionizadas, al tener partículas con carga, son conductoras de la electricidad, y el movimiento de los iones está regulado por el campo magnético terrestre. Además, reflejan las ondas hercianas emitidas desde la superficie terrestre, lo que permite que las señales de radio viajen grandes distancias. Todas las capas de la ionosfera, salvo la D, reflejan las ondas de radio como consecuencia de la ionización.

E) Exosfera

Es la capa más externa de la atmósfera terrestre y se extiende desde la termosfera hasta el espacio exterior, es decir, desde los 600 hasta los 10 000 km. Aquí, los gases se vuelven cada vez más dispersos y, finalmente, se funden con el espacio interplanetario. La mayoría de los gases quedan atrapados por la gravedad terrestre, pero los más ligeros, como los átomos de hidrógeno y helio, pueden lograr la velocidad suficiente para poder escapar al espacio.

1.2. Composición química

La atmósfera terrestre es una mezcla compleja de gases que rodea la Tierra, retenida por la gravedad del planeta. Aunque a simple vista puede parecer uniforme, su composición varía considerablemente en función de la distancia vertical. Si atendemos a la composición química, la atmósfera la podríamos clasificar en dos:

- Homosfera
- Heterosfera.

Además de las dos clasificaciones que dividen la atmósfera en distintas capas, existen nombres especiales de capas por su función, por su comportamiento físico o químico o por su especial composición. Entre estas están las ya mencionadas *capas de ozono* y la *ionosfera*, pero también la *magnetosfera*, que se encuentra en la capa más externa y nos protege desviando partículas cargadas y el viento solar e impidiendo que entren en las capas más internas de la atmósfera.

A continuación, vamos a explicar detalladamente las características más relevantes de cada una de las dos capas en las que se divide la atmósfera desde el punto de vista de su composición química:

A) Homosfera

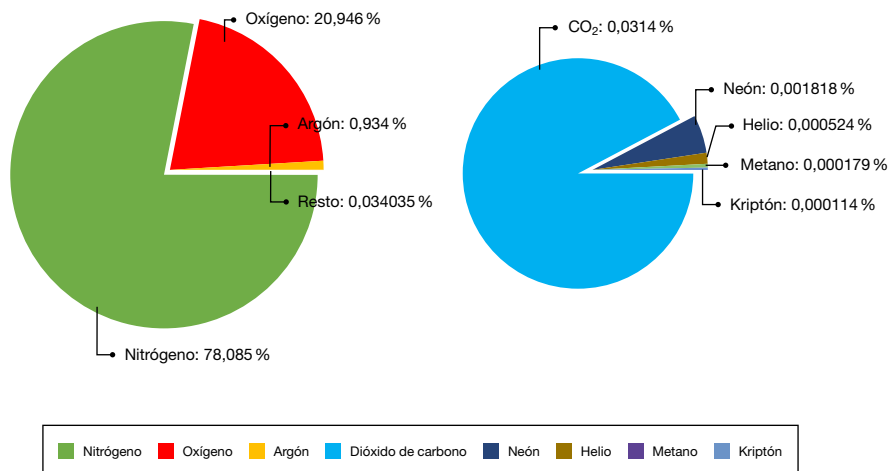
Ocuparía los primeros 100 km y su composición se mantiene bastante constante y uniforme. En la tabla 1 se muestra la composición del aire seco con porcentajes en volumen.

Tabla 1. **Composición química de la atmósfera**

Gas	% volumen	Gas	% volumen
Nitrógeno (N ₂)	78,084	Kriptón (Kr)	0,000114
Oxígeno (O ₂)	20,946	Hidrógeno (H ₂)	0,000055
Argón (Ar)	0,934	Óxido de dinitrógeno (N ₂ O)	0,00003
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,04	Xenón (Xe)	$9 \cdot 10^{-6}$
Neón (Ne)	0,001818	Ozono (O ₃)	$0.7 \cdot 10^{-6}$
Helio (He)	0,000524	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	$2 \cdot 10^{-6}$
Metano (CH ₄)	0,000179	Yodo (I ₂)	$1 \cdot 10^{-6}$

Nota. El vapor de agua ha sido excluido por ser aire en seco. En función del área geográfica y de la altitud, puede haber grandes variaciones. En zonas próximas a la superficie terrestre varía entre el 1 % y el 4 %, y en zonas más alejadas, entre el 0,40 % y el 1 %.

Figura 2. Composición química de la atmósfera



Fuente: elaboración propia con datos de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Como se puede apreciar en la figura 2, el nitrógeno y el oxígeno componen más del 99 % de nuestra atmósfera y mantienen una presencia constante. El nitrógeno (N₂) permanece unos 42 millones de años, mientras que el oxígeno (O₂) tiene una vida atmosférica de alrededor de 5000 años. El argón, aunque en concentraciones bajas, tiene una persistencia atmosférica significativa.

Además, tenemos gases de concentración variable, entre los que destacan:

- Dióxido de carbono (CO₂): 0,02 %-0,04 %.
- Vapor de agua: 0,02 %-4 %.
- Ozono (O₃): ~0,01 %.

El CO₂, potente gas de efecto invernadero, se libera en la atmósfera por diversas vías, como erupciones volcánicas, respiración de organismos y combustión de combustibles fósiles. Su tiempo de permanencia en la atmósfera es de alrededor de 150 años, aunque una molécula individual puede circular durante 3-4 años antes de ser captada por los océanos o absorbida nuevamente en la atmósfera.

El vapor de agua varía considerablemente en concentración según la región y la localización geográfica, desde menos del 0,1 % en desiertos y polos hasta un máximo de 4 % en regiones tropicales. Su presencia también contribuye significativamente al efecto invernadero.

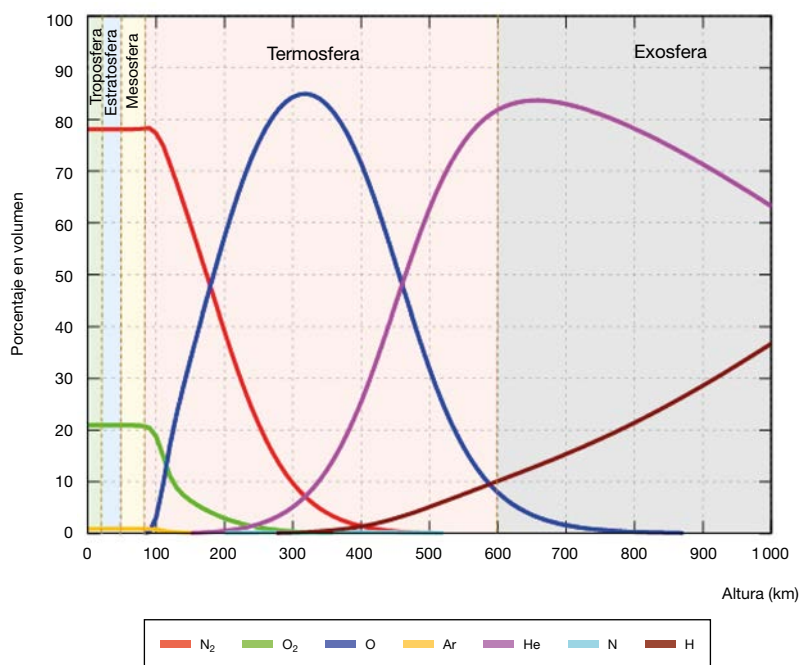
Otros gases, como el ozono (O_3), tienen un papel dual. En la troposfera, se considera un oxidante perjudicial para la salud humana, mientras que en la estratosfera es beneficioso por su capacidad para filtrar la radiación ultravioleta, protegiendo así la vida en la Tierra.

Es importante comprender la dinámica de estos gases en la atmósfera para evaluar su impacto en el clima y la vida en nuestro planeta.

B) Heterosfera

Se extiende desde los 80 km hasta el límite superior de la atmósfera y se encuentra estratificada, es decir, está formada por capas que presentan composición diferente. En la figura 3 se muestra el porcentaje de gases de la atmósfera según la altura. A partir de los 100 km empieza a descender la cantidad de moléculas de N_2 y O_2 , ya que estas se disocian por efecto de las radiaciones solares de alta energía provenientes del Sol.

Figura 3. **Porcentaje en volumen de los principales gases de la atmósfera terrestre según la altura**



Nota. Fracción de volumen de los principales constituyentes de la atmósfera terrestre según el modelo atmosférico MSIS-E-90 de la NASA.

Fuente: elaboración propia con datos de la NASA.

2. Contaminación atmosférica

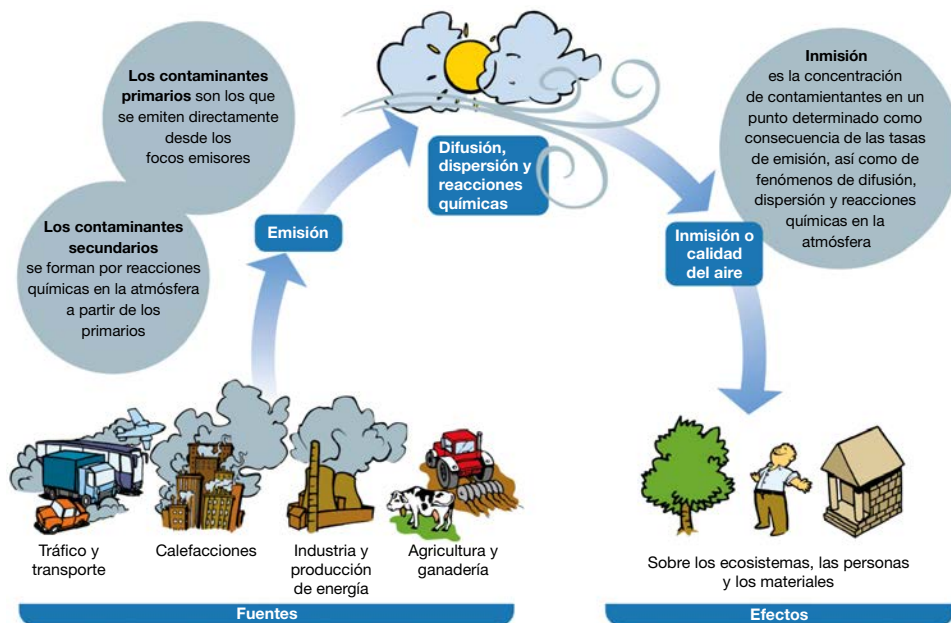
La *contaminación* es un fenómeno subjetivo que puede ser difícil de definir. En algunos casos, el concepto parece obvio, como cuando se vierten residuos sólidos en un río, lo que puede causar malos olores, aspecto desagradable del curso fluvial y el posible envenenamiento de peces. Sin embargo, en otros casos, la contaminación puede ser más subjetiva. Por ejemplo, una discoteca de verano con una terraza en la que pongan música electrónica a un alto nivel de decibelios puede ser un placer para algunas personas, pero, para otras, es un proceso de contaminación acústica. Además, en muchas ocasiones, el lugar o la hora pueden ser un factor determinante en la definición de qué es un contaminante. Otros ejemplos pueden ser los nitratos, que son uno de los componentes a eliminar de las granjas de cerdos, los cuales se generan por los purines de estos animales y pueden acabar contaminando los acuíferos, pero que son idénticos químicamente a los que el agricultor vecino a la granja de cerdos tiene que comprar para fertilizar sus campos. De hecho, muchos *contaminantes* son recursos naturales arrojados a la basura. También, como los recursos energéticos y minerales escasean cada vez más, la presión económica está forzando de manera automática a la valorización de los residuos y a la búsqueda de soluciones para muchos de los problemas de contaminación. De esta forma, la Comisión Europea define *contaminante* como «una sustancia química o energía que se encuentra en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos adversos para la salud o el medioambiente».

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico entiende por *contaminación atmosférica* «la presencia en el aire de materias, sustancias o formas de energía que impliquen molestia grave, riesgo o daño para personas, medioambiente y demás bienes».

En el contexto de la contaminación atmosférica, es fundamental comprender la dinámica entre las distintas partes involucradas en el proceso de emisión y dispersión de contaminantes:

- Fuente emisora o foco. Se refiere al punto de origen de las emisiones, como una planta industrial o un vehículo. La *emisión* es la cantidad de contaminante vertido a la atmósfera en un periodo determinado desde un foco. Las fuentes se pueden clasificar como:
 - Fuentes fijas: industriales (procesos industriales o producción de energía), domésticas (combustión para calefacción) y tratamiento de residuos.
 - Fuentes móviles: automóviles, camiones, aviones, barcos y maquinaria móvil.
- Estas emisiones se propagan a través del aire, alcanzando áreas donde la contaminación puede afectar directamente, conocidas como *receptores*. Los receptores incluyen no solo a las comunidades humanas, sino también a los ecosistemas naturales y a otros componentes del medioambiente. El término *inmisión* describe la llegada y la deposición de contaminantes en estas áreas receptoras, delineando así la relación entre la fuente emisora, el transporte y la reacción de los contaminantes y su impacto en la calidad del aire en entornos específicos. Por tanto, podría definirse la *inmisión* como la concentración que llega al receptor una vez transportado. Hoy se suele emplear más el término *calidad de aire ambiente*.

Figura 4. Emisión e inmisión de contaminantes

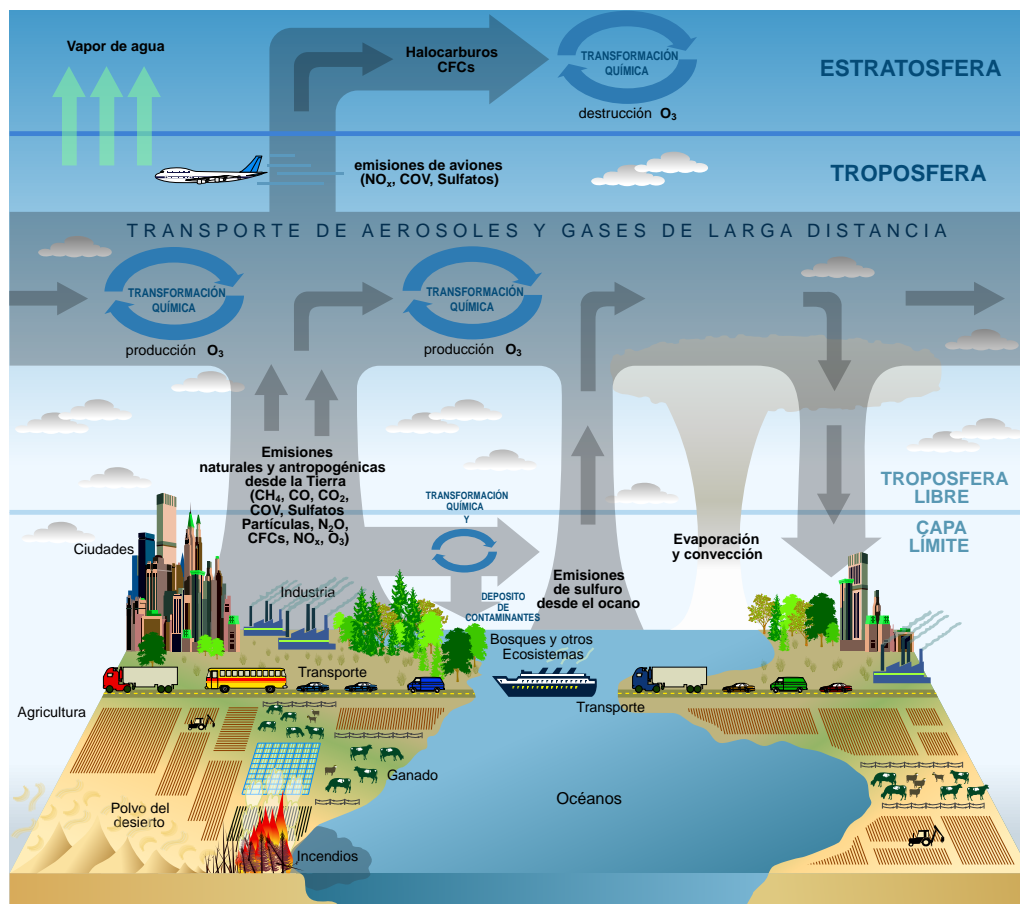
Fuente: <https://aragonaire.aragon.es/es/calidad-aire>.

En el análisis de la contaminación atmosférica, es fundamental diferenciar entre dos tipos de contaminantes (véase figura 4):

- **Contaminantes primarios.** Son aquellos liberados directamente por fuentes emisoras, como las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) provenientes de la quema de combustibles fósiles o los óxidos de nitrógeno (NO_x) generados por la combustión a alta temperatura. Estos contaminantes, al ser liberados, impactan directamente en la calidad del aire y pueden tener efectos adversos inmediatos en la salud humana y ambiental. Pueden proceder de fuentes naturales, como volcanes e incendios, o de fuentes antropogénicas, como el transporte o la industria.
- **Contaminantes secundarios.** No son liberados directamente, sino que se forman a través de reacciones químicas en la atmósfera a partir de los contaminantes primarios. Un ejemplo destacado es el ozono troposférico, un contaminante secundario formado por la interacción de compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno en presencia de la radiación solar.

En la figura 5 se muestran estos procesos. Es fundamental entender las reacciones y los equilibrios químicos que se producen entre los contaminantes primarios y secundarios para intentar desarrollar estrategias efectivas de gestión y control de la contaminación atmosférica.

Figura 5. Diagrama de composición que muestra la evolución y los ciclos de varios elementos en la atmósfera terrestre



Nota. Esquema de procesos químicos y de transporte relacionados con la composición atmosférica. Estos procesos vinculan la atmósfera con los océanos, la tierra y las plantas, así como con los animales terrestres y marinos.

Fuente: adaptado de P. Rekacewicz (Strategic Plan for the U.S. Climate Change Science Program, 2003. <https://downloads.globalchange.gov/strategic-plan/ccsp-strategic-plan-2003.pdf>).

Los contaminantes pueden ser de distinto tipo: físicos, químicos y biológicos. Veamos cada uno de ellos a continuación.

3. Contaminantes químicos

En este apartado, nos centraremos en los contaminantes químicos porque son los que más efectos perjudiciales causan.

Los primeros que vamos a estudiar son los *contaminantes primarios*, que son los emitidos directamente a la atmósfera desde las distintas fuentes emisoras. Los últimos que estudiaremos serán los *compuestos secundarios*, que se forman por reacciones químicas de los compuestos primarios. Entre ellos el más importante es el ozono.

3.1. Dióxido de azufre (SO₂)

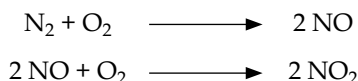
Proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, como el carbón y el petróleo. Puede causar problemas respiratorios y contribuir a la formación de la lluvia ácida, como veremos en el apartado 7.2 de este capítulo.

Las principales fuentes derivadas de la acción humana suelen provenir de la actividad industrial, específicamente de la quema de carbón, sobre todo en plantas térmicas de producción de energía, y del procesamiento de minerales para la obtención de hierro y cobre. El transporte también contribuye, aunque la presencia de azufre en el petróleo refinado es bastante baja actualmente, debido a las medidas que se han adoptado para limitar el contenido de azufre en gasolinas y diésel. Por ejemplo, la normativa de 1994 limitaba el contenido de azufre en gasóleos a 2000 ppm y se ha ido reduciendo hasta la que opera desde 2009, que está limitada a 10 ppm (UNE-EN 590:2022).

3.2. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Este término abarca los óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera, como el N₂O, el NO y el NO₂. Su origen es diverso. El N₂O se genera principalmente en procesos naturales y actividades agrícolas, donde los microorganismos del suelo, mediante un proceso denominado *desnitrificación*, convierten los nitratos (NO₃⁻) y los nitritos (NO₂⁻) en nitrógeno molecular gaseoso (N₂) y en dióxido de nitrógeno (N₂O).

En contraste, los otros dos compuestos tienen un origen humano, como el transporte y los procesos de combustión a alta temperatura. Ambos contribuyen a la formación de ozono troposférico (véase apartado 3.8) y pueden afectar la salud respiratoria. Se producen en procesos en los que se alcancen altas temperaturas, ya que, a temperaturas elevadas, es posible la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno del aire según las reacciones.

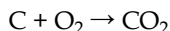


También participan en la formación de la lluvia ácida, ya que pueden convertirse en ácido nítrico, como se detalla en el apartado 7.2 de este capítulo.

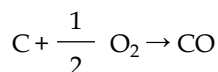
3.3. Monóxido de carbono (CO)

Proviene de la combustión incompleta de combustibles, como la quema de gasolina en vehículos. Al quemar combustibles fósiles se puede producir una combustión incompleta del carbono que contienen estos combustibles. Durante este proceso de combustión, un átomo de carbono puede unirse con dos átomos de oxígeno o con uno solo, dando lugar a dos posibles reacciones:

- Combustión completa. El carbono se combina con el oxígeno formando dióxido de carbono:



- Combustión incompleta. Se forma monóxido de carbono:



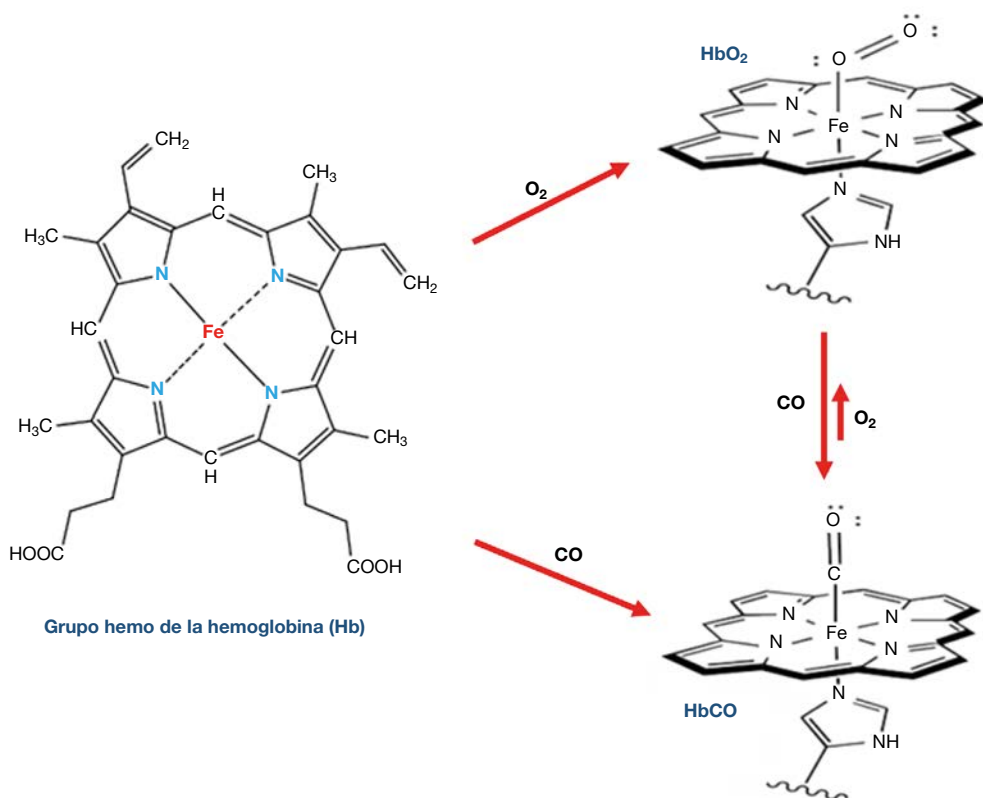
Como podemos ver, en la segunda reacción se necesita menos oxígeno.

El monóxido de carbono se produce comúnmente en los vehículos y, en ocasiones, por fallos en electrodomésticos, como calentadores, hornos o estufas, normalmente por una deficiente entrada de oxígeno. A pesar de existir en pequeñas cantidades en la atmósfera de manera natural, resulta extremadamente peligroso para los seres humanos, ya que se une a la hemoglobina, la cual transporta oxígeno a todas las células del cuerpo. En los pulmones, cada uno de los cuatro grupos hemo que tiene la hemoglobina se une al oxígeno, formando la oxihemoglobina (Hb-O_2), y es capaz de transportar cuatro moléculas de oxígeno. En caso de presencia de monóxido de carbono, se combina rápidamente con la hemoglobina, desplazando al oxígeno para formar la carboxihemoglobina (Hb-CO), pudiendo producir consecuencias fatales, ya que la afinidad del hierro de la hemoglobina por el monóxido de carbono (CO) es unas 210 veces mayor que por el O_2 . En la figura 6 se puede apreciar el proceso en el que el grupo hemo de la hemoglobina se puede combinar tanto con el oxígeno (O_2) como con el monóxido de carbono.

Dado que la mayor parte del monóxido de carbono proviene de la combustión de los automóviles con motor térmico, una manera de reducir esta proporción es asegurar una combustión completa del combustible de los vehículos de transporte. Esto se ha logrado mediante el uso del *convertidor catalítico* o *catalizador*, un dispositivo colocado en el sistema de escape que contiene una mezcla de dos metales, incluyendo platino. En lugar de liberar los gases de escape directamente a la atmósfera, este dispositivo permite que estos gases se mezclen con más aire dentro de él, lo que provoca una combustión completa hasta conseguir que el

monóxido de carbono se oxide a dióxido de carbono. La presencia de estos metales favorece y acelera el proceso de combustión (es decir, los cataliza). Por esta razón, es importante utilizar gasolina sin plomo, ya que este componente puede dañar los metales del catalizador, invalidando su capacidad de actuación.

Figura 6. Reacciones del grupo hemo con O_2 y CO



El grupo hemo tiene un átomo de hierro (Fe^{2+}) en el centro en rojo, formando un complejo¹ con cuatro grupos pirrólicos y uniéndose al átomo central por los átomos de nitrógeno interiores que aparecen en azul. Cada uno de los cuatro grupos hemo que posee la hemoglobina es capaz de unirse al O_2 o al CO, pero presenta mayor afinidad por el CO.

¹ En química se denomina *complejo* a un tipo de compuesto químico con enlace de coordinación, formado por un átomo central unido a otras moléculas que se encuentran rodeándolo, conocidas como *ligandos*.

Fuente: elaboración propia.

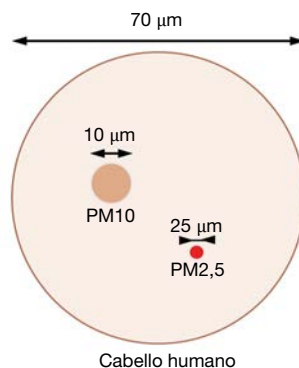
3.4. Partículas en suspensión (PM)

Se refiere a pequeñas partículas sólidas o líquidas en el aire, que pueden variar en tamaño. Las partículas más finas pueden penetrar profundamente en los pulmones y están asociadas con problemas respiratorios y cardiovasculares. Normalmente se abrevian por PM, procedente de los términos anglosajones *particulate matter* (material particulado).

Se suelen clasificar en función del tamaño (véase figura 7). El motivo es que el tamaño tiene una gran influencia en la salud, ya que al inhalarse afectan de distinta manera a los pulmones. La clasificación habitual es:

- PM10. Son partículas en suspensión que tienen diámetros inferiores a 10 micras y son respirables. Normalmente, son sólidas o líquidas y provienen del polvo, de las cenizas, del hollín, de partículas metálicas, del cemento o del polen. Una exposición de forma prolongada (o repetitiva) a estas partículas puede tener efectos dañinos en el sistema respiratorio de las personas, aunque no logran penetrar los alvéolos pulmonares y quedan atrapadas en la mucosa de las vías respiratorias superiores. La Directiva 2008/50/CE establece que, para proteger la salud, no se deben superar los 50 microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante 24 horas más de 35 veces al año. La media anual no puede superar los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (véase tabla 2).

Figura 7. Comparación del tamaño de las partículas PM10 y PM2,5 con un cabello humano



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Valores límite de las PM10

	Tiempo de promedio	Valor límite
Valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana	24 horas	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que no podrán superarse en más de 35 ocasiones por año
Valor límite anual (VLA) para la protección de la salud humana	1 año	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

- PM2,5. Son partículas en suspensión que tienen diámetros menores a 2,5 micras. Suelen estar formadas por compuestos orgánicos e inorgánicos (nitratos, carbo-

atos, sulfatos, metales pesados, etc.). Estas partículas suelen ser de carácter antropogénico y están asociadas principalmente al tráfico urbano por la combustión y la acción de los frenos. Al ser más ligeras, pueden permanecer más tiempo en el aire y, por tanto, desplazarse a mayor distancia. Además, al ser más pequeñas, no quedan retenidas por las mucosas y pueden alcanzar los alvéolos pulmonares, lo que puede agravar otras patologías o incluso llegar a provocar una muerte prematura (véase tabla 3).

Tabla 3. **Valor límite de las PM_{2,5}**

	Tiempo de promedio	Valor límite
Valor límite anual (VLA) para la protección de la salud humana	1 año	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Además de la clasificación por tamaño, también existe una clasificación por su origen:

- PM primarias. Son aquellas partículas que se liberan directamente a la atmósfera, ya sea de manera natural (como polvo, partículas salinas marinas y pólenes) o como resultado de actividades humanas. En entornos urbanos, esto se relaciona principalmente con la combustión de calderas de carbón y el tráfico (que abarca tanto las emisiones de combustión del motor como el desgaste de frenos y neumáticos).
- PM secundarias. Estas partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de gases precursores como el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el amoníaco (NH_3) y los COV. Estos últimos los vamos a ver en más detalle en el siguiente apartado.

3.5. Compuesto orgánico volátil (COV)

Un COV se define según la legislación como «aquel compuesto orgánico que tenga a 20 °C (293,15 K) una presión de vapor de 0,01 kPa o superior, o que tenga una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso». Por tanto, son una variedad de compuestos químicos que se vaporizan fácilmente.

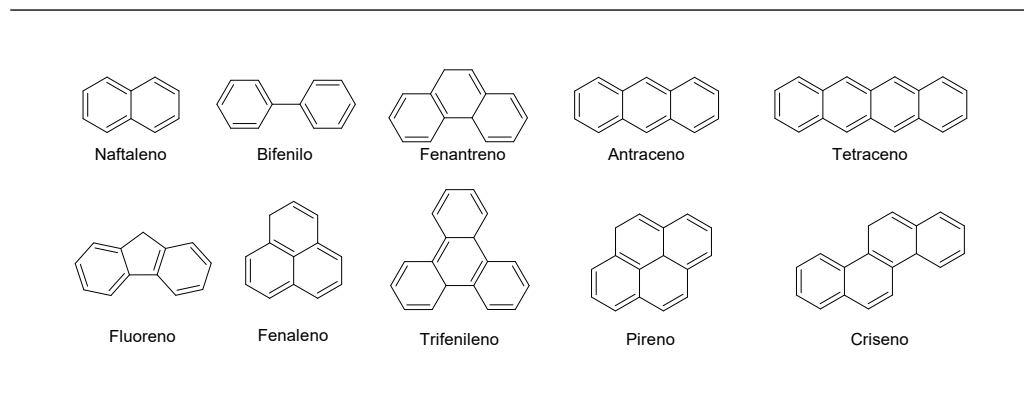
Estos compuestos suelen tener cadenas con menos de 12 átomos de carbono y, además de hidrógeno, incluyen otros elementos, como oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. Hay catalogados más de 1 000, aunque los más comunes en el aire son metano, tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno.

Estos compuestos tienen una procedencia tanto natural (COV biogénicos, aproximadamente el 70 %) como antropogénica, generados al quemar combustibles, como gasolina, madera, carbón o gas natural, y al utilizar disolventes, pinturas, adhesivos y otros productos en el hogar y en entornos laborales. Su principal preocupación ambiental radica en su capacidad de mezclarse con otros contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), y al reaccionar con la luz solar pueden generar ozono a nivel del suelo, el ozono troposférico que veremos en el apartado 3.8.

3.6. Hidrocarburo aromático policíclico (HAP)

Un *HAP* es un tipo de compuesto orgánico que se compone de múltiples anillos aromáticos. En la figura 8 se muestra la estructura química de algunos de estos compuestos. El representante más simple es el naftaleno (C_{10}H_8), que tiene dos anillos aromáticos, y los compuestos de tres anillos, antraceno ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$) y fenantreno ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$). Los HAP no están cargados, no son polares y son planos. Muchos son incoloros y muchos de ellos se encuentran en el carbón y en los depósitos de petróleo, y también se producen por la combustión incompleta de materia orgánica, por ejemplo, en motores e incineradores o cuando la biomasa se quema en incendios forestales.

Figura 8. Algunos ejemplos de hidrocarburos aromáticos policíclicos



Fuente: elaboración propia.

Las fuentes naturales de estos compuestos involucran incendios forestales y erupciones volcánicas, mientras que las fuentes generadas por la actividad humana incluyen los motores de vehículos, especialmente los de tipo diésel, los hornos de cocina, la fabricación de asfalto y el humo de los cigarrillos. Para la mayoría de las personas no fumadoras en países desarrollados, la principal exposición a los hidrocarburos aromáticos policíclicos proviene de los alimentos; por ejemplo, la carne cocinada a la parrilla contiene estos compuestos.

3.7. Metales pesados

Son varios los metales pesados conocidos por sus impactos ambientales graves, en especial el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el talio (Tl). A veces se incluyen el cobre (Cu), el zinc (Zn) y el cromo (Cr).

La peligrosidad de estos metales radica en su incapacidad de degradarse, ya sea química o biológicamente. Además, tienden a bioacumularse y magnificarse en los organismos vivos, aumentando en concentraciones a medida que avanzan en la cadena alimentaria. Esto causa una variedad de efectos tóxicos, tanto físicos (dolores crónicos, trastornos sanguíneos, etc.) como psicológicos (ansiedad, apatía, etc.) en los seres humanos.

A continuación, vemos algunos contaminantes secundarios que se forman por transformación de los contaminantes primarios

3.8. Ozono troposférico (O_3)

El ozono (O_3) es una molécula con tres átomos de oxígeno que es muy oxidante.

Hablamos del ozono como contaminante, sin embargo, estamos preocupados por la destrucción de la capa de ozono por efecto de ciertas emisiones producidas por humanos. Aunque parezca algo contradictorio:

- Por un lado, algunos compuestos emitidos pueden deteriorar la capa de ozono que se encuentra situada en la estratosfera, generando agujeros en ella.
- Por otro lado, otras emisiones favorecen la formación de ozono en la troposfera, creando lo que se denomina el *esmog fotoquímico*.

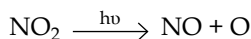
Por tanto, podemos hablar de un ozono bueno y de un ozono malo.

A diferencia del ozono estratosférico, la presencia de ozono en la troposfera resulta perjudicial, causando irritación ocular, problemas respiratorios, daño a la vegetación y degradación de materiales como el caucho, incluso en concentraciones muy bajas (100 ppb). Estos efectos dañinos se deben a la fuerte capacidad oxidante del ozono.

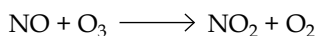
El ozono que se forma en la troposfera, y que es con el que estamos en contacto, es un contaminante secundario que se forma mediante reacciones fotoquímicas por la acción de la radiación solar y que tiene como precursores los NO_x y los COV. Para ello, es necesario que ambos precursores convivan durante un periodo considerablemente largo (unas horas) y que estén activados por la radiación solar. Por ello, los picos máximos de ozono troposférico se dan en primavera y verano. El principal precursor para su formación es el NO_2 . El resto de NO_x y los COV ayudan a que se forme el NO_2 .

Esta formación de ozono contribuye a la generación del esmog fotoquímico que detallaremos más adelante.

La formación del ozono troposférico es muy parecida a la que tiene lugar en la estratosfera. Las reacciones que tienen lugar para la formación son fundamentalmente dos. Primero, el NO_2 se descompone formando NO y un átomo de oxígeno, que es muy inestable y reacciona rápidamente con una molécula de oxígeno para formar el ozono:



Además, hay otra reacción que destruye el ozono, que es la reacción con el NO :



En zonas con contaminación por ozono se suelen ver unas neblinas de color amarillento o pardo. Esto es debido a que la radiación necesaria para que se produzca la primera reacción suele estar en torno a los 380-424 nm, que se corresponde con el color violeta, y por eso muestran el color complementario, que es el típico color amarillento propio de estas neblinas que se forman en algunas ciudades, el smog fotoquímico. Como podemos ver en las reacciones, mientras que el NO_2 es un contaminante que participa en la formación del ozono (reacciones 1 y 2), el NO es otro de los contaminantes que lo destruye para formar oxígeno y dióxido de nitrógeno (reacción 3). Este es el motivo por el que los niveles de ozono no son tan elevados en áreas urbanas (donde son altos los niveles de NO por la emisión de los vehículos) como en áreas rurales.

3.9. Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

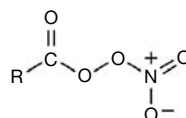
Es el producto de la reacción en la atmósfera del vapor de agua y de los gases ricos en azufre vertidos como subproducto industrial. Este ácido se precipita a tierra junto con la lluvia, formando la *lluvia ácida* y acarreado daños en la materia orgánica y en los materiales que estén expuestos a ella.

3.10. Nitratos de peroxiacetilo

Estos compuestos, cuya estructura química se muestra en la figura 9, son altamente urticantes para los ojos y los pulmones, y capaces de dañar a las plantas por exposición prolongada. Son uno de los principales componentes del smog fotoquímico.

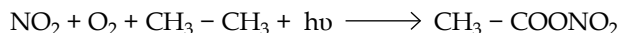
El más común es el peroxiacetilnitrato (PAN). Se produce a partir de la descomposición en el aire de com-

Figura 9. Fórmula genérica de los nitratos de peroxiacetilo



Fuente: elaboración propia.

puestos orgánicos volátiles, como los empleados en pinturas y derivados líquidos del petróleo, o a través de la reacción del NO_2 con hidrocarburos según la reacción siguiente:



4. Contaminantes físicos

4.1. Ruido

La *contaminación acústica* se define como la presencia de ruidos o vibraciones en el entorno, independientemente de su origen, que causan molestias, riesgos o daños a las personas para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza y que tienen impactos significativos en el medioambiente.

Algunas veces se entiende por *contaminación acústica* o *contaminación sonora* cuando hay un exceso o un nivel alto y se refiere al exceso de sonido que perturba las condiciones habituales del entorno en una zona específica. Aunque el ruido no se acumula ni persiste en el tiempo como otras formas de contaminación, puede ocasionar graves impactos en la calidad de vida si no se controla o gestiona de manera adecuada.

La *presión sonora* o *acústica* es la cantidad de fuerza por unidad de tiempo que atraviesa una unidad de superficie situada perpendicularmente a la dirección de propagación de las ondas sonoras. Se mide en N/m^2 , es decir, pascuales. Con estas unidades habría una gran variación entre los sonidos más débiles y los más fuertes de billones de unidades. Para no tener que manejar estos números grandes se ha elegido una escala más reducida, usando una escala logarítmica. Nuestro aparato auditivo presenta una sensibilidad a las variaciones de intensidad sonora que se asemeja a una escala aproximadamente logarítmica, no es lineal. El decibelio (dB) es la medida utilizada para expresar el nivel de potencia o el nivel de intensidad del sonido.

Es muy importante entender el significado de las mediciones de ruido, por ello es fundamental conocer algunas cuestiones básicas de esta escala, que vamos a ver con una sencilla regla:

$$\text{Decibelios} + 3 = \text{Intensidad} \times 2$$

Esto quiere decir que, si el ruido aumenta o disminuye en 3 dB, la intensidad del ruido se multiplica o divide por dos. *A priori* parece que un sonido de 85 dB es un poco superior al de 82 dB, pero la realidad es que es el doble.

Los sonidos por debajo de 70 dB generalmente se consideran seguros, pero los que superan los 85 dB pueden causar daños auditivos con el tiempo. Para visualizarlo, el susurro de las hojas alcanza de 20 a 30 dB, mientras que la sirena de una ambulancia llega a 120 dB y el estallido de un globo de juguete a 154 dB. Sonidos moderadamente fuertes, como el tráfico en avenidas, despertadores o secadores de pelo en funcionamiento rondan los 90 dB. En la tabla 4 se muestran distintos sonidos y cómo afectan a nuestro sistema auditivo.

Tabla 4. Niveles de sonido. Cómo el ruido de fuentes cotidianas puede afectar a la audición

Sonidos y ruidos cotidianos	Nivel de sonido promedio (medido en decibeles)	Respuesta típica (después de exposición rutinaria o repetida)
El sonido más suave que se puede escuchar.	0	Los sonidos a estos niveles de decibelios normalmente no causan ningún daño auditivo.
Respiración normal.	10	
Reloj haciendo tictac.	20	
Susurro suave.	30	
Zumbido del refrigerador.	40	
Conversación normal, aire acondicionado, etc.	60	Puede que te sientas molesto por el ruido.
Lavadora, lavavajillas, etc.	70	
Tráfico urbano (dentro del coche).	80-85	
Cortacésped y soplador de hojas a gasolina.	80-85	
Motocicleta.	95	
Acercándose al metro, bocina de automóvil a 5 m y eventos deportivos (como partidos de fútbol).	100	Posible pérdida de audición después de 15 min.
Nivel de volumen máximo para dispositivos de reproducción (radio, MP3 o televisor muy ruidoso) y lugares de entretenimiento ruidosos (discotecas, bares y conciertos).	105-110	Posible pérdida de audición en menos de 5 min.
Gritar o ladrar al oído.	110	Posible pérdida de audición en menos de 2 min.
Pararse al lado o cerca de sirenas.	120	Dolor y lesión de oído.
Petardos.	140-150	

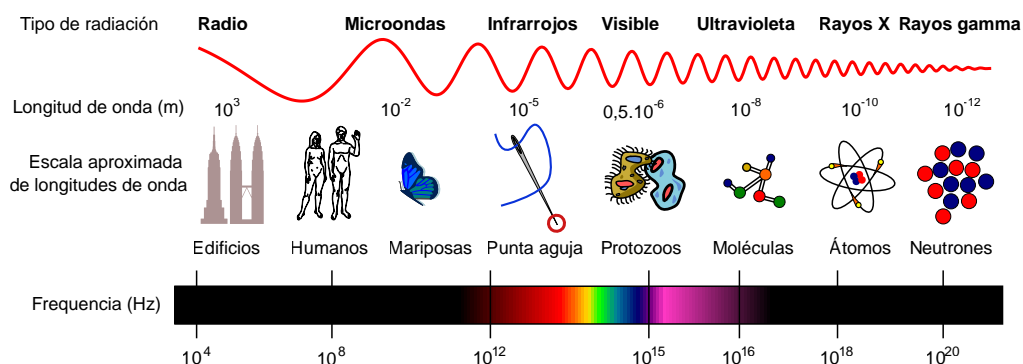
El oído humano no percibe todas las frecuencias por igual. La sensibilidad auditiva es máxima para frecuencias de entre 2 000 y 5 000 Hz y es menos sensible para las frecuencias situadas por encima o por debajo de estos valores. Esta característica se nota más para niveles bajos de presión sonora que para valores altos. Para acercar las mediciones de sonido a la realidad auditiva, se emplean ponderaciones (las más usadas son A, C y Z), de forma que se filtran los sonidos para eliminar ciertas frecuencias y dejar solo aquellas que percibe el oído. Es lo que se conoce como *sonoridad*, cuyas unidades son el fon (o fonio) y el son (o sonio).

Cada una de estas ponderaciones tiene su unidad. De esta forma, con la ponderación A, existe el decibelio A (dBA), que es una unidad de medida del nivel de sonido que utiliza un filtro para eliminar las frecuencias bajas y altas (cubre el rango de frecuencia completo de 20 Hz a 20 kHz). De esta forma se filtra el sonido conservando solo aquellas frecuencias que son más perjudiciales para el oído. La exposición medida en dBA resulta ser un indicador más efectivo del riesgo auditivo real. Además del dBA, existen otras ponderaciones que tienen otras unidades (dBC, dBZ) y que tratan de ajustarse mejor al sistema auditivo.

Además de los niveles de decibelios, la duración y la frecuencia de exposición al ruido son cruciales. Esto implica que un sonido aparentemente no muy intenso, persistente en el tiempo, puede tener repercusiones en nuestra salud mental y física.

La exposición prolongada a niveles altos de ruido puede producir lo que se denomina *pérdida auditiva inducida por ruido*. Sus efectos son irreversibles. Por ello, existen unos límites de exposición recomendados para proteger a los trabajadores contra los efectos sobre la salud. Se suele establecer como valor límite de exposición en 87 dB.

Figura 10. Diagrama del espectro electromagnético



Fuente: elaboración propia.

4.2. Radiaciones

La *radiación* es la propagación de energía, en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas, a través del vacío o en otro medio. Por tanto, la radiación puede ser corpuscular (debida a partículas con masa) o electromagnética (debida a ondas). En la figura 10 se muestra el espectro de radiación electromagnético en función de la longitud de onda de la radiación. Además de la radiación electromagnética, también, partículas como los electrones o los núcleos de helio se consideran radiación. Una clasificación importante de la radiación puede hacerse en función de cómo interactúa con la materia, ya que nos indica la peligrosidad para la salud.

4.2.1. No ionizante

Son radiaciones electromagnéticas de baja energía (con una longitud de onda grande) y que no tienen energía suficiente como para eliminar un electrón de los átomos o de las moléculas con las que interactúan. La radiación no ionizante incluye las ondas de radio, las microondas, los infrarrojos, la luz visible y ultravioleta y la de los teléfonos móviles. Según gran cantidad de estudios se ha establecido que la mayoría de tipos de radiación no ionizante no producen cáncer.

4.2.2. Ionizante

Son radiaciones de alta energía, con una energía suficiente como para eliminar un electrón de los átomos o de las moléculas con las que interactúan, produciendo un ion. Al eliminar electrones, produce cambios químicos en las células y provoca roturas en las cadenas del ADN (ácido desoxirribonucleico). Esto aumenta el riesgo de padecer enfermedades como el cáncer.

La radiación ionizante se clasifica en cuatro tipos principales según su naturaleza:

- Radiación alfa (α). Son partículas pesadas y con carga positiva. Consisten en núcleos de helio-4 compuestos por dos protones y dos neutrones. Estas partículas, al ser bastante pesadas, tienen poca capacidad de penetración y son detenidas fácilmente por materiales como una hoja de papel o incluso la piel humana. Sin embargo, pueden ser muy peligrosas si se ingieren y entran en contacto directo con tejidos internos, como los pulmones, ya que pueden causar un daño considerable en un área pequeña.
- Radiación beta (β). Son partículas más ligeras y con mayor capacidad de penetración que las partículas alfa. Las partículas beta pueden ser partículas cargadas negativamente (electrones) o positivamente (positrones). La radiación beta, al tener un tamaño menor, presenta mayor capacidad de penetración. Los electrones beta pueden penetrar la piel y causar daño en los tejidos, mientras que los positrones, al entrar en contacto con electrones, generan radiación de aniquilación. La radiación beta se puede detener con materiales como el vidrio o la madera.
- Radiación gamma (γ). Son ondas electromagnéticas de alta energía y sin carga. Tienen una gran capacidad de penetración y pueden atravesar tejidos y materiales sólidos.

con facilidad. Se necesitan materiales densos, como el plomo o el hormigón, para detener o reducir significativamente su paso. La generación de radiación gamma está asociada a los núcleos de los átomos. Normalmente se producen por la desexcitación de un nucleón (neutrones o protones) de un nivel excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos. La radiación gamma puede causar daños considerables a nivel celular y romper las cadenas de ADN.

- Radiación X (RX). Al igual que la radiación gamma, son ondas electromagnéticas de alta energía y sin carga. La radiación X tiene menor energía que los rayos gamma y, por tanto, le cuesta más atravesar el cuerpo. Además, es capaz de impresionar las películas fotográficas. La generación de radiación X está asociada a la órbita electrónica de los átomos. Fundamentalmente se produce por la desaceleración de electrones.

La radiación ionizante puede producirse de fuentes naturales, como el radón y los *rayos cósmicos* (rayos que entran en la atmósfera terrestre desde el espacio exterior). También puede provenir de fuentes artificiales. Los distintos tipos de fuentes artificiales varían en función del tipo de radiación que se desee conseguir.

5. Contaminantes biológicos

Los *contaminantes atmosféricos biológicos* son sustancias de origen biológico presentes en la atmósfera que pueden tener efectos adversos en la salud humana o en el medioambiente. Estos pueden incluir:

- Polen. Son partículas liberadas por plantas durante su proceso reproductivo. Aunque son naturales, las concentraciones elevadas de polen en el aire pueden desencadenar alergias estacionales en algunas personas.
- Esparcidores de enfermedades. Incluyen bacterias, virus, hongos y otros patógenos que pueden transportarse a través del aire. Por ejemplo, los aerosoles de bacterias o virus pueden ser transmitidos por la tos, los estornudos o simplemente al hablar. Tenemos ejemplos recientes, como la COVID-19, que se transmite por aerosoles.
- Endotoxinas. Provenientes de bacterias presentes en el suelo, en el polvo o en la vegetación en descomposición, pueden desencadenar reacciones alérgicas o inflamatorias en las vías respiratorias.
- Toxinas de algas. En ciertas áreas, la liberación de toxinas por algas en el agua puede ser transportada por el viento y dispersarse en el aire. Estas toxinas pueden representar riesgos para la salud si se inhalan.

Estos contaminantes biológicos pueden variar en su impacto dependiendo de la sensibilidad individual, de la concentración en el aire y de otros factores ambientales. El control de la calidad del aire suele incluir la medición de algunos de estos contaminantes biológicos para evaluar y mitigar posibles riesgos para la salud pública.

6. Legislación

En la Unión Europea, las principales normativas relacionadas con la contaminación atmosférica incluyen:

- 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. Esta directiva establece normas para la calidad del aire ambiente y la mejora continua en toda la Unión Europea. Se centra en la medición y evaluación de la concentración de diversos contaminantes atmosféricos, como dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2,5}), plomo, benceno, monóxido de carbono (CO) y ozono. Define valores límite y objetivos de calidad del aire para estos contaminantes con el objetivo de prevenir o reducir los riesgos para la salud humana y el medioambiente. Además, introduce umbrales y objetivos a largo plazo para estos contaminantes con la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente.
- Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en el aire ambiente. Esta directiva establece normas específicas para la concentración de estos contaminantes en el aire ambiente.

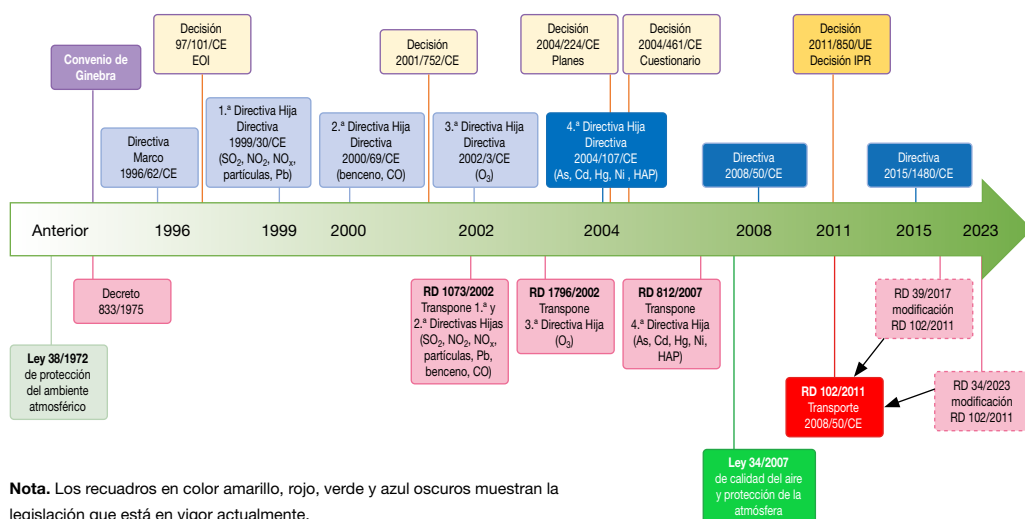
Estas directivas son transpuestas a las legislaciones nacionales de los Estados miembros. Las leyes que regulan la calidad del aire y nos ayudan a mantener un aire limpio y seguro en España son las siguientes:

- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Es la norma que regula al resto de leyes. Esta ley se encarga de establecer las reglas para evaluar y gestionar la calidad del aire en el país. Su objetivo principal es asegurarse de que tengamos un aire limpio para evitar problemas de salud y para proteger el medioambiente y otros bienes. Con esta ley, el Gobierno tiene permiso para definir los objetivos de calidad del aire y los requisitos mínimos para evaluar la calidad del aire. También sirve como guía a la hora de hacer planes nacionales, autonómicos y locales para mejorar la calidad del aire.
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Esta ley toma las reglas de la Directiva 2008/50/CE y de la Directiva 2004/107/CE y las adapta para que funcionen en España. Su objetivo es evitar, prevenir y reducir los efectos perjudiciales de ciertas sustancias en la salud humana, en todo el medioambiente y en otros bienes. Se han realizado algunas modificaciones en reales decretos posteriores.
- Además, los valores máximos de emisión e inmisión en España se van regulando cada cierto tiempo según aparecen avances de las distintas tecnologías que permiten la emisión de menos contaminantes. Normalmente se regulan mediante reales decretos que van modificando estos límites máximos de distintos contaminantes.

Por ejemplo, el Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, establece valores límites de emisión para dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas, y también establece mediciones para el control de las emisiones de monóxido de carbono (CO) procedentes de las instalaciones de combustión medianas.

En la figura 11 se muestra la evolución de la legislación en cuanto a contaminación atmosférica y calidad del aire.

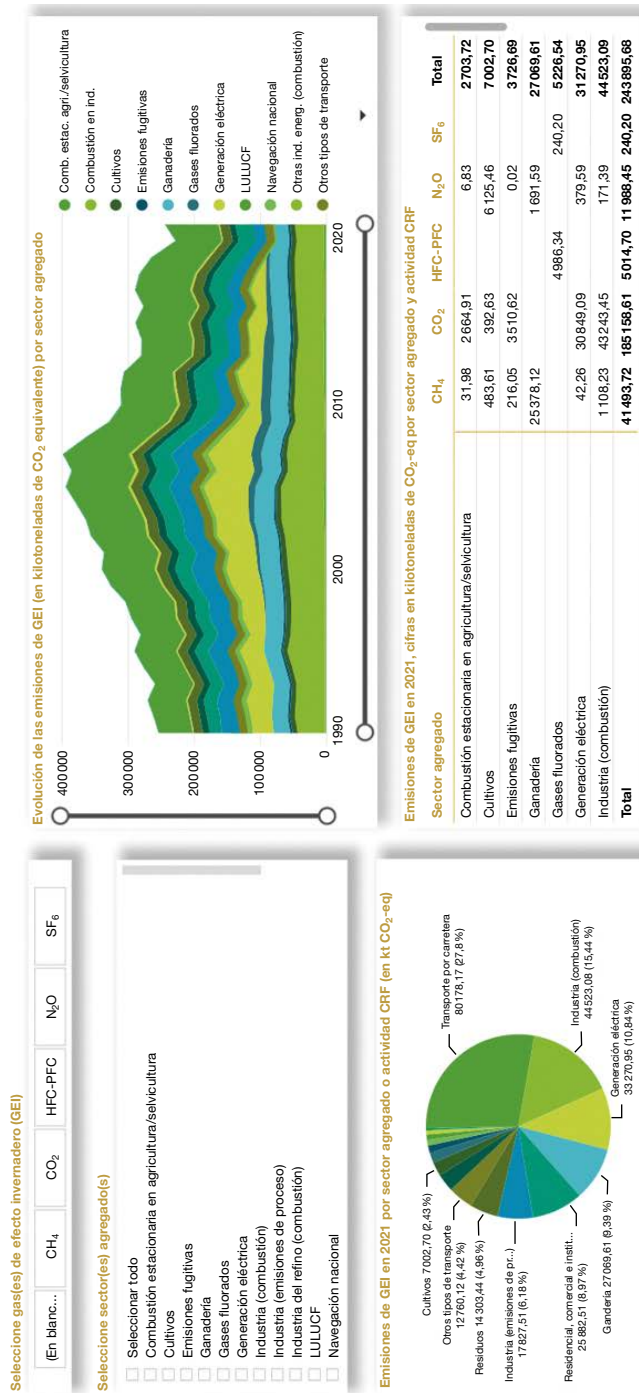
Figura 11. Evolución de la legislación sobre calidad y evaluación del aire ambiental



Fuente: elaboración propia.

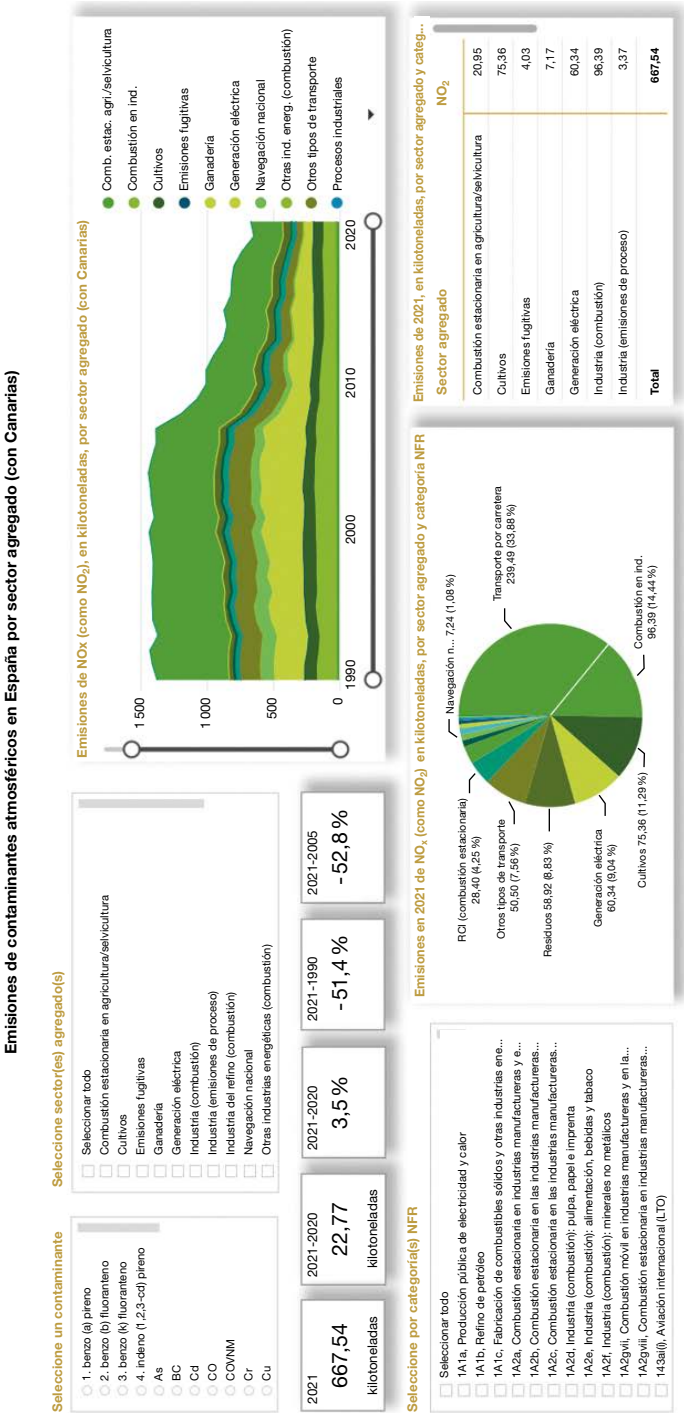
El marco legal que establece y regula el Sistema Español de Inventario se encuentra definido en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. El funcionamiento detallado del sistema se desarrolla a través del Real Decreto 818/2018, de 6 de julio. En virtud de este decreto, se confiere a la Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico el papel de autoridad competente del Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera. De esta manera, esta entidad desempeña un papel central en la supervisión y coordinación de las actividades relacionadas con el inventario y las proyecciones de emisiones atmosféricas en España. Explicado de forma sencilla es como un gran libro de cuentas que registra y vigila las emisiones de gases y contaminantes que lanzamos al aire. Este sistema es una herramienta importante para entender y controlar la calidad del aire en España.

Figura 12. Sistema Español de Inventario de Emisiones de GEI



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/informe-interactivo-inventario-nacional-emisiones.html>).

Figura 13. Sistema Español de Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/informe-interactivo-inventario-nacional-emisiones.html>).

El Sistema Español de Inventario lleva a cabo de forma periódica la elaboración del inventario nacional de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos (véanse figuras 12 y 13). Además, proporciona proyecciones de emisiones y absorciones a la atmósfera, permitiendo evaluar el cumplimiento de los compromisos adquiridos por España en el marco de la normativa internacional y europea sobre emisiones atmosféricas. Estos datos sirven como fundamento para la formulación de políticas y medidas de mitigación de emisiones, así como para la evaluación de su eficacia en la consecución de los objetivos ambientales establecidos.

7. Efectos de la contaminación atmosférica

7.1. Efecto invernadero

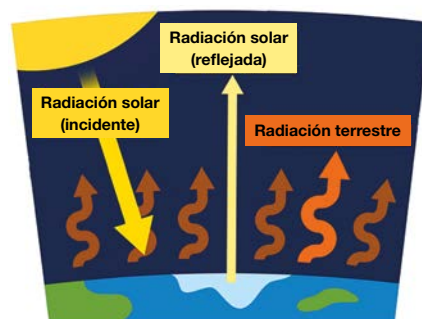
Como explicaremos con más detalle en el capítulo 9, la temperatura de la Tierra (15°C) es muy superior a la que le correspondería si no hubiese una atmósfera gaseosa (-13°C). Estos 28°C de diferencia hacen suponer que la atmósfera juega un papel muy importante en la captación de la energía emitida por el Sol y en la reemitida por la Tierra hacia el exterior.

Aunque, como acabamos de indicar, esto lo veremos en mayor profundidad en el capítulo 9, podemos plantear de forma sencilla un balance global de energía que refleje la energía solar que entra y sale de la atmósfera terrestre (véase figura 14). Al ser un sistema en equilibrio, la energía que entra debe ser igual a la que sale del planeta.

La radiación solar que llega es parcialmente reflejada por las nubes, por partículas en la atmósfera y por la superficie terrestre. La energía absorbida calienta la Tierra, que luego emite radiación infrarroja de vuelta al espacio. Debemos tener en cuenta que la radiación que proviene del Sol no tiene la misma energía (y longitud de onda) que la que se reenvía desde la Tierra.

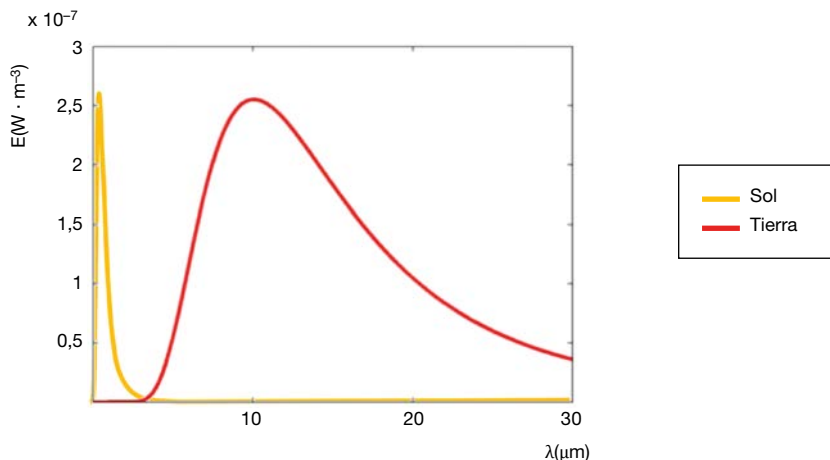
En la figura 15 se muestra en amarillo la distribución de energía correspondiente a un cuerpo negro a una temperatura de 5780 K como el Sol, emitiendo desde el ultravioleta ($0,015\text{ }\mu\text{m}$ a $0,4\text{ }\mu\text{m}$) hasta el infrarrojo ($0,7\text{ }\mu\text{m}$ a $1\,000\text{ }\mu\text{m}$), con un pico máximo de emisión que está situado aproximadamente en $\lambda = 0,5\text{ }\mu\text{m}$. Por otro lado, la línea roja se corresponde con un cuerpo negro, emitiendo a la temperatura media de la Tierra ($T = 288\text{ K} = 15^{\circ}\text{C}$). Se puede apreciar cómo el espectro se ha desplazado hacia longitudes de onda mayores, con el máximo de emisión situado alrededor de los $10\text{ }\mu\text{m}$. Esto es importante en el efecto invernadero.

Figura 14. Balance energético



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Distribuciones de las longitudes de onda emitidas por el Sol y por la Tierra



Fuente: elaboración propia.

La energía que proviene del Sol tiene una longitud de onda menor. Es más energética. Algunas de estas radiaciones son absorbidas por gases como el ozono, otras son reflejadas y otras atraviesan la atmósfera calentando la superficie terrestre. Cuando se emite en el sentido inverso, desde la Tierra hacia el espacio, al tener una longitud de onda mayor, puede ser absorbida por ciertos gases. Estos gases son los conocidos como *gases efecto invernadero*. El efecto invernadero puede entenderse a través de la analogía del invernadero (de ahí su nombre), mediante un modelo sencillo como el utilizado por Gill en 1982. Asume que existe una lámina delgada paralela a la superficie de la Tierra, a una cierta distancia del suelo, y que esa lámina deja pasar toda la radiación incidente (normalmente de longitudes de onda corta), pero absorbe una fracción de la radiación emitida por la Tierra (generalmente de longitudes de onda $\lambda \geq 4 \mu\text{m}$).

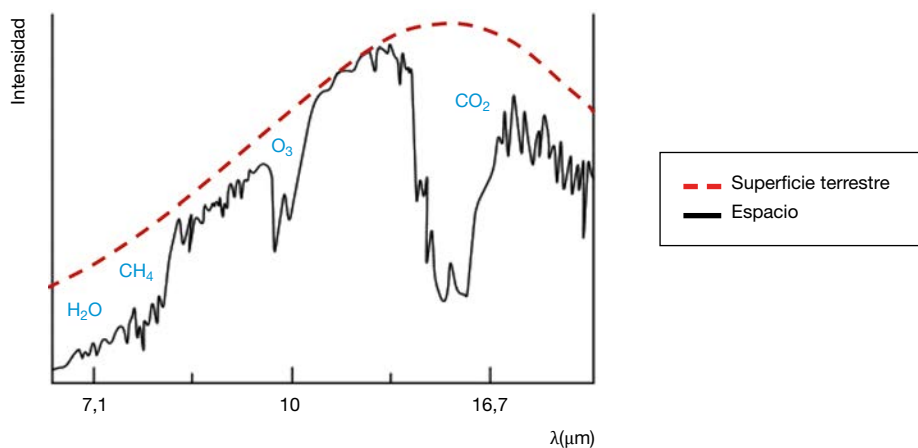
Una explicación un poco más técnica la podemos hacer en función de cómo se comportan estos gases cuando interactúan con la radiación infrarroja. Las moléculas de estos gases tienen diferentes modos de movimiento, además del de translación, que son la rotación y la vibración. La particularidad de estos gases es que son capaces de absorber fotones de la radiación infrarroja y la energía se transfiere a estos modos de movimiento molecular:

- En el caso de la vibración, las moléculas pueden absorber fotones de ciertas longitudes de onda correspondientes a la energía necesaria para que las uniones entre los átomos vibren. Cada gas tiene patrones de absorción y emisión de radiación infrarroja específicos debido a sus estructuras moleculares y a las variaciones en sus modos vibracionales.
- En cuanto a la rotación, las moléculas pueden girar o vibrar en formas específicas, absorbiendo fotones con energía correspondiente a estos movimientos rotacionales.

Estos procesos de absorción y emisión de energía de rotación y vibración influyen en la forma en que los gases interactúan con la radiación infrarroja en la atmósfera. Con este incremento de energía, tanto de vibración como de rotación, aumenta la energía de la molécula que puede transmitirse a otras moléculas mediante colisiones entre ellas, generando calor y aumentando la temperatura del aire.

Los GEI, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de dinitrógeno (N_2O) y el vapor de agua (H_2O), tienen la capacidad de absorber y reemitir radiación infrarroja debido a sus características moleculares y a la energía asociada con sus modos de vibración y rotación. Este tipo de procesos requiere que se produzcan cambios en el momento dipolar de las moléculas implicadas, por tanto, esto se produce si la molécula es dipolar. Las moléculas que están formadas por dos átomos idénticos y, por lo tanto, carecen de un momento dipolar, no contribuyen a este fenómeno. Por esta razón, los gases principales que componen alrededor del 99 % de la atmósfera, como el N_2 y el O_2 , no participan en el efecto invernadero. En la figura 16 se muestra el efecto de los distintos GEI en la absorción de radiación infrarroja en función de la longitud de onda de la radiación.

Figura 16. Intensidades de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y la que sale al espacio



Nota. Se muestran las zonas de absorción de los distintos GEI.

Fuente: elaboración propia con espectros de la NASA.

Los GEI pueden tener diferentes efectos sobre el calentamiento de la Tierra. Las dos formas clave en las que estos gases se diferencian entre sí son por su capacidad para absorber-dispersar energía (lo que podríamos llamar como su *eficiencia radiativa* o *forzamiento radiativo*) y por cuánto tiempo permanecen en la atmósfera (normalmente denominado como su *tiempo de vida* o simplemente *vida*).

El Global Warming Potential (GWP) se desarrolló para permitir comparaciones de los impactos de diferentes gases en el calentamiento global. Específicamente, es una medida de cuánta energía absorberán las emisiones de 1 tonelada de gas durante un periodo de tiempo determinado en relación con las emisiones de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO_2). Cuanto mayor es el GWP, más calienta la Tierra un gas determinado en comparación con el CO_2 durante ese periodo de tiempo. El periodo de tiempo habitualmente utilizado para el GWP es de 100 años. Los valores de GWP proporcionan una unidad de medida común que permite a los analistas sumar estimaciones de emisiones de diferentes gases y, a los responsables políticos, comparar oportunidades de reducción de emisiones.

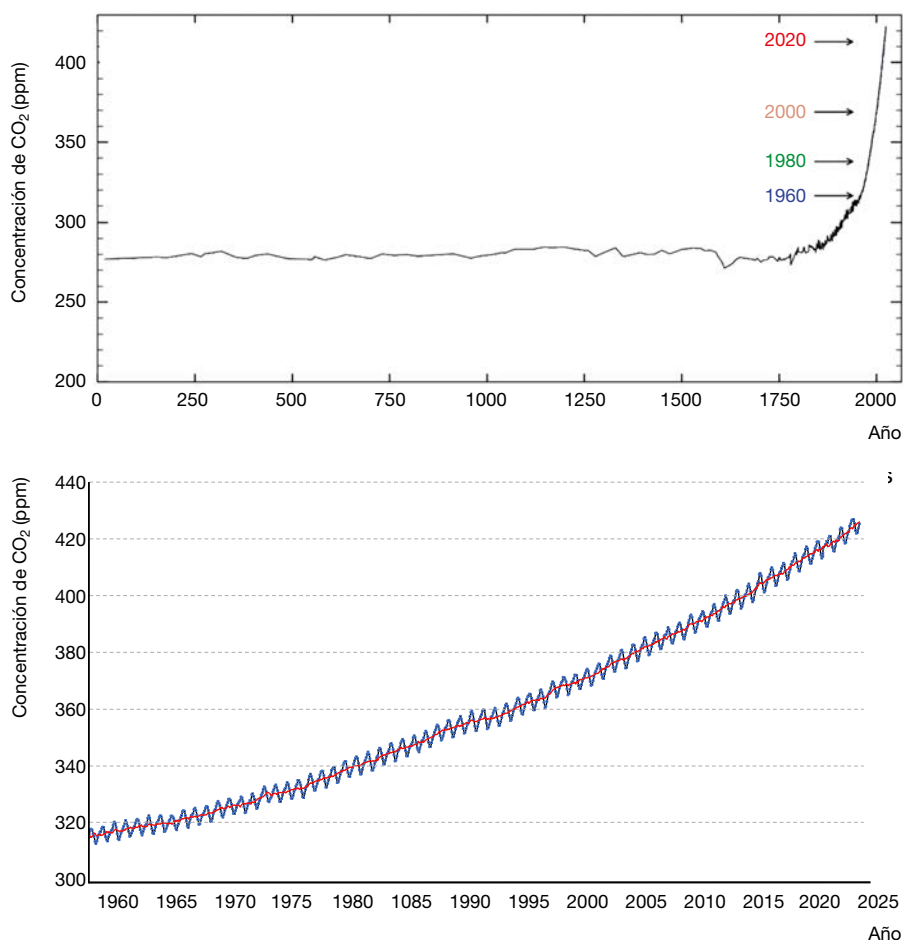
En la tabla 5 se muestran los datos publicados para cada uno de los gases: los parámetros de eficiencia radiativa y tiempo de vida de los distintos GEI. Si un gas tiene una eficiencia radiativa alta, pero también una vida corta, tendrá un GPW grande en una escala de 20 años, pero pequeña en una escala de 100 años. Por el contrario, si una molécula tiene una vida más larga que el CO_2 , su GWP aumentará cuando se considere una escala de tiempo superior. Estos datos han sido extraídos del sexto informe de evaluación del IPCC.

Tabla 5. Tiempo de vida, eficiencia radiativa y GWP en relación con el CO_2 en diferentes horizontes temporales para varios GEI

Nombre del gas	Fórmula química	Vida (años)	Eficiencia radiativa ($\text{Wm}^{-2} \text{ppb}^{-1}$, base molar)	GWP para un horizonte temporal determinado		
				20 años	100 años	500 años
Dióxido de carbono	CO_2		$1,37 \cdot 10^{-5}$	1	1	1
Metano	CH_4	12	$5,7 \cdot 10^{-4}$	83	30	10
Óxido de dinitrógeno	N_2O	109	$3 \cdot 10^{-3}$	273	273	130
CFC-11	CCl_3F	52	0,29	8321	6226	2093
CFC-12	CCl_2F_2	100	0,32	10800	10200	5200
HCFC-22	CHClF_2	12	0,21	5280	1760	549
HFC-32	CH_2F_2	5	0,11	2693	771	220
HFC-134a	CH_2FCF_3	14	0,17	4144	1526	436
Tetrafluorometano	CF_4	50000	0,09	5301	7380	10587
Hexafluoroetano	C_2F_6	10000	0,25	8210	11100	18200
Hexafluoruro de azufre	SF_6	3200	0,57	17500	23500	32600
Trifluoruro de nitrógeno	NF_3	500	0,20	12800	16100	20700

El aumento continuado de estos gases resulta en la retención de calor en la atmósfera terrestre, contribuyendo al efecto invernadero y al aumento de la temperatura global. La actividad humana ha alterado el equilibrio natural que ha existido durante siglos, como se muestra en la figura 17. Las emisiones excesivas de GEI, principalmente a través de la quema de combustibles fósiles y la deforestación, han aumentado la cantidad de radiación infrarroja atrapada en la atmósfera. Este desequilibrio provoca un aumento en la temperatura global, conocido como *calentamiento global*, y desencadena cambios climáticos significativos.

Figura 17. Variación de concentración del CO₂ con el tiempo

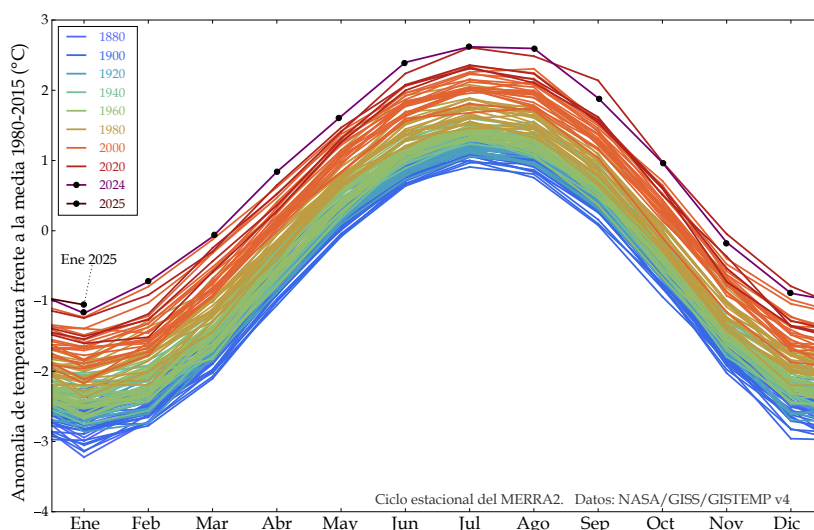


Nota. Variación de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera desde el año 1 d. C. (gráfico superior). Curva de Keeling: muestra los cambios de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera desde 1958 (gráfico inferior).

Fuente: elaboración propia con datos extraídos de NOAA (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>).

La curva de Keeling que se muestra en figura 17 es una gráfica que ilustra las variaciones en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera a partir de 1958. Se fundamenta en mediciones constantes realizadas en Mauna Loa (Hawái) bajo la supervisión de Charles David Keeling. Estas mediciones representaron el primer indicio de los notables aumentos en los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, que se asocian al aumento de la temperatura terrestre (véanse figura 18 de este capítulo y figuras 3 y 4 del capítulo 1).

Figura 18. Variación estacional de la temperatura de la Tierra



Nota. Se representa la anomalía térmica respecto al valor medio de los valores entre 1980 y 2015.

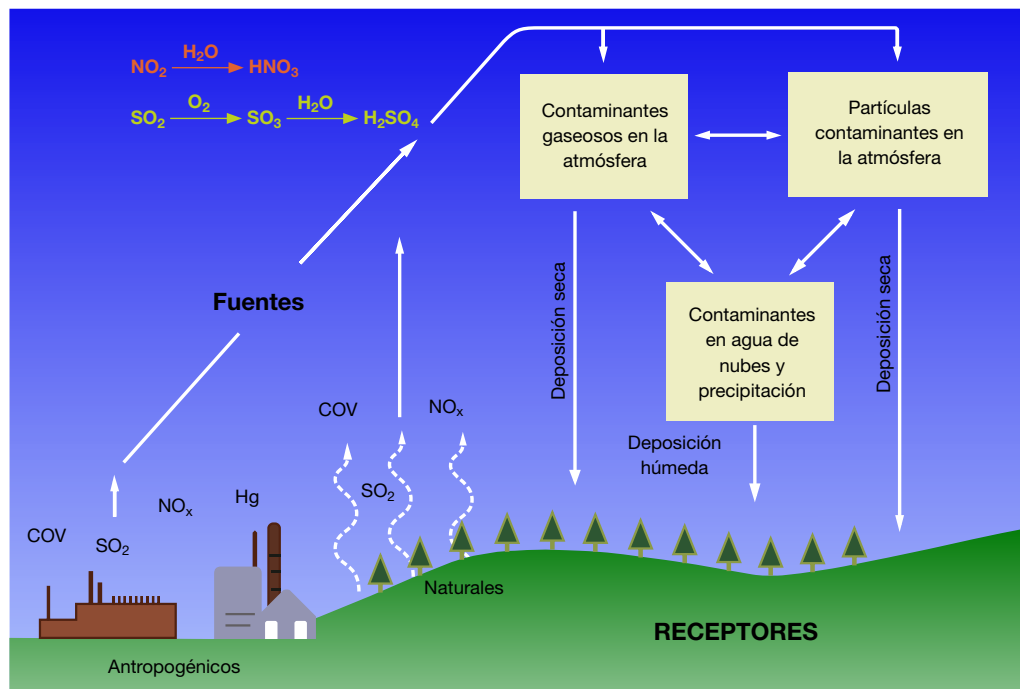
Fuente: https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/.

7.2. Lluvia ácida

El concepto de la *lluvia ácida* como fenómeno provocado por la contaminación humana se empezó a entender más claramente en la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, los primeros indicios de los efectos corrosivos del aire contaminado se remontan a la Revolución Industrial. El término *lluvia ácida* fue utilizado por primera vez por el químico británico Robert Angus Smith en 1852, quien se dio cuenta de la acidificación de la lluvia en Mánchester como resultado de la contaminación industrial. A pesar de este descubrimiento inicial, no se comprendió completamente el impacto a gran escala de este fenómeno hasta mucho más tarde, a medida que se realizaban más investigaciones sobre la relación entre las emisiones

industriales y la alteración química de la atmósfera y el medioambiente.

Figura 19. Esquema de formación de lluvia ácida



Fuente: elaboración propia.

Con el tiempo, en estudios científicos realizados especialmente durante la segunda mitad del siglo XX, se ha profundizado en el conocimiento sobre la lluvia ácida y sobre su impacto en los ecosistemas y en la salud humana. Esto ha llevado a la implementación de regulaciones y esfuerzos para reducir las emisiones contaminantes y mitigar los efectos adversos de este fenómeno.

La *lluvia ácida* es cualquier forma de precipitación que se caracteriza por su acidez, lo que implica niveles elevados de protones, reflejados en un bajo pH. Mientras que la mayoría del agua de lluvia se mantiene en valores de pH ligeramente ácidos, de entre 5,5 y 6, la lluvia ácida presenta un pH promedio de entre 4,2 y 4,5.

La *lluvia ácida* es un fenómeno ambiental provocado por la liberación de gases contaminantes, principalmente óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, en la atmósfera. Estos gases se producen por la quema de combustibles fósiles en industrias, automóviles y otras actividades humanas. También se producen de forma natural mediante la descomposición de la capa vegetal

y en los volcanes en erupción, como el volcán Cumbre Vieja en La Palma, que estalló a finales de 2021. Por eso es necesario proteger a la población mediante la medida de los gases emitidos.

Cuando estos óxidos de azufre y nitrógeno reaccionan con el agua, el oxígeno y otros compuestos químicos en la atmósfera forman ácido sulfúrico y ácido nítrico, como se muestra en las reacciones químicas de la figura 19. Estos ácidos caen a la Tierra a través de la lluvia, la nieve, la niebla o incluso en forma de partículas secas, lo que puede afectar a suelos, almacenamiento de agua, plantas, edificios y vida silvestre.

7.2.1. Factores implicados

La lluvia ácida es el resultado de un conjunto de factores interrelacionados que contribuyen a su formación y afectan a su severidad. Los principales factores implicados son:

- Emisiones de gases contaminantes. Proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles en industrias, vehículos y generación de energía. Los óxidos de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) son los principales precursores de la lluvia ácida.
- Reacciones químicas en la atmósfera. Estos gases (SO_2 y NO_x) interactúan con otros componentes atmosféricos (como el oxígeno, el ozono y el vapor de agua) bajo la influencia de la radiación solar, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3).
- Transporte y deposición. Los ácidos formados en la atmósfera pueden ser transportados largas distancias por los vientos, antes de precipitar como lluvia, nieve o niebla, o ser depositados en forma de partículas secas en el suelo, cuerpos de agua o superficies terrestres.
- Localización geográfica y condiciones climáticas. Las áreas con alta concentración de fuentes contaminantes y condiciones meteorológicas favorables para la dispersión de contaminantes (como vientos predominantes) pueden experimentar impactos más severos de la lluvia ácida.
- Interacciones con el entorno. Los efectos de la lluvia ácida varían según la composición del suelo, la capacidad de las masas de agua para neutralizar el pH y la resistencia de los ecosistemas afectados. Algunos lugares pueden ser más sensibles a la acidificación que otros.

7.2.2. Efectos

Los efectos de la lluvia ácida abarcan una serie de impactos negativos en el medioambiente, en la salud humana, en la vida acuática, en los suelos, en las estructuras y en los ecosistemas en general. Algunos de estos efectos incluyen:

- Daño a la vegetación. La acidificación del suelo afecta a la capacidad de las plantas para absorber nutrientes esenciales, lo que conduce a un debilitamiento y a la muerte de bosques, cultivos y vegetación en general.
- Impacto en masas de agua. La acidificación de lagos, ríos y arroyos debido a la lluvia ácida puede ser devastadora para la vida acuática, afectando a peces, insectos y otros organismos.
- Corrosión de estructuras y edificios. La lluvia ácida puede deteriorar materiales de construcción como mármol, piedra caliza, metal y hormigón, lo que provoca daños a monumentos, edificios históricos y estructuras modernas.
- Contaminación del suelo. La acidificación del suelo puede liberar metales pesados y otros compuestos tóxicos, haciéndolos más disponibles para las plantas y los organismos del suelo.
- Impactos en la salud humana. Aunque los efectos directos en la salud son menos comunes, la lluvia ácida puede contribuir a problemas respiratorios al incrementar la concentración de partículas en el aire.

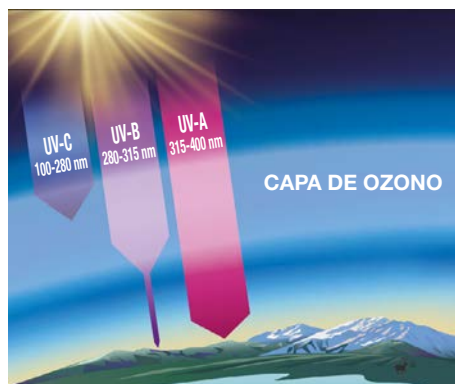
Estos efectos negativos han llevado a poner un mayor énfasis en la reducción de las emisiones de los gases precursores y en la implementación de políticas y prácticas más ecológicas para mitigar los impactos de este fenómeno ambiental.

7.3. Capa de ozono

La *capa de ozono* es una región situada en la parte inferior de la estratosfera, aproximadamente de 15 a 50 km sobre la Tierra, que proporciona una protección frente a la radiación ultravioleta que proviene del Sol, ya que absorbe esta radiación –se estima que entre el 97 y el 99 % de la radiación ultravioleta de alta frecuencia (100-310 nm)–. La máxima concentración de ozono se encuentra a una altitud de unos 22 km sobre la superficie de la Tierra. A esta altitud, la concentración de ozono puede llegar a 15 partes por millón (0,001 %).

La capa de ozono fue descubierta en 1913 por los físicos franceses Charles Fabry y Henri Buisson. En 1920, descubrieron que la radiación del Sol que llegaba a la Tierra no era la correspondiente al espectro de un cuerpo negro como el Sol a temperatura de unos 5777 K, faltaba la radiación por debajo de una lon-

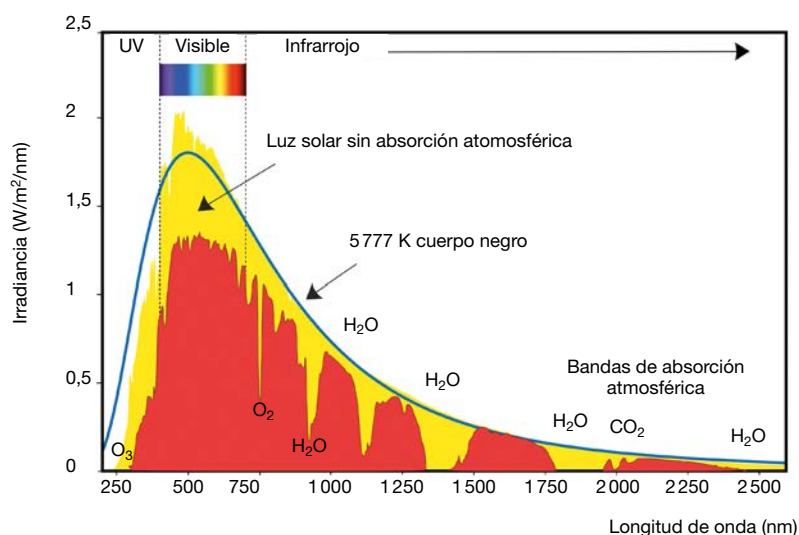
Figura 20. Radiaciones ultravioletas absorbidas por la capa de ozono



Fuente: adaptado de Nickson (2023).

gitud de onda de aproximadamente 310 nm, en el extremo ultravioleta del espectro, como se puede apreciar en la figura 21. Por este motivo dedujeron que estaba siendo absorbida por algo en la atmósfera, lo que los llevó a la búsqueda de la sustancia responsable. En 1928, el meteorólogo británico Gordon Dobson desarrolló un espectrofotómetro simple que podía usarse para medir el ozono estratosférico desde el suelo sin necesidad de usar globos sonda, denominado *espectrómetro Dobson*. En los años siguientes, entre 1928 y 1958, creó una red mundial de estaciones de muestreo del ozono, que continúa funcionando hasta día de hoy. La unidad Dobson, una medida usada para medir la cantidad de ozono sobre la atmósfera, lleva su nombre en su honor¹.

Figura 21. **Espectro de la radiación solar por encima de la atmósfera y a nivel del mar**



Nota. Se muestran etiquetas de las moléculas asociadas a cada una de las zonas de absorción.

Fuente: elaboración propia con espectros de la NASA.

En agosto de 1964 se inicia la medición de la concentración de ozono mediante el uso de satélites que posibilitan una vigilancia constante. Los primeros en ser lanzados fueron los siete satélites meteorológicos del programa Nimbus de la NASA, los cuales, entre otras contribuciones, revolucionaron las predicciones meteorológicas. El último de estos satélites, el Nimbus 7,

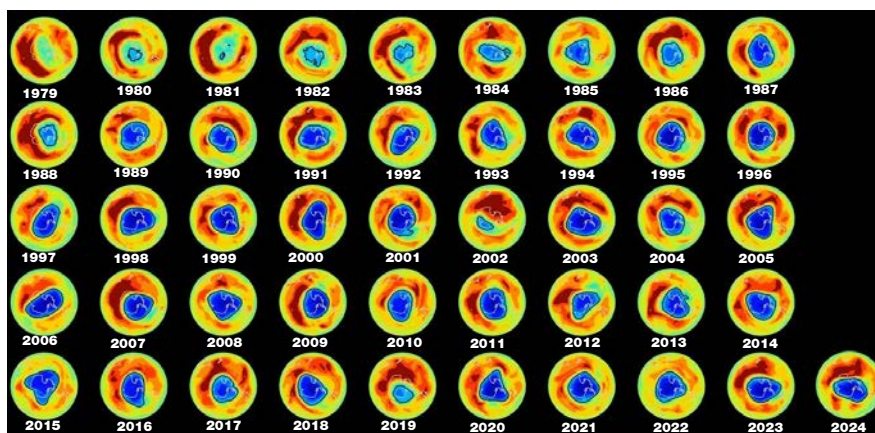
¹ Una medición de 1000 unidades Dobson (DU) representa una columna homogénea de ozono con un grosor de 1 cm en condiciones normales de presión y temperatura. La capa de ozono típicamente tiene un espesor que varía entre 3 y 5 mm, equivalente a un rango de 300 a 500 DU.

lanzado en 1978, transportaba a bordo el espectrómetro de cartografiado del contenido total de ozono, más conocido por sus siglas en inglés TOMS (*total ozone mapping spectrometer*).

En junio de 1974 se genera una gran alarma cuando se publica un artículo en la revista *Nature* sobre la destrucción del ozono. La preocupación se centraba en ciertos gases de amplio uso industrial, conocidos como *clorofluorocarburos* (CFC), que estaban siendo liberados en grandes cantidades a la atmósfera y podrían estar causando un grave daño a la capa de ozono. Sherry Rowland y Mario Molina, los autores de este estudio, señalaban que los CFC tienen una vida útil de 40 a 150 años y que la radiación solar los descompone, generando átomos de cloro capaces de destruir el ozono en la estratosfera. Esta hipótesis teórica generó debates intensos en la comunidad científica. Los experimentos y las mediciones atmosféricas realizados en los años subsiguientes confirmaron el hecho de que los CFC estaban provocando la destrucción del ozono estratosférico. En 1995 se les concedió el Premio Nobel de Química, junto con Paul J. Crutzen. Según la Academia, «al explicar los mecanismos químicos que afectan al grosor de la capa de ozono, estos tres investigadores han contribuido a salvarnos de un problema medioambiental global que podría tener consecuencias catastróficas».

En mayo de 1985, investigadores de la British Antarctic Survey revelaron el descubrimiento de un extenso agujero en la capa de ozono que surge sobre la Antártida cada primavera, persistiendo durante varios meses. Este hallazgo confirmó las preocupaciones generadas por la hipótesis de Rowland y Molina. La razón detrás de la aparición exclusiva en la Antártida se debe a la formación, durante el invierno, de nubes estratosféricas polares, las cuales albergan reacciones que intensifican la destrucción del ozono, resultando en la formación de un *agujero*. Cabe destacar que, en realidad, no existe un agujero en esa región, sino que la capa de ozono experimenta una significativa reducción en su espesor, disminuyendo por debajo de los 2 mm. En la figura 22 se muestran imágenes de la capa de ozono en distintos años.

Figura 22. Evolución de la capa de ozono. Imagen del día 30 de septiembre de cada año



Fuente: Nickson (2024).

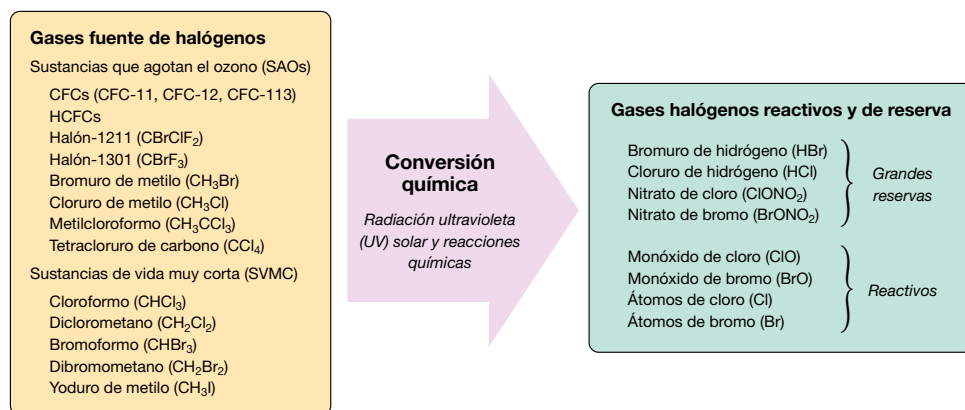
7.3.1. Reacciones químicas de destrucción de la capa de ozono

Los gases que emitimos y que son los causantes de la destrucción de la capa de ozono normalmente no participan directamente en las reacciones con el ozono. Se los denomina *gases halogenados fuente*. Estos gases fuente, mediante la acción de la radiación ultravioleta, producen reacciones que los transforman en gases reactivos u otros gases que también contienen cloro y bromo. Algunos de los gases actúan como depósitos químicos, que luego pueden convertirse en ClO y BrO, los dos gases reactivos más importantes que participan en reacciones catalíticas que destruyen el ozono.

Los gases reactivos que contienen cloro y bromo destruyen el ozono estratosférico en ciclos *catalíticos* formados por dos o más reacciones separadas. Como consecuencia, un solo átomo de cloro o bromo puede destruir miles de moléculas de ozono antes de abandonar la estratosfera. De este modo, una pequeña cantidad de cloro o bromo reactivo tiene un gran impacto en la capa de ozono. Una situación especial se produce en las regiones polares a finales del invierno y principios de la primavera, donde un gran aumento de la abundancia del gas reactivo más importante, el monóxido de cloro, provoca una grave reducción de la capa de ozono.

El ozono estratosférico se destruye por reacciones en las que intervienen gases halógenos reactivos, que se producen en la conversión química de gases fuente de halógenos (véase figura 23).

Figura 23. Conversión de gases fuente de halógenos

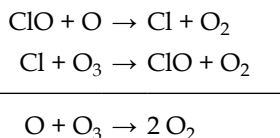


Nota. Los gases fuente de halógenos que contienen cloro y bromo se convierten químicamente en gases halógenos reactivos y de reserva, principalmente en la estratosfera. La conversión requiere radiación solar ultravioleta y algunas reacciones químicas. Los gases producidos por esta conversión química se pueden agrupar en gases de reserva (que no destruyen directamente el ozono) y en gases reactivos (que participan en los ciclos de destrucción del ozono). El gas reactivo principal, el ClO, se forma a partir de los gases reserva HCl y ClONO₂ mediante reacciones que ocurren en las superficies de nubes estratosféricas polares líquidas y sólidas.

Fuente: elaboración propia.

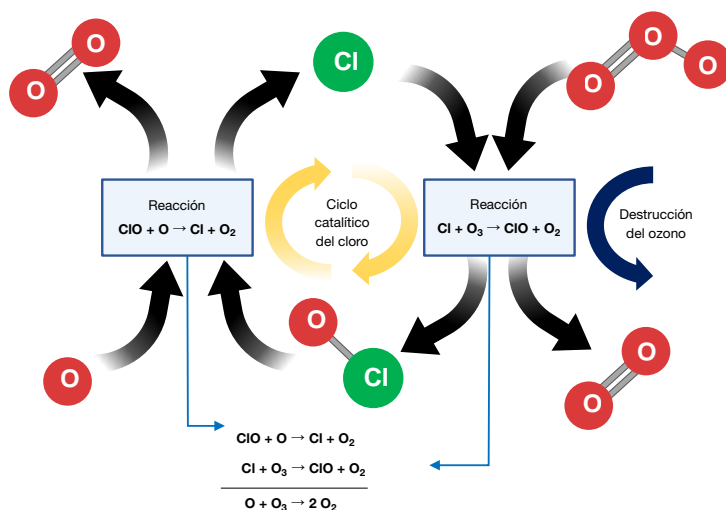
Los más reactivos de estos gases son el monóxido de cloro (ClO), el monóxido de bromo (BrO) y los átomos de cloro y bromo (Cl y Br). Estos gases participan en los siguientes tres ciclos principales de reacción que destruyen el ozono:

- Ciclo 1. Este ciclo de destrucción del ozono se ilustra en la figura 24 y se produce en la estratosfera superior, en latitudes tropicales y medias, donde la radiación solar ultravioleta es más intensa. El ciclo se compone de dos reacciones básicas:



El resultado neto del ciclo 1 es convertir una molécula de ozono y un átomo de oxígeno en dos moléculas de oxígeno. En cada ciclo, el cloro actúa como catalizador porque el ClO y el Cl reaccionan y se reforman. De esta forma, un átomo de Cl participa en muchos ciclos, destruyendo muchas moléculas de ozono. Para condiciones estratosféricas típicas en latitudes medias o bajas, un solo átomo de cloro puede destruir miles de moléculas de ozono antes de que reaccione con otro gas, rompiendo el ciclo catalítico. Durante todo el tiempo que permanezca en la estratosfera, un átomo de cloro puede destruir muchos miles de moléculas de ozono.

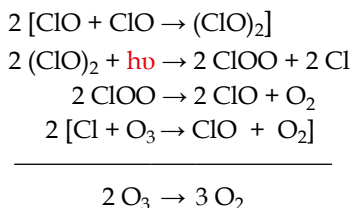
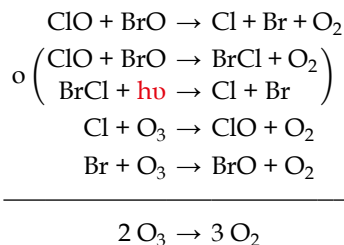
Figura 24. Ciclo 1 de destrucción del ozono



Nota. Este ciclo es el predominante en la estratosfera superior en latitudes tropicales y medias, donde la radiación solar ultravioleta es más intensa.

Fuente: elaboración propia.

- Ciclos polares 2 y 3. La abundancia de ClO aumenta considerablemente en las regiones polares durante finales del invierno y principios de la primavera, en comparación con otras estaciones, como resultado de reacciones en las superficies de las nubes estratosféricas polares.

Ciclo 2**Ciclo 3**

Estos dos ciclos se convierten en los mecanismos de reacción dominantes para la pérdida de ozono polar debido a la alta abundancia de ClO y a la relativamente baja abundancia de oxígeno atómico (que limita la pérdida de ozono por el ciclo 1).

El ciclo 2 comienza con la autorreacción del ClO. El ciclo 3, que comienza con la reacción del ClO con el BrO, tiene dos vías de reacción que producen Cl y Br o BrCl. El resultado neto de ambos ciclos es la destrucción de dos moléculas de ozono y la creación de tres moléculas de oxígeno.

Los ciclos 2 y 3 son responsables de la mayor parte de la pérdida de ozono observada en la estratosfera sobre las regiones ártica y antártica a finales del invierno y principios de la primavera. Con abundancias elevadas de ClO, la tasa de destrucción del ozono polar puede alcanzar entre el 2 y el 3 % diario.

Para estos ciclos es necesaria la luz solar. El ciclo 1 requiere una radiación ultravioleta (UV) lo suficientemente fuerte como para descomponer el oxígeno molecular en oxígeno atómico.

El ciclo 1 es más importante en la estratosfera superior, a altitudes superiores a 30 km, donde la radiación UV-C solar es más intensa (longitudes de onda de 100 a 280 nm), por tanto, se produce en la parte alta de la capa de ozono (véase figura 20).

Los ciclos 2 y 3 también requieren luz solar. En la oscuridad continua del invierno en la estratosfera polar los ciclos de reacción 2 y 3 no pueden ocurrir. La luz solar es necesaria para descomponer gases como el $(\text{ClO})_2$ y el BrCl, formándose cantidades de ClO y BrO suficientemente grandes como para producirse la rápida pérdida de ozono. Estos ciclos son más activos cuando la luz solar vuelve a las regiones polares a finales del invierno o principios de la primavera. Por lo tanto, la mayor destrucción de ozono se produce en los periodos de luz solar parcial o total tras la mitad del invierno en la estratosfera polar.

7.3.2. Convenio de Viena y Protocolo de Montreal

La confirmación científica de la disminución de la capa de ozono llevó a la comunidad internacional a establecer un mecanismo de cooperación para adoptar medidas destinadas a protegerla. Este esfuerzo se formalizó en el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, que fue aprobado y firmado por 28 países el 22 de marzo de 1985. Este fue el paso inicial que condujo, en septiembre de 1987, a la redacción del Protocolo de Montreal sobre sustancias que destruyen la capa de ozono.

El principal objetivo del Protocolo de Montreal es preservar la capa de ozono mediante la implementación de medidas para controlar la producción y el consumo mundiales de sustancias que la destruyen, con la meta final de eliminarlas, basándose en los avances del conocimiento científico y de las nuevas tecnologías.

El Protocolo de Montreal se organiza en torno a diversos grupos de sustancias que destruyen el ozono, clasificados según su familia química, y que van detallados en los anexos al texto del protocolo. Se requiere el control de unas 100 sustancias químicas distribuidas en varias categorías. Para cada grupo de sustancias químicas, se establece un calendario para la eliminación gradual de su fabricación y consumo, con la intención última de su total eliminación.

Existen excepciones para usos esenciales en casos donde no se encuentren sustitutos aceptables, como en inhaladores utilizados comúnmente para tratar el asma y otros problemas respiratorios, así como en sistemas antiincendios de halón utilizados en submarinos y aviones.

En 1994, la Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó el 16 de septiembre como el Día Internacional de la Preservación de la Capa de Ozono, conmemorando la fecha de la firma del Protocolo de Montreal en 1987 sobre sustancias que dañan la capa de ozono.

El 16 de septiembre de 2009, la Convención de Viena y el Protocolo de Montreal marcaron un hito al convertirse en los primeros tratados de la historia de las Naciones Unidas en lograr la ratificación universal.

En la 28ª Reunión de las Partes del Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono, celebrada el 15 de octubre de 2016 en Kigali (Ruanda), se acordó de manera unánime la eliminación progresiva de los hidrofluorocarbonos (HFC).

7.4. Contaminación urbana

En la actualidad, aproximadamente el 56 % de la población mundial, lo que equivale a 4400 millones de habitantes, reside en zonas urbanas. Se anticipa que esta tendencia persistirá, ya que se espera que la población urbana se duplique para el año 2050, alcanzando casi el 70 %, con casi 7 de cada 10 personas viviendo en entornos urbanos.

Las ciudades desarrollan su propio microclima debido a la concentración de diversos agentes contaminantes, como actividades industriales, sistemas de transporte y densas poblaciones. Estos factores producen una elevación de la temperatura en estas áreas por encima de

la registrada en sus alrededores. La magnitud de este fenómeno aumenta con el tamaño de la ciudad y a medida que nos acercamos al centro urbano, resultando en temperaturas más elevadas. Es lo que se conoce como *isla de calor* y que dificulta que se dispersen los contaminantes.

Destacan cinco aspectos esenciales que explican la singularidad de los climas en áreas urbanas, en comparación con las periféricas, y que producen la isla de calor:

- Diferencias en los materiales de superficie. La ciudad se caracteriza por la predominancia de elementos rocosos que conducen el calor con una rapidez tres veces mayor que los suelos húmedos o arenosos del campo. La agrupación de edificios resulta en una multiplicación de superficies que absorben y retienen la energía solar. Además, los materiales tienen una gran disparidad en el calor específico de los sustratos, lo que facilita el desarrollo de turbulencias urbanas que contribuyen a la permanencia de contaminantes en el aire urbano, ya que la turbulencia puede mantener partículas en suspensión por más tiempo, afectando a la calidad del aire en entornos urbanos.
- Variedad en las estructuras y orientaciones urbanas. Las áreas urbanas exhiben una mayor diversidad en las formas y orientaciones de sus estructuras en comparación con los paisajes naturales. Esto afecta a los procesos de reflexión y absorción de la radiación solar, disminuye la velocidad del viento y aumenta la turbulencia, fortaleciendo el aspecto anteriormente mencionado.
- Sistemas de drenaje urbanos y ausencia de áreas verdes. Las áreas urbanas cuentan con sistemas de drenaje para eliminar el agua de la precipitación, a diferencia del campo, donde parte del agua de superficie se evapora, generando un proceso de enfriamiento. Además, la escasez de zonas verdes contribuye a una menor evapotranspiración (evaporación del agua y transpiración de las plantas), lo cual no ayuda a disminuir la temperatura.
- Generación de calor en áreas urbanas. Las áreas urbanas generan calor, especialmente en invierno, cuando los sistemas de calefacción están en funcionamiento. La densidad de edificaciones también las convierte en acumuladoras de calor, creando un gradiente térmico claro entre la periferia y el área urbana, manifestado en la formación de *brisas urbanas*. Estas áreas propician movimientos ascendentes que mantienen en suspensión elementos contaminantes.
- Contaminación del aire en áreas urbanas. El aire en áreas urbanas, especialmente las industrializadas, contiene cantidades significativas de contaminantes como humo, polvo, dióxido de azufre y otros gases producto de la combustión. Estos contaminantes pueden tener diversos efectos, desde actuar como *calentadores*, al absorber radiaciones de onda larga, hasta comportarse como *enfriadores*, al reflejar parte de la radiación solar. Además, las altas concentraciones de cuerpos higroscópicos facilitan la formación de nieblas, nubes e incluso precipitaciones.

Los microclimas urbanos resultan en una peor calidad del aire y agua, así como en el aumento de olas de calor. Estos impactos adversos afectan negativamente a la salud de las personas, causando dificultades respiratorias, deshidratación, cansancio y agotamiento.

7.4.1. Smog o esmog

El término *smog* (esmog) proviene de la combinación de las palabras inglesas *smoke* (humo) y *fog* (niebla), siendo acuñado por primera vez a principios del siglo pasado por H. A. des Voeux. Fue popularizado en 1911 en la Conferencia de Mánchester para la Reducción del Humo de Gran Bretaña por las más de 1000 muertes que ocurrieron en Glasgow y Edimburgo durante el otoño de 1909. Inicialmente, se utilizó para describir la niebla gris o pardo-rojiza que se formaba sobre las ciudades debido a la contaminación.

El esmog representa uno de los problemas más significativos de contaminación del aire. Se forma por la combinación prolongada de aire y contaminantes a altas presiones (anticiclón), lo que resulta en el estancamiento del aire y en la retención de gases nocivos en la troposfera.

Esta mezcla química contiene concentraciones elevadas de óxidos de azufre y nitrógeno, hidrocarburos y partículas como plomo, manganeso, cobre, níquel y zinc.

En sus inicios, las emisiones de hollín y azufre provenientes de calefacciones e industrias, así como las emisiones vehiculares y la quema de carbón, eran las principales causas del esmog urbano. La geografía también influye, siendo ciudades costeras o elevadas más propensas debido al estancamiento del aire en anticiclones.

La formación del esmog implica la combinación de gases contaminantes con otros, dando lugar a una mezcla tóxica con efectos perjudiciales. Se distinguen dos tipos de esmog:

- Fotoquímico. Este esmog, también conocido como *niebla fotoquímica*, es una mezcla de contaminantes con origen tanto primarios (emitidos directamente a la atmósfera, como NO_x , COV y otros hidrocarburos) como secundarios (derivados de los anteriores bajo la influencia de la luz solar, como el ozono troposférico, peroxiacetilnitrato [PAN] y radicales hidroxilos). Es necesaria la acción de la radiación solar para que se den las reacciones químicas y se forme este tipo de esmog.

La acumulación de estos gases conduce a la formación de una nube que durante periodos de alta presión atmosférica resulta en un estancamiento del aire, creando una niebla o bruma fotoquímica. Esta bruma está compuesta principalmente por aire contaminado, generando una atmósfera perjudicial, irritante y, en ocasiones, muy tóxica.

El primer registro del esmog fotoquímico ocurrió en Los Ángeles

Figura 25. **Esmog fotoquímico durante periodos anticiclónicos en la ciudad de Madrid**



Fuente: Getty Images.

en 1943, donde la combinación de óxidos de nitrógeno y COV provenientes de las emisiones del tráfico reaccionaron, catalizados por la radiación solar, formando ozono troposférico y nitratos de peroxiacetilo. Este proceso oscureció la atmósfera, tiñendo las capas inferiores con un tono pardo rojizo.

El esmog fotoquímico tiene un impacto muy negativo en la visibilidad y en la salud, irritando los ojos y el sistema respiratorio. En áreas densamente pobladas, se asocia con un aumento en el índice de mortalidad, especialmente cuando la inversión térmica crea una cubierta (boina) sobre la ciudad, impidiendo la dispersión del esmog. Este fenómeno es más frecuente en ciudades costeras o cercanas a la costa, así como en aquellas ubicadas en valles amplios con abundante vegetación. Su incidencia es más pronunciada en las horas centrales del día, cuando la radiación solar es máxima, acelerando la producción de contaminantes secundarios. Además, el esmog fotoquímico se ve favorecido por condiciones anticiclónicas, intensa insolación y vientos débiles que dificultan la dispersión de los contaminantes (véase figura 25).

- Sulfuroso. Este esmog, también conocido como *esmog clásico*, *esmog industrial*, *esmog ácido*, *esmog húmedo* o *esmog reductor*, es el que suele formarse en grandes áreas urbanas industriales, especialmente en ciudades como Londres y Chicago. Este fenómeno se atribuía a la contaminación generada por óxidos de azufre provenientes de la quema de carbón que, al reaccionar con el vapor de agua atmosférico, producía ácido sulfuroso (de ahí su denominación) y diversas partículas sólidas en suspensión, las cuales luego precipitaban en forma de lluvia ácida.

Este tipo de esmog originaba una densa niebla cargada de contaminantes, teniendo efectos sumamente perjudiciales para la salud de las personas, para la supervivencia de la vegetación, así como para la conservación de edificios, estatuas y otros materiales, especialmente en áreas urbanas dentro del país.

En la actualidad, en naciones desarrolladas, los combustibles responsables del esmog sulfuroso se queman en instalaciones que cuentan con sistemas más eficientes de depuración o dispersión. Por consiguiente, este tipo de contaminación raramente se encuentra en la actualidad. Sin embargo, en países en vías de industrialización como China y algunas naciones de Europa del Este, el esmog sulfuroso aún representa un grave problema en ciertas ciudades.

Ejercicios voluntarios

- Investiga un poco en internet o con inteligencia artificial para responder a las siguientes cuestiones:
 - ¿Qué parte del espectro de radiación que emite el Sol nos llega a la troposfera?
 - ¿En qué zonas de la atmósfera se absorben las radiaciones que no nos llegan?
 - ¿Qué pasaría si por algún fenómeno natural o antropogénico se modificase la composición de la atmósfera y nos llegasen algunas de esas radiaciones?
 - ¿En qué parte de la atmósfera se descomponen los meteoritos? ¿Por qué sucede en esa capa y no en otra superior o inferior?
 - ¿Hay alguna capa de la atmósfera que sea conductora eléctrica?
- Según lo estudiado en las capas atmosféricas, ¿cuándo se propagarán a mayor distancia las ondas de radio, por el día o por la noche? ¿A qué es debido?
- ¿Qué iones se formarán en cada una de las capas de la ionosfera?
- En relación con el ozono estratosférico:
 - Represente las reacciones que producen su destrucción.
 - Indique qué agentes o factores favorecen la destrucción, indicando el motivo.
- Realice una búsqueda en internet para decidir cuáles son las distintas fuentes de cada una de las radiaciones ionizantes descritas en el apartado 4.2.2.
- Explique brevemente las diferencias fundamentales entre el esmog tipo clásico y el esmog fotoquímico.
- Visualice este vídeo (<https://youtu.be/CWsGwtiiSio?si=8UocEQMVFcdAxaj2>). Después, busque información e indique cuáles son las principales características de cada uno de los esmogs, para lo que se puede ayudar de la siguiente tabla.

	Esmog fotoquímico	Esmog clásico
Otros nombres que se le dan...		
Principales componentes...		
Hora del día de mayor actividad...		
Requisito para que se produzca...		
Carácter redox...		
Color...		

8. ¿Por qué los gases mayoritarios en la atmósfera O₂ y N₂ no producen efecto invernadero?
9. ¿Por qué la radiación entrante en la atmósfera no produce efecto invernadero y la saliente sí?
10. ¿Por qué se produce el agujero de ozono en las zonas polares?
11. Realice una búsqueda de datos en internet sobre la capa de ozono. Después, dibuje una línea cronológica con los principales hitos relativos a la capa de ozono desde su descubrimiento en 1903 hasta nuestros días. Incluya hitos científicos, acuerdos internacionales y valores críticos en la capa y en los contaminantes.

Referencias bibliográficas

- Albentosa Sánchez, L. M. (1979). Contaminación atmosférica y nieblas en las áreas urbanas industrializadas. *Acta Geológica Hispánica*, 14(1), 529-533. <https://raco.cat/index.php/ActaGeologica/article/view/148722>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2025). Global Climate Highlights 2024. *Copernicus*. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2024). Copernicus: Antarctic ozone hole in 2024 returns to business as usual. <https://atmosphere.copernicus.eu/copernicus-antarctic-ozone-hole-2024-returns-business-usual>
- Forget, B. G. y Bunn, H. F. (2013). Classification of the disorders of hemoglobin. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 3(2), 1-13. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a011684>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M. y Zhang, H. (2021). The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 923-1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Gill, A. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics* (1.^a ed., Vol. 30). Academic Press.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido (Boletín Oficial del Estado [BOE] núm. 276, de 18 de noviembre de 2003). <https://www.boe.es/eli/es/l/2003/11/17/37>
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera (Boletín Oficial del Estado [BOE] núm. 275, de 16 de noviembre de 2007). <https://www.boe.es/eli/es/l/2007/11/15/34/con>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Atmósfera y calidad del aire*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Calidad del aire. Normativa*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa.html>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). *Sistema Español de Inventario de Emisiones: Informe Interactivo*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/informe-interactivo-inventario-nacional-emisiones.html>
- Molina, M. J. y Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
- Molina, L., Molina, M., Slott, R., Kolb, C., Gbor, P., Meng, F., Singh, R., Gálvez, O., Sloan, J., Anderson, W., Tang, X., Hu, M., Xie, S., Shao, M., Zhu, T., Zhang, Y. H., Gurjar, B., Artaxo, P., ... Gertler, A. (2004). Air quality in selected megacities. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(12), 1-73. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10471015>
- Monroe, R. (2024). *The Keeling Curve*. <https://keelingcurve.ucsd.edu>
- NASA. (2025). *GISS Surface Temperature Analysis (v4): Analysis Graphs and Plots*. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/
- NASA. (2024). *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2*. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (s. f.). *Global Monitoring Laboratory-Carbon Cycle Greenhouse Gases*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>
- Nickson, T. (2025). *World Ozone Day 2024-The past successes and future challenges to shielding our planet-EIA*. <https://eia-international.org/blog/world-ozone-day-2024-the-past-successes-and-future-challenges-to-shielding-our-planet/>
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental (BOE núm. 301, de 17 de diciembre de 2005). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2005-20792>
- UCAR Center for Science Education. (2024). *Layers of the Atmosphere*. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere>
- Williams, D. R. (2024). *Earth fact sheet*. NASA. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earth-fact.html>

