

Tema 11. La atmósfera: estructura, composición y dinámica. La contaminación atmosférica. Métodos de determinación y corrección.

- Primer curso ESO: Bloques I y II.
- Segundo Curso E.S.O Boque II. Tránsito de energía en la Tierra. Tema 5.
- 2º Bach. Ciencias de la Tierra y del medio ambiente. Bloque II. Los sistemas terrestres: tema 5 y 6

SUMARIO

11.1. La atmósfera. Composición y estructura

11.2. Dinámica general

11.2.1. Humedad atmosférica. Grado de humedad.

11.2.2. Gradientes verticales y condiciones de estabilidad e inestabilidad atmosféricas

11.2.3. Presión atmosférica.

11.2.4. Circulación general del aire

11.2.5. Formación de nubosidad y precipitación

11.3. La contaminación. Concepto

11.3.1. La contaminación del aire. Atmósfera y contaminación:

Transporte y distribución de contaminantes.

Dispersión de los contaminantes desde sus fuentes. Factores.

El efecto invernadero.

Lluvia ácida.

El smog o contaminación fotoquímica.

Contaminación radiactiva.

Contaminación por la minería .

La capa de ozono.

11.3.2. Métodos de determinación y corrección de la contaminación atmosférica.

11.4. OPCIONAL: El fenómeno de “El Niño”

11.1. La atmósfera. Composición y estructura

La atmósfera es la envoltura gaseosa que envuelve a la Tierra, y por extensión otros planetas y satélites. Esta envoltura gaseosa diferenciada desde los primeros tiempos geológicos ha debido de sufrir profundas transformaciones hasta llegar a los tiempos actuales. Los diferentes gases que la componen han surgido por la actividad de los seres vivos, la acción de las radiaciones solares y las descargas eléctricas sobre los gases preexistentes. En general, todos los planetas que poseen atmósfera (ver Tema 1), han perdido la mayor parte del Hidrógeno y del Helio que formaba parte de la nebulosa primigenia que originó el Sistema Solar.

Hasta el siglo XVIII no se puso de manifiesto la verdadera composición del aire, como mezcla de diferentes gases que fueron descubriéndose desde 1759 (CO_2) hasta bien entrado el siglo XX (gases nobles). Está constituida por una mezcla de gases bastante homogénea, en la que predomina el N (78 %) y el O (21 %). El 1 % restante lo constituyen otros gases, entre los que destacan por su importancia el CO_2 y el vapor de agua. La mezcla básica de gases contiene también partículas sólidas y líquidas en suspensión (**aerosoles**). El **polvo atmosférico** tiene gran importancia en la atmósfera ya que, por un lado, puede actuar como núcleo de condensación en las precipitaciones y, actuar de pantalla que intercepta la energía solar rebajando la cantidad que llega al suelo.

Hasta una altura de 80 Km. los gases componentes de la atmósfera están bien mezclados (**Homosfera**), mientras que a partir de dicha cota tienden a formar estratos, tal como ocurre cuando se mezclan líquidos de distinta densidad (**Heterosfera**). Se estima que en la actualidad esta capa gaseosa alcanza unos 2500 Km. de altura, lo cual no significa que exista un límite superior definido, ya que se ha comprobado que la densidad de la atmósfera, que al nivel del mar es de 1.23 g/l. , a 800 Km. de altitud disminuye hasta $10\text{-}24 \mu\text{g/c.c.}$ y a 2.500 Km. se calcula que existe un átomo por c.c. (densidad semejante a la de los espacios interestelares), lo cual hace suponer la existencia de un nexo entre la atmósfera solar y la terrestre.

Ni el N ni el O, pese a la importancia para los seres vivos, ni los gases nobles tienen gran relieve en el desarrollo de los fenómenos atmosféricos. En cambio si lo juega el CO_2 , pese a su escasez. Su importancia radica en la capacidad de sus moléculas triatómicas para absorber la energía radiante emitida por la Tierra, disminuyendo en gran medida la pérdida de calor del planeta. Influye, por tanto, en la transferencia de energía que existe a través de la atmósfera como parte integrante de su estado de equilibrio energético. Su concentración depende de la velocidad de las relaciones de equilibrio entre el CO_2 atmosférico y los depósitos superficiales de carbonatos y bicarbonatos de la litosfera y de los océanos.

La atmósfera no puede considerarse de forma aislada, sino como parte integrante del **Sistema Tierra**, en cuyo equilibrio toman parte además la Hidrosfera, la Litosfera y la Biosfera. De la estrecha interrelación entre ellas surge la situación de equilibrio que hace de la Tierra un lugar adecuado para sustentar la vida. La introducción de una alteración en cualquiera de ellas, y en particular en la atmósfera, puede desplazar la situación de equilibrio con consecuencias difíciles de prever para el desarrollo de la vida en el planeta.

La atmósfera está estructurada en capas superpuestas, diferenciadas en función de la variación de densidad, t° y fenómenos físicos que en ella se producen. Cada una de estas capas vienen separadas convencionalmente por otras denominadas pausas, que normalmente coinciden con los máximos o mínimos térmicos de cada capa.

Troposfera.

Es la capa inferior de la atmósfera y se encuentra en contacto directo con la superficie terrestre. Alcanza una altura media de unos 13 Km., siendo de 6-7 Km. en los polos y en el ecuador, por acción del efecto centrífugo de la rotación terrestre, la altura es de unos 17-18 Km. En esta zona tienen lugar los fenómenos meteorológicos de nubosidad y de precipitación. La t° del aire en la troposfera muestra un descenso gradual con la altura (gradiente térmico vertical GVT) de unos 6.5°C cada 1000 m., este descenso se produce hasta los 12 Km. aproximadamente, en que se alcanza un t° de unos -65°C . A partir de este punto se produce un cambio en el gradiente térmico, comenzando a aumentar la t° . A este punto del cambio se le llama **Tropopausa**.

Otras características de la troposfera son: en ella se concentra prácticamente la totalidad del vapor de agua atmosférico; se producen movimientos verticales de aire (**turbulencias**) por convección (movimiento ascendente de las masas de aire calentadas en su contacto con la superficie terrestre); entre 0 y 2 Km. de altura, como media; se producen fenómenos de fricción del aire con la superficie y sus irregularidades topográficas, y en ella se generan y desarrollan los fenómenos meteorológicos.

Por estar en contacto con la hidrosfera y la biosfera presenta importantes cantidades de H₂O y CO₂ y muy variable de polvo en suspensión, el cual se concentra principalmente en los 500 m. contiguos a la superficie (capa sucia).

Estratosfera.

Comienza a partir de la tropopausa, en ella la densidad del aire ya es muy baja y los movimientos del mismo son, fundamentalmente, de carácter horizontal (velocidades de hasta 200 km/h), de ahí su nombre. En esta capa se da el fenómeno de filtración de la radiación UV procedente del Sol que, absorbida por el oxígeno, forma el ozono, que por ser inestable se descomponen de forma espontánea para reconstituirse de nuevo por el mismo procedimiento. Ello determina que esa radiación UV, letal para los seres vivos, no alcance la superficie de la Tierra y que la formación y ulterior descomposición del ozono, caliente la estratosfera ya que se trata de un proceso exotérmico. Dicha pantalla abarca aproximadamente la mitad superior de la estratosfera (**ozonoesfera**).

Los primeros 15 Km. de la estratosfera muestran, por eso, un leve aumento de la tª del aire con la altura (**capa isoterma**), que se hace mucho mayor, del orden de 23 °C/Km. en los 25 Km. restantes (**capa cálida**).

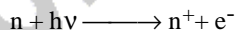
Mesosfera.

Se extiende desde el límite superior de la estratosfera (**Estratopausa**) hasta los 80-90 Km. de altura en que acaba la homosfera. La tª vuelve a descender, partiendo de una tª de 0 °C a los 50 Km., alcanza valores de -142 °C a unos 80 Km. Se separa de la siguiente capa por la **Mesopausa**. En la mesopausa pueden formarse, ocasionalmente, nubes noctilucen (se ven por la noche), al ser iluminadas por los rayos solares dada su gran altura. Al parecer están formadas por cristales de hielo aglutinados sobre partículas de polvo interestelar.

En estos niveles es donde los meteoritos que entran en la atmósfera terrestre se tornan incandescentes por rozamiento con el aire (**estrellas fugaces**)

Ionosfera o Termosfera.

En ella pueden alcanzarse tª de hasta 1500 °C como consecuencia de la absorción de energía solar de onda muy corta por moléculas atmosféricas muy "rarificadas", termina en la **Termopausa**. Los gases que la componen están disociados y se producen fenómenos de ionización debido a la acción de la radiación UV y de los rayos X. Los fotones (hν) inciden sobre partículas neutras (n) y liberan electrones (e⁻).



La densidad de n⁺ y e⁻ es más alta a partir de los 80 Km. Para algunos este nivel separa dos capas: neutrosfera e ionosfera. La ionosfera, neutra eléctricamente, está cargada de partículas neutras, cationes y electrones. La densidad de e⁻ varía con la altura, originando distintas capas, de arriba a abajo:

1. **Capa F** o capa Kenelly-Heaviside, que refleja las longitudes de onda media. En esta capa no varía la ionización entre el día y la noche, es la que refleja las ondas de la radio (OM). Las dos últimas experimentan variaciones de la densidad de partículas cargadas del día a la noche en que prácticamente desaparecen.
2. **Capa F₁**, refleja la longitudes de onda corta,
3. **Capa F₂**, refleja las longitudes de onda ultracorta.

Magnetosfera

De reciente descubrimiento (satélites americanos Explorer I y III). Se extiende hasta unos 60.000 Km. de altura en la cara iluminada de la Tierra y mucho más lejos en la cara opuesta al Sol formando como una cola de cometa magnetosférica. Está formado por partículas cargadas eléctricamente que se mueven con la Tierra por la interacción entre el viento solar (protones y e⁻ solares) y el magnetismo terrestre. Una parte de estas partículas se mueve según las líneas de fuerza del campo terrestre hasta ser detenidas por las altas capas de la atmósfera.

Entre los fenómenos producidos por el magnetismo terrestre están las **auroras boreales** y **australes**, causadas por la precipitación de las partículas energizadas del **viento solar**¹ sobre altas capas de la atmósfera a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra, se localizan a unos 1000 Km. de altura. Estas partículas chocan con átomos o moléculas neutras llevando sus e^- a altos niveles de energía que ceden posteriormente en forma luminosa. Se concentran en las zonas polares, interaccionando con los átomos ionizados de la termosfera.

El campo magnético actúa como un escudo protector frente al viento solar, aunque algunas partículas son atrapadas por aquél y oscilan indefinidamente a lo largo de las líneas de fuerza de dicho campo, constituyendo los **cinturones de radiación de Van Allen** situados a distintas alturas; son dos zonas de alta radiactividad que rodean la Tierra en forma de cinturones evitando las regiones polares. Rodean ecuatorialmente a la Tierra; la zona inferior (zona A) a 3.200 Km de altitud y la superior (zona B) a 22.000 Km; cada una presenta protones en su parte interior y e^- en su parte exterior; tanto unos como otros han sido captados por el campo magnético terrestre.

Exosfera.

Se considera como la última capa de la envuelta gaseosa, e incluso como la zona exterior de la atmósfera. Está formada por moléculas e iones cuya concentración disminuye progresivamente hasta que se iguala con la del espacio planetario.

11.2. Dinámica general

Tanto la superficie terrestre como la atmósfera se calientan por la radiación procedente del Sol. Esta radiación tiene que atravesar la atmósfera para llegar a la Tierra, al igual que la radiación emitida por la Tierra también la atraviesa. Sin embargo, la atmósfera no se comporta pasivamente en la transferencia de radiación. Toma parte en ella absorbiendo, reflejando o dispersando la energía recibida. Regula así la cantidad que alcanza la Tierra procedente del Sol y la que consigue escapar al espacio interior. Pero, además, selecciona el tipo de radiación que entra, actuando como barrera protectora frente a las radiaciones destructivas. Una parte de la energía calorífica de la atmósfera se transforma en energía cinética que conduce la circulación de las masas de aire y de las corrientes oceánicas. Estos movimientos contribuyen a la distribución de la energía calorífica en todo el planeta.

Todos los cuerpos emiten energía radiante de cierta intensidad y longitud de onda; está en función de la T^a a la que se encuentra y de su composición. A mayor T^a mayor cantidad de radiación electromagnética emitida y menor su longitud de onda.

La radiación solar llega a la Tierra en forma de luz y calor, siendo esta radiación la principal fuente de energía de la atmósfera y la causante de los fenómenos atmosféricos. Sin embargo, la atmósfera deja pasar los rayos solares sin calentarse por ello; son la tierra y el agua las que se caldean y transmiten ese calor al aire que está en contacto con ellas. De 100 unidades de energía transmitida del Sol a la Tierra:

- 16 son absorbidas por la atmósfera (por polvo, vapor de agua, etc.)
- 20 son reflejadas por las nubes.
- 3 son absorbidas por las nubes.
- 6 son dispersadas difusamente por las partículas de la atmósfera.
- 4 son reflejadas por la superficie de la tierra y los mares.
- 51 son absorbidas por tierra y mar.

En promedio, la superficie terrestre cede a la atmósfera en forma de calor una cantidad de energía igual a la que absorbe (sobre todo si abunda el vapor de agua). La Tierra emite una energía recibida del Sol (**energía radiante**), siendo la T^a media en la superficie de 300 °K; esta energía radiante es de tipo IR (comprendida entre 4 y 50 μ m), con un máximo de intensidad de 10 μ m. La mayoría de esta energía la absorbe el vapor de agua y el CO₂ (la atmósfera es transparente para las de longitud de onda 8 - 11 μ m, se le llama **ventana atmosférica**), causando un calentamiento de la atmósfera, que vuelve a emitir el calor absorbido a la

¹ Son e^- y protones desviados por las líneas de fuerza del campo magnético terrestre, distorsionándolo y dándole forma de cometa cuya cola se prolonga hasta 400.000 km de la Tierra.

superficie de la Tierra, manteniendo una t^a superior a la que habría en ausencia de atmósfera (**efecto invernadero**). La atmósfera, por su parte, recibe el calor desde la Tierra más que desde el Sol.

La radiación IR que alcanza las nubes es reflejada en parte hacia abajo (**contrarradiación atmosférica**), incrementándose así el efecto invernadero. Por ello cuando existen cielos despejados y con bajos niveles de humedad gran parte de la radiación terrestre escapa al espacio exterior, produciéndose durante las noches un importante descenso de la t^a . Gracias al efecto invernadero natural existe el agua líquida en la Tierra; y la t^a media es de unos 15 °C lo que supone una elevación sobre lo esperado de 35 °C

Considerando a la Tierra como conjunto, la energía absorbida compensa las pérdidas de calor al espacio exterior de forma que la energía neta es nula. A nivel local esto no se mantiene: En las latitudes superiores a los 45° la Tierra recibe menos radiación de la que emite, y lo contrario ocurre en latitudes inferiores a los 45°. No por ello unas zonas de la Tierra se calientan y otras se enfrían. El mismo desequilibrio de calores el que genera y alimenta la circulación atmosférica y las corrientes oceánicas que se ocupan de distribuir el calor a lo largo del planeta.

Esta transferencia de energía se realiza a partir de la radiación saliente (29 %): El 5% como **calor sensible** que calienta el aire situado en las inmediaciones del suelo, lo que origina las corrientes de convección térmica. El 24 % como **calor latente**. La presencia de vapor de agua añade fuerza ascensional al aire, debido a que lo hace más ligero por desplazar a los otros componentes del aire (N_2 , O_2 , CO_2) de mayor peso molecular. Para que el agua se convierta en vapor se precisa una cantidad de calor (calor latente de vaporización) cuyo valor a 0 °C es de 597 cal/g. Cuando el agua se condensa, debido al enfriamiento originado por el ascenso, libera el calor latente en forma de calor sensible.

11.2.1. Humedad atmosférica. Grado de humedad.

La importancia del vapor de agua en los fenómenos atmosféricos es múltiple: es el origen de todas las nubes y formas de precipitación, absorbe parte de la energía radiante emitida por la Tierra junto con el CO_2 , y absorbe o refleja (nubes) una parte de la energía que alcanza la Tierra procedente del Sol. El vapor de agua se incorpora constantemente a la atmósfera procedente de la hidrosfera y de la biosfera por evaporación y transpiración.

Su proporción en el aire es muy variable, entre unas décimas y un 4 % del volumen, dependiendo del contacto que las masas de aire tengan con la hidrosfera y la tensión de vapor para esa temperatura. La energía absorbida en un punto al evaporarse el agua es transportada por los vientos y liberada al condensarse el vapor en lugares alejados, contribuyendo así a la transferencia de energía.

La máxima cantidad de vapor de agua que puede contener la atmósfera, está en función directa con la t^a . El **grado de saturación** es la máxima cantidad de humedad que puede contener un cierto volumen de aire, a partir de este valor se inicia la condensación.

La **Humedad absoluta** es la cantidad efectiva de vapor de agua que contiene el aire en un volumen determinado. Al estar relacionada con la t^a ambiente, ésta medida no es indicativa. Para conocer el grado de humedad real habría que dar la humedad absoluta en función de la t^a , o bien, lo más frecuente en Meteorología que es **Humedad relativa**, es decir la relación entre la humedad absoluta y la de saturación, se suele expresar en %. La H^a relativa puede cambiar si lo hace la t^a . Sin variar la cantidad de vapor de agua, un descenso de t^a produce un aumento de la H^a relativa y viceversa, siendo esta, la mayoría de las veces, la causa por la que se forman las nubes.

Las condiciones atmosféricas óptimas para el ser humano vienen dadas por un 80 % y una t^a de 15 °C. Para determinar el grado de humedad se utilizan los **psicrómetros e higrómetros**. El psicrómetro consta de dos termómetros, uno tiene el depósito de mercurio recubierto por una tela constantemente húmeda (indicará una t^a menor ya que parte del calor se emplea en evaporar el agua del paño que rodea al termómetro). Vista la diferencia de t^a , se consultan unas tablas psicrométricas que nos indican la humedad relativa.

Los higrómetros de condensación la miden con mayor exactitud. Se basan en el enfriamiento de una lámina hasta obtener el **punto de rocío** (t^a a la que el vapor de agua llega a la saturación si el aire se enfría a presión constante). Hay sustancias higroscópicas (cabello) que pueden indicar el grado de humedad.

11.2.2. Gradientes verticales y condiciones de estabilidad e inestabilidad atmosféricas

Llamamos gradiente vertical a la variación de t^a entre dos puntos situados a una diferencia de altitud de 100 m. Podemos hablar de tres tipos de Gradientes verticales.

➤ **Gradiente vertical de temperatura (GVT)**

Representa la variación vertical en la t^a del aire en condiciones estáticas o de reposo, que suele ser, de unos $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Realmente, dicha cantidad no es uniforme, sino que varía con la altura, latitud, estación, etc.

Llamamos **inversión térmica** al espacio aéreo en el cual la t^a aumenta con la altura en vez de disminuir, lo que impide los movimientos verticales del aire y puede presentarse a cualquier altura de la troposfera (la tropopausa representa una inversión térmica permanente). Existen también inversiones térmicas ocasionales, como las del invierno, en las que el suelo enfría la atmósfera inmediata, resultando ésta más fría que las capas superiores.

➤ **Gradiente adiabático seco (GAS)**

Su valor es de $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, denominándose seco porque contienen agua en forma de vapor. Este gradiente, a diferencia del vertical, es dinámico y afecta a la masa de aire que se encuentra en equilibrio térmico o bórico con relación al medio, por lo que tiende a ascender hasta encontrar el equilibrio.

Como el aire es un mal conductor del calor, la masa ascendente puede considerarse como un sistema aislado o adiabático, ya que no intercambia calor con el aire circundante. Por este motivo, en función de la ecuación general de los gases perfectos ($PV/T=K$), deducimos que: Durante el ascenso disminuye P , con lo que la masa de aire ascendente aumenta su volumen (V), expandiéndose; lo que provocará una disminución de t^a , ya que existe menor probabilidad de choque entre las partículas. En los descensos aumenta la presión, con lo que disminuye el volumen de la masa; la compresión de la misma hace que aumente la t^a , liberándose más calor.

➤ **Gradiente adiabático saturado o húmedo (GAH)**

Si la masa ascendente referida en el GAS alcanza el punto de rocío, se producirá la condensación del vapor de agua y la formación de una nube. A partir de ahí podrá proseguir su ascenso, pero con un gradiente <1 (de $0,3-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Esta “rebaja” se debe a la liberación del calor latente por condensación, denominándose llamándose a este nuevo gradiente gradiente adiabático saturado (GAH). Éste aumentará progresivamente a medida que el aire pierda humedad, hasta que todo el vapor haya sido condensado, alcanzando de nuevo los valores del GAS. En las zonas tropicales su valor será el mínimo (próximo a $0,3$), debido a la intensa evaporación, y las nubes alcanzarán alturas próximas a la tropopausa; por el contrario, en las latitudes medias el gradiente será mayor y las nubes se formarán a menor altura, sobre todo en invierno.

➤ **Condiciones de estabilidad e inestabilidad atmosféricas**

La **inestabilidad atmosférica** se produce cuando existen movimientos ascendentes de una masa de aire cuya t^a varía conforme al GAS ($1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), en el seno de una masa de aire estática, cuyas variaciones térmicas verticales se correspondan con el GVT. Para que el ascenso sea posible el $\text{GVT} > \text{GAS}$ o, lo que es lo mismo, que el aire exterior se enfríe más deprisa (sea más denso) que el interior. Al existir movimientos verticales, el aire ascendente va a crear una especie de vacío en superficie que da lugar a un descenso de presión o situación de borrasca y una afluencia del viento circundante que es atraído hacia el centro de la misma, pudiéndose producir precipitaciones en bs casos en los que la masa ascendente llegue a condensar. Las condiciones de inestabilidad atmosféricas son propicias para la eliminación de la contaminación, ya que el aire ascendente provoca la elevación y dispersión de la misma.

La situación de **subsistencia** es inversa a la de convección, pues la propicia el descenso hacia la superficie de una masa de aire frío que se va secando por calentamiento (en los descensos los gradientes se suman, salvo en las zonas de inversión térmica, en las que se restan). En superficie, la subsistencia, va a generar un **anticiclón** por incremento de la presión atmosférica. Debido al aplastamiento contra el suelo, los vientos partirán desde el centro hacia fuera, impidiendo la entrada de precipitaciones, con lo que el tiempo será seco. Hay dos tipos de situaciones de estabilidad:

- Que $0 < \text{GVT} < 1$. No hay movimientos verticales de aire.
- Que $\text{GVT} < 0$. Inversión térmica que forma nubes a ras del suelo (niebla), y que atrapa la contaminación por subsistencia o aplastamiento con la superficie.

Las subsidencias más intensas se suelen producir en invierno, con viento en calma, cuando las noches son largas y la atmósfera está muy fría, sobre todo en los primeros metros en contacto con el suelo. La contaminación queda atrapada.

La dispersión de la contaminación sólo es posible los días en los que el Sol tiene la intensidad suficiente para calentar la superficie terrestre, que a su vez hará aumentar la t^a del aire, provocando el ascenso.

11.2.3. Presión atmosférica.

Debido a la compresibilidad de los gases, casi la totalidad de la masa de la Tierra se encuentra en los primeros kilómetros próximos a la superficie. Esto condiciona que la presión atmosférica disminuya rápidamente con la altura, a diferencia de la presión hidrostática o la litosférica que aumentan con la profundidad.

Nos interesa el estudio de la presión atmosférica (presión ejercida por la masa de aire en un punto determinado), para analizar los factores que determinan la variación y como influye este hecho en la climatología.

La clásica experiencia de Torricelli y Viviani (1643) nos demuestra que el aire pesa. Gracias a ella podemos medir su valor.

σ = densidad del Hg; h = altura alcanzada por el Hg en la columna

$$P = F/S ; \quad F = m \cdot g = V \cdot \sigma \cdot g ; \quad V = S \cdot h, \quad \text{según esto } F = S \cdot h \cdot \sigma \cdot g, \quad \text{por lo que}$$
$$P = \frac{S \cdot h \cdot \sigma \cdot g}{S}; \quad P = \sigma \cdot g \cdot h = 13600 \text{ Kg./m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 0.76 \text{ m}$$

o sea, $P = 101293 \text{ N/m}^2$ Por definición $100 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ milibar}$. Por tanto el valor de la presión atmosférica normal es de 1013 milibares.

Otros barómetros se basan en medir la deformación sufrida por una lámina metálica, adherida a un recipiente en el que se ha hecho el vacío, debido a los cambios de presión.

La presión atmosférica se representa trazando líneas que unan puntos de igual presión (**Isobaras**). Puesto que el aire caliente es menos denso que el frío, cuando se establecen diferencias de t° entre capas de aire que están en contacto, se origina un empuje hidrostático que obliga a las capas más calientes a ascender. Esto acontece siempre que haya un descenso gradual de la t° conforme se asciende, pero en casos de inversión térmica la atmósfera es muy estable.

11.2.4. Circulación general del aire

La radiación IR, que calienta la atmósfera, no llega en la misma cantidad a todos los lugares del planeta, dado que las zonas ecuatoriales, por situarse perpendicularmente a la radiación solar, reciben mucha más energía por unidad de superficie que las zonas polares, donde los rayos inciden oblicuos, o incluso tangencialmente, en relación con la superficie de la esfera.

La circulación del aire tanto general como localmente, es activada por la diferencia de t° : el aire caliente se eleva, el aire frío desciende. Las corrientes de aire ascendentes y descendentes deben equilibrarse mutuamente. La circulación del aire en la atmósfera es producida por la convección, el trasvase de calor que se produce debido a que los gases o fluidos fríos descienden. Por ejemplo, si se calienta la pared de una habitación a la vez que se enfría la de enfrente, el aire se elevará junto a la pared caliente y se desplazará por el techo hasta la pared fría, antes de descender para volver a desplazarse por el suelo hacia la pared caliente.

Sin embargo, la atmósfera real es como una habitación muy larga con un techo muy bajo. La distancia del Ecuador a los polos es de unos 10.000 Km., mientras que la "altura del techo" hasta la tropopausa es de sólo unos 10 Km. El aire, pues, se fracciona en una serie de pequeños lazos o **células convectivas**.

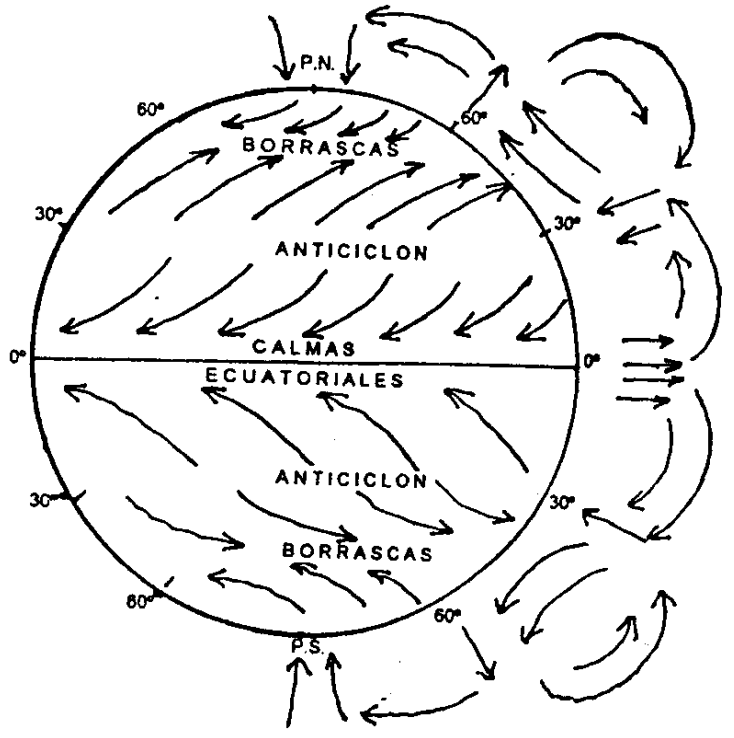
La circulación del aire a gran escala se realiza por convección. El aire cálido se eleva en el Ecuador y luego se desplaza hacia el norte o el sur, mientras que las corrientes de aire frío se desplazan desde los polos al Ecuador. Cada hemisferio tiene tres cinturones de células convectivas y la circulación en el seno de cada uno de los cinturones es mayor que entre ellos.

Si la Tierra no rotase, los vientos principalmente soplarían en sentido norte-sur. La rotación de la Tierra hace que desvíen su rumbo en sentido este-oeste (**Efecto Coriolis**). El efecto Coriolis alcanza sus valores máximos en los polos y mínimos en el ecuador, su valor es el siguiente:

2w.v.s. sen Φ , w = velocidad angular de la Tierra; v = velocidad del viento; σ = densidad del aire;
 Φ = latitud del lugar

Una posible explicación del efecto Coriolis es la siguiente (adecuada para la encerrona)

Al girar la Tierra sobre su eje, un punto situado cerca del Ecuador lleva una velocidad tangencial mayor que un punto situado cerca de los polos, ya que aquél tiene que describir una circunferencia de mayor longitud que éstos en 24 horas. Si se inicia un viento desde el Ecuador en dirección a los polos pasa a latitudes que giran más despacio que la velocidad de giro que el viento lleva, por lo que éste se adelanta, quedando desviado hacia el este; por el contrario, si el viento se inicia desde latitudes altas hacia el Ecuador, pasa a regiones que giran más deprisa de lo que gira el viento, por lo que este queda retrasado respecto de esas regiones, es decir se desvía hacia el Oeste.



2ª explicación del efecto Coriolis (mejor para el escrito)

En el ecuador el aire caliente tiende a elevarse, hasta que a una altura superior a los 6000 m comienza a soplar hacia los polos; el efecto Coriolis determina que tomen dirección NE en el Hemisferio Norte y SE en el Hemisferio Sur (**vientos contraalisios**), hasta que a los 30° de latitud sopla ya en dirección Oeste -Este; enfriado, cae sobre estas latitudes formando una zona de altas presiones (anticiclónica) y desde aquí se forman vientos **alisios** que soplan hacia el Ecuador; el efecto Coriolis hace que soplen en dirección SO en el Hemisferio Norte y del NO en el Hemisferio Sur.

Sobre los Polos el aire frío y denso forma una zona de altas presiones (anticiclón polar); comienza a soplar el viento en dirección al Ecuador, pero el efecto Coriolis hace que tome dirección NE-SO en el Hemisferio Norte y SE-NO en el Sur. A la latitud de unos 60° estos vientos ya tienen dirección E-O y, habiéndose calentado, se elevan para regresar a los Polos como vientos del SO en el Hemisferio Norte y del NO en el Sur. sobre los Polos, enfriado, vuelve a caer de nuevo.

En latitudes medias queda una corriente de aire relativamente frío, que desciende a los 30° de latitud, y otra de aire relativamente templado, que asciende a los 60° de latitud. Para completar el ciclo, el viento sopla a nivel del suelo desde los 30° a los 60° de latitud, y por el efecto Coriolis toma dirección SO-NE en el Hemisferio Norte y NO-SE en el Sur; estos vientos se mantienen a toda la altura de la troposfera de tal manera que los vientos de vuelta (de dirección NE-SO en el Hemisferio Norte y SE-NO en el Sur) ocurren en la estratosfera (al contrario que los vientos de altura de las otras regiones, que tienen lugar en la troposfera).

En la tropopausa, entre las tres células convectivas principales circulan fuertes vientos (corrientes en chorro subtropical y polar) dirigidas de Oeste a este, perpendicularmente a los meridianos.

Las zonas en las que el aire desciende y tiende a acumularse junto a la superficie son zonas de alta presión o **anticiclónicas**; en ellas el tiempo atmosférico suele ser seco y soleado. Por el contrario, las zonas donde el aire asciende son zonas de baja presión, en las que confluyen vientos de distinta procedencia, y también a distinta t^a a los 60° de latitud; estos vientos, al enfrentarse, producen **borrascas** que ocasionan precipitaciones y tormentas, especialmente intensas en la zona ecuatorial, por enfrentarse los alisios de ambos hemisferios y producirse fuertes corrientes ascendentes de aire.

Las zonas de contacto entre dos masas de aire de características distintas se denominan **frentes**. Por ejemplo la zona de convergencia de la masa polar y tropical se denomina **frente polar**, subdividido en **frentes frío y cálido**, según la t^a de la masa de aire que avanza.

La zona de convergencia intertropical (**zona de calmas ecuatoriales**) va a lo largo del Ecuador (en estas zonas y en torno a ambos trópicos los barcos de vela pueden pasar semanas a la deriva. A ras de suelo, el aire se desplaza desde ambos hemisferios hacia el Ecuador (desde 3° - 10° latitud N hasta los 3° - 10° latitud S). El intercambio de aire entre ambos hemisferios es un proceso lento.

La circulación general se describe mediante tres células de convección en cada hemisferio:

1. La Zona de convergencia intertropical (ZCIT), es un área comprendida entre el ecuador y los 10° de latitud Norte y Sur. En esta zona ascienden los vientos cálidos (alisios), procedentes de la superficie del hemisferio Norte y del hemisferio Sur. Al ascender se enfrían y producen intensas precipitaciones que ocasionan los grandes bosques ecuatoriales y selvas de Sudamérica, África y Asia.
2. El aire que ha ascendido se desplaza hacia latitudes mayores y desciende en latitudes entre los 20 y 30° , donde genera un cinturón de altas presiones (el anticiclón de las Azores pertenece a este grupo). Son regiones de cielos despejados y vientos suaves (subtropicales). La escasa precipitación de la zona da lugar a los grandes desiertos (Sahara, Kalahari) y a las zonas de mayor salinidad de los océanos (Atlántico Norte).
3. Desde estas zonas de altas presiones subtropicales se generan vientos hacia al EN (vientos del Oeste, contralisios) y el SW (los vientos del Este o alisios que alimentan el ascenso de aire en la ZCIT). Como el aire ha descendido desde la troposfera superior, ha sufrido un calentamiento como consecuencia del aumento de presión; por eso, los vientos procedentes de esta zona son relativamente cálidos.
4. El aire frío y denso de las zonas polares genera un movimiento descendente y altas presiones. Desde las áreas polares se producen vientos divergentes que llevan aire frío hasta las latitudes medias.
5. Las masas de aire que proceden de las zonas polares y de los anticiclones subtropicales se encuentran en las latitudes medias (40° - 70°). La diferencia de t^a es tan grande que se genera un gradiente de t^a y otro de presión especialmente intensos. Esta zona de tránsito se conoce como “frente polar” y a él se asocian buena parte de las lluvias de estas latitudes.
6. El frente polar adopta varias disposiciones según las características de las dos masas de aire. A grandes rasgos se pueden distinguir los siguientes tipos:
 - **Frente frío**: el aire frío invade la zona del aire caliente. La masa de aire frío permanece pegada al suelo y empuja al caliente por encima de él. Se producen nubes de desarrollo vertical y de precipitaciones intensas en zonas poco extensas. Dada la forma del frente, la precipitación se produce tras la llegada de éste, es decir, tras el cambio de t^a del aire.
 - **Frente cálido**: El aire caliente empuja a una masa de aire más frío sin mezclarse, ascendiendo por encima de él como si fuera una rampa. Se producen nubes de tipo “estratos” a los que suceden nubes más bajas, que terminan dando precipitaciones más extensas y menos intensas que en los frentes fríos. La precipitación se produce por delante del frente. Primero llueve y después aumenta la T^a .
 - **Frente ocluido**: Si la masa de aire cálido es alcanzada por otra de aire frío que se desplaza a mayor velocidad, la masa de aire cálido queda atrapada entre dos masas de aire frío. En éste aparecerán los efectos del cálido seguidos de la “tormenta” del frío, a veces con un intervalo estable muy corto entre ambos.

Sobre grandes extensiones de la superficie terrestre se localizan masas de aire que no experimentan cambios de t^a y humedad en sentido horizontal. Se distinguen las siguientes masas:

- **Polar marítima**: fría, húmeda e inestable
- **Polar continental**: estable en invierno (fría y seca); inestable en verano.
- **Tropical marítima**: caliente, húmeda y estable.
- **Tropical continental**: caliente, seca e inestable.

En su traslación, varían sus características en las capas bajas, pero no así en las altas, por lo que su estudio se hace con globos-sonda u otros instrumentos análogos.

Entre los **vientos locales** son dignos de señalar:

El efecto Foehn tiene lugar cuando en la trayectoria de un viento dominante se interpone una cordillera, la masa de aire que se lleva en el lado de barlovento se enfría y el vapor de agua precipita en forma de lluvia. La parte de sotavento se halla en la "sombra pluviométrica" y tiene clima seco (Ej. cordillera cantábrica).

Brisas. Durante el día, la tierra se calienta con más rapidez que el mar y el aire situado sobre la tierra se eleva. Su lugar lo ocupa el aire más frío del mar, creando una brisa de mar. De noche la que se enfría con más rapidez es la tierra, con lo que el aire se eleva en el mar, creando una brisa de tierra. A mayores alturas el sentido se invierte, a menos que otros sistemas de vientos mayores alteren el proceso.

Vientos estacionales. Los monzones son brisas de mar y de tierra a gran escala, activadas por los cambios de t^a anuales, no diarios. Dan lugar a períodos lluviosos y secos en el sur y al este de Asia. El monzón noreste: en invierno se forma un área de alta presión sobre Asia central, desde aquí los vientos secos se abaten sobre el sur de Asia originando un tiempo seco. El **monzón** suroeste: hay un área de bajas presiones sobre las regiones secas del suroeste asiático que hace que los vientos húmedos del Indico y del mar de China soplen sobre la tierra con lluvias abundantes.

11.2.5. Formación de nubosidad y precipitación

Cuando el aire asciende, las capas atmosféricas que atraviesa tienen cada vez menos presión, lo que hace que se expanda. Es un principio físico que un gas que se expande sufre una disminución de t^a , lo que, en el caso del aire en ascenso, conlleva la condensación del vapor de agua en el contenido cuando se alcanza la t^a o **punto de rocío**. Así se originan las nubes, si el contenido en humedad del aire ascendente es suficiente y si el ascenso de éste es capaz de enfriarlo por debajo de la t^a de rocío.

Las **nubes** son una suspensión de pequeñas gotas de agua en el seno de la atmósfera, que se originan y perduran como consecuencia del ascenso del aire cargado de humedad. Las gotitas tienen tendencia a caer por su propio peso, pero las corrientes ascendentes de aire las sustentan e impiden su caída definitiva al volverlas a elevar una y otra vez. En el curso de estos sucesivos ascensos y descensos, unas gotas chocan con otras, aumentan su masa y su volumen pudiendo superar la capacidad de sustentación del aire ascendente, dando lugar a las precipitaciones, que estará formada por gotas tanto más gruesas cuanto más fuertes sean las corrientes ascendentes del aire y su capacidad de sustentación de las mismas. Las gotas de lluvia tienen un diámetro superior a 0.5 mm; si su diámetro es menor se denomina llovizna, pero si es inferior a 100 μ se evapora antes de llegar al suelo.

Los fuertes ascensos bajo cúmulos de varios Km. de altura originan tormentas violentas, con grandes gotas incluso **granizo** si la cima del cúmulo sobrepasa la isoterma de 0 °C. Los pequeños cristales de hielo en suspensión se van agrandando por solidificación de pequeñas gotas de agua transportadas por las corrientes ascendentes, hasta alcanzar el tamaño que las haga caer; en su descenso continúan creciendo. Si el engrosamiento es grande se llega al **pedrisco**; en estos casos, algunos trozos de hielo alcanzan el tamaño de huevos de gallina y hasta 1 Kg de peso.

No existen las llamadas perturbaciones de **nieve**, sino una altitud por encima de la cual, según las estaciones y las masas de aire que entran en juego, la precipitación ya no se hace en forma de lluvia. Cuando cesan las corrientes ascendentes de aire y la nube queda a menos de 0 °C se forman cristallitos de hielo, que se unen entre sí, formando copos de nieve; presentan con frecuencia formas hexagonales, ramificadas y estrelladas.

El punto de rocío puede también alcanzarlo el aire sin sufrir ningún tipo de ascenso, cuando el enfriamiento nocturno del suelo es muy acentuado y se transmite a los niveles más bajos en contacto con él. En este caso se origina el **rocío**, o incluso la **escarcha** si la t^a desciende por debajo de los 0 °C. La cantidad de agua depositada por el rocío es pequeña en climas templados, en comparación con las lluvias, pero en

climas áridos y semiáridos puede igualarla e incluso superarla, por lo que resulta de gran valor para la agricultura.

Cuando ese enfriamiento afecta a un cierto espesor superficial del aire se origina la **niebla**, en tanto que la formación de nubes requiere que el aire ascienda. Las bajas presiones y condiciones de convergencia superficial - y consiguiente ascenso- determinan tiempo nuboso y con posible precipitación. Las altas presiones, divergencia en superficie y descenso del aire sobre el área anticiclónica, corresponde a cielo despejado.

Nubosidad y precipitación frontal.

Se originan, como ya hemos dicho, cuando chocan dos masas de aires de distinta t^a , remontando la más caliente y ligera a la más fría y densa, o bien cuando ésta empuja y desaloja al aire caliente lanzándolo hacia arriba. En el primer caso se habla de frente cálido, y en el segundo de frente frío.

Nubosidad y precipitación de origen orográfico. Ver efecto Föhn.

Nubosidad y precipitación convectivas.

Se llaman así a las que se desarrollan por ascenso vertical directo del aire recalentado por contacto con el suelo, dan lugar a cúmulos que se elevan con rapidez, transformándose en cumuloideos en forma de yunque que desencadenan una **tormenta**.

Las fuertes corrientes ascendentes, bien de naturaleza térmica o producidas por el paso de un frente frío, suelen ir seguidas de tormentas. Las diminutas gotas de agua en circulación dentro de la nube desarrollan distintas cargas eléctricas y se crea una enorme diferencia de voltaje en diversas partes de la nube, hasta que se descargan en forma de **rayo**. Sin embargo, el interior de una nube de tormenta es un medio complejo y aún no se conoce muy bien como se separan las cargas positivas y negativas y cómo se trasladan a distintas partes de la nube. La energía total de una tormenta eléctrica puede ser de la misma magnitud que la de una explosión nuclear.

Un rayo dura aproximadamente 1/1000 de segundo, pero la energía eléctrica de la descarga puede valer cientos de miles de amperios. El **trueno** se produce por el rápido calentamiento y expansión del aire al producirse el rayo, que crea un tremendo aumento de presión.

La gota fría (OPCIONAL)

Es una situación frecuente en España, sobre todo a finales del verano, que no se origina por frente alguno. Se trata de una borrasca de aire frío en altura procedente de la cara norte del frente polar llega hasta los 30°-45° sur, dando lugar a un área de baja presión suspendida en altura y no reconocible en superficie. Al encontrarse repentinamente rodeada de aire más cálido se origina una especie de socavón sobre la tropopausa tropical, que debido a su baja t^a va a tender a descender en espiral hasta alcanzar la superficie, donde dará lugar a otra borrasca. La inestabilidad que ésta provoca originará el ascenso convectivo del aire cálido por su parte central. Si la masa ascendente contiene humedad se formarán nubes de desarrollo vertical que darán lugar a fuertes aguaceros o nevadas.

11.3. La contaminación. Concepto

Es la liberación artificial, en medio ambiente, de sustancias o energía, que causan efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio, directa o indirectamente.

El nº de agentes potencialmente contaminantes es grande y aumenta continuamente. Estos contaminantes incluyen sólidos, líquidos y gases, además de formas de energía tales como radiaciones, calor y ruido.

A la hora de hablar de contaminación la podemos clasificar según el medio donde se manifiesta: **atmosférica**, en las aguas o en el suelo; o según el **área afectada**: Local, mundial (contaminación por DDT) o alejada del foco contaminantes (lluvia ácida).

El **daño o perjuicio** que la contaminación produce sobre los organismos puede ser de distinta gravedad:

Daño agudo. Producido por cortas exposiciones a elevadas concentraciones del contaminante; la respuesta del receptor suele ser instantánea y el daño permanente. La contaminación aguda se circunscribe a áreas limitadas alrededor de las zonas industriales o urbanas.

Daño crónico. Producido por exposiciones prolongadas pero con menor dosis de contaminante. Las respuestas son difíciles de detectar y pueden consistir, por ejemplo, en pérdidas de la productividad vegetal, disminución de la capacidad reproductora u otros aspectos fisiológicos de los seres vivos. Los efectos a largo plazo no son, todavía, bien conocidos (algunos contaminantes manifiestan períodos de latencia que, en el caso de productos químicos o radiactivos cancerígenos o mutagénicos, pueden llegar a alcanzar más de 30 años).

Los efectos de la contaminación pueden ser modificados por la existencia de interacciones y/o factores ambientales, lo que conlleva a la aparición de nuevos contaminantes secundarios, fruto de la reacción entre la sustancia contaminante y elementos del medio.

Entre las **consecuencias globales de la contaminación** del medio se cuentan las de:

- Reducción de la biodiversidad.
- Alteraciones de la estabilidad de los ecosistemas.
- Riesgos para la salud humana.
- Reducción de la capacidad recreativa y del valor estético del medio.
- Daños genéticos potenciales, a largo plazo, sobre el hombre y otros seres vivos.

Los efectos negativos de la contaminación pueden atenuarse llevando a cabo acciones dirigidas a:

- Protección de receptores sensibles
- Tratamiento y disposición adecuada de los residuos.

11.3.1. La contaminación del aire. Atmósfera y contaminación:

La explotación por el hombre de la energía, y la concentración de la población en las ciudades, ha incrementado notablemente el volumen de contaminantes emitidos a la atmósfera. La contaminación del aire se produce principalmente por la combustión de petróleo y de carbón. El aumento de los escapes de humos y venenos aerotransportados es más de lo que puede soportar el sistema de circulación de la atmósfera, y la capacidad de la vegetación para purificar el aire disminuye a medida que la vegetación se ve afectada.

El agravamiento del problema se deriva, no sólo de la cantidad creciente de emisiones sino de su concentración en reducidas áreas geográficas. Las concentraciones de contaminantes en las zonas de emisión pueden ser aminoradas por fenómenos de dispersión. La dispersión de los materiales expulsados depende de variables meteorológicas (ausencia o no de vientos), condiciones de emisión (altura de las chimeneas, temperatura,...).

Podemos agrupar las **principales fuentes de contaminación** en:

- **Fuentes móviles.** Emitidas por los tubos de escape de los vehículos a motor (CO, Hidrocarburos, Gases nitrogenados, etc.).
- **Fuentes fijas.** Incluyen las emisiones resultantes de la combustión de combustibles fósiles (petróleo, carbón) procedentes de focos industriales (centrales térmicas) y domésticos (calefacciones).

Entre los **efectos que puede ocasionar la contaminación del aire** tenemos los siguientes:

Contaminates	Salud	Vegetación	Materiales
Partículas	Irritaciones	Tapan estomas Necrosis y caída de hojas	Abrasión de edificios Deposición sobre los edificios
SO ₂ , SO ₃ , H ₂ S	Irritaciones en mucosas y ojos El H ₂ S malos olores, tóxico	SO ₂ , pérdida de color en las hojas. Clorosis y necrosis	Mal de piedra y corrosión en metales.
Hidrocarburos y	Irritación		

Dioxinas y furanos	Cancerígenos y mutagénicos		
N ₂ O, NO ₂ , NO	NO ₂ produce afecciones respiratorias. Tóxico	NO ₂ impide el crecimiento de algunos vegetales (tomate, judías)	NO ₂ pérdida de color en tejidos.
CO ₂ , CO	CO es tóxico		
Cl ₂ , HCl, HF, CFC	Cl es tóxico. Irritaciones. El FH se acumula en huesos	El FH se acumula en hierbas y pasa al resto de las cadenas tróficas. FH decolora las hojas	
Ozono	Irritación, fatiga y descoordinación.	Manchas blancas en la vegetación	Corroe metales y desintegra caucho

Transporte y distribución de contaminantes.

La gran mayoría de emisiones de contaminantes se producen en la capa de contacto entre la atmósfera y la superficie del planeta. Esta capa de interacción juega un papel crítico en el transporte y distribución de las sustancias añadidas a la atmósfera, tanto de origen natural con antropógenas.

De forma típica, sobre los continentes se produce durante el día una mezcla convectiva de aire, que ayuda a la dispersión de los contaminantes por calentamiento solar de la superficie. Durante la noche, en cambio, se produce una estratificación estable en el aire, por enfriamiento de la superficie, que se extiende unos cientos de metros. La mezcla de contaminantes con el aire limpio es menos efectiva por la noche, y los contaminantes emitidos en las capas estables pueden ser transportados a grandes distancias horizontalmente sin dispersarse verticalmente. Esta situación se puede prolongar durante las primeras horas del día e incluso durante varios días en determinadas condiciones atmosféricas (**inversión térmica**). Estas diferencias diurnas no tienen lugar sobre los océanos.

Como consecuencia del transporte general de los contaminantes en la troposfera, los gases de larga vida atmosférica (N₂O, CH₄, clorofluorometano, clorometano), están bien mezclados y existen pocas diferencias hemisféricas. Los gases con poca permanencia en la troposfera (CO, O₃, SO₂, NO, NO₂, NO₃H, etc.) no se mezclan bien, y sus distribuciones varían vertical y latitudinalmente. Cuanto más corta es la permanencia en la atmósfera, el transporte influye menos en su distribución a escala global.

Dispersión de los contaminantes desde sus fuentes. Factores.

Durante mucho tiempo nos negábamos a aceptar que el problema de la contaminación del aire trascendiera más allá de los centros industriales. Los contaminantes, una vez emitidos, se dispersan al ser arrastrados por los vientos, y se mezclan horizontal y verticalmente debido a procesos de difusión turbulenta y convección.

Los factores que influyen en la dinámica de la dispersión de contaminantes son:

- **Características de las emisiones.** El factor viene determinado por la naturaleza del contaminante (gas o partículas), su concentración y sus características fisicoquímicas (tª de emisión, velocidad de salida). Cuando la tª de emisión de un gas es superior que la del medio el gas asciende. También podemos incluir aquí la altura del foco emisor.
- **Condiciones atmosféricas.** Como ya sabemos las situaciones de borrasca facilitan la dispersión de los contaminantes mientras que los anticiclones la impiden. Entre los factores atmosféricos destacan: tª del aire y sus variaciones con la altura (GVT); los vientos, precipitaciones e insolación (favorece las reacciones entre los precursores de los oxidantes fotoquímicos, aumentando su concentración).
- **Características geográficas y topográficas.** La situación geográfica y el relieve, así como la presencia de vegetales, tienen una influencia en el origen de las brisas, que arrastran los contaminantes o provocan su acumulación. Las zonas industriales y urbanas localizadas en fosas tectónicas (como por ej. la ría de Bilbao, valle del Ruhr en Alemania) son especialmente proclives a inversiones térmicas.

Los contaminantes primarios (iniciales) y secundarios (resultantes de las reacciones químicas) son arrastrados por el viento a mayor o menor distancia de la fuente de origen, hasta que desaparecen de la atmósfera. Esta desaparición puede deberse a depósitos secos o húmedos sobre la superficie (por gravedad, inhalación o absorción en la superficie, lluvia, etc.), o bien por permanencia en la atmósfera transformados en formas inertes.

La concentración de contaminantes desciende conforme nos alejamos de las fuentes de emisión, si éstas están próximas y hay vientos dominantes. Pero, aunque la atmósfera sea capaz de limpiarse de contaminantes, éstos persisten en lugares distintos (suelo, agua, etc.) y su efecto nocivo persiste.

El efecto invernadero.

El aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera puede ser la causa de un cambio climático. Es un gas químicamente estable y persistente que permite el paso de la radiación solar de onda corta hacia la Tierra y detiene, por el contrario, la salida del calor irradiado por la superficie de la Tierra, en medio proporcional a su concentración, produciendo el llamado efecto invernadero, que se traduce en un aumento de t° a ras de suelo.

Desde el comienzo de la revolución industrial, asistimos a un alarmante aumento de la concentración de CO_2 en la atmósfera, el uso de combustibles fósiles contribuye a ello de forma significativa. Hay oscilaciones climáticas de período corto que pueden enmascarar o realzar el efecto invernadero, y cabría interrogarse sobre cuál es la causa y cuál el efecto en el binomio clima- CO_2 .

La incertidumbre sobre el alcance real del problema, y hasta de su propia existencia, no excusa de su consideración, que resulta obligada por dos circunstancias: la irreversibilidad del proceso de crecimiento de la concentración y el carácter global, planetario, de sus posibles efectos.

El mencionado aumento de la t° en las regiones polares podría fundir el hielo de los casquetes y, en consecuencia, el ascenso del nivel del mar que inundaría muchas zonas habitadas. Este aumento de t° afectaría mucho a la vegetación acentuando, en muchas zonas, la aridez y los procesos de desertización. Por otro lado, dado que los bosques fijan CO_2 mediante la fotosíntesis y lo expulsan por la respiración, las áreas deforestadas sólo pueden emitirlo, nunca fijarlo.

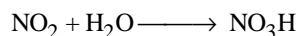
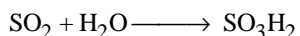
Se puede considerar al CO_2 como un termostato inerte ya que su función termorreguladora es de sobra conocida. Cuando aumenta la t° , se acentúa la evaporación en los océanos, hay mayor formación de nubes y, por tanto llueve más. La lluvia arrastra hacia el suelo cantidades importantes del gas carbónico, lo que provoca una disminución del índice de este gas en la atmósfera y una reducción del efecto invernadero. Como consecuencia se produce un descenso de la t° , de la evaporación y de la pluviosidad. El efecto invernadero se restablece porque los volcanes enriquecen la atmósfera en gas carbónico, con lo que vuelve a aumentar la t° y se restablece el ciclo.

Según los defensores de la **hipótesis Gaia** (James Lovelock), el termostato terrestre presenta notables modificaciones con respecto al modelo geofísico. Cuando aumenta la t° , el plancton se desarrolla más y consume más CO_2 . Como resultado, se debilita el efecto invernadero, bajando la t° . El desarrollo del plancton se ralentiza y paralelamente disminuye su demanda CO_2 . Los seres vivos, que en este modelo juegan el mismo papel que los volcanes en el anterior, continúan su producción de CO_2 por lo que el efecto invernadero se acentúa otra vez. La t° aumenta de nuevo y así se cierra el ciclo.

PRODUCCIÓN ACTUAL DE GASES DE INVERNADERO		
GAS	FUENTE	% DE CALENTAMIENTO
CO_2	combustiones, incendios bosques	20
	centrales térmicas	10
CH_4	estiércol, campos de arroz	15
CFCs	sprays, frigoríficos, embalajes	17
O_3	Automóviles	12
N_2O	descomposición de humos, abono	6

Lluvia ácida.

Las emisiones gaseosas de derivados del S y del N₂, entran en el aire y se convierten, parcialmente, en ácidos que caen al suelo arrastrados por la lluvia y por la nieve, o incluidos en partículas sólidas.



Este efecto se descubrió en 1965. Su efecto depende del pH del suelo (en los suelos ácidos se acentúa el problema)². Dado que los lagos, los árboles y otros seres vivos se ven afectados negativamente, resulta deseable reducir la cantidad que se deposita. En los lagos y embalses prácticamente desaparece todo tipo de vida. Los primeros en desaparecer, al aumentar la acidez, son los moluscos y después los peces. Grandes superficies de terreno y miles de lagos en Escandinavia y Canadá, han sido contaminados. La Selva Negra (Alemania) es una de las más castigadas.

También, en las ciudades, deteriora puentes, monumentos. Sólo en el uso de energías alternativas (eólica, solar, etc.) se puede confiar para evitar este grave problema.

Constituyen, junto con otros procesos contaminantes (emisión de partículas sólidas, líquidas o gaseosas, radiaciones ionizantes, etc.), un caso típico de **contaminación transfronterera**.

A fin de evitar esta crítica situación, 21 países industrializados suscribieron en 1985 un protocolo con el objetivo de haber rebajado, en 1993, sus emisiones de SO₂ un 30 % con respecto a las de 1980. Pero España no lo suscribió ya que ello hubiese supuesto limitar sensiblemente la producción de centrales térmicas españolas. Las de Puertos de García Rodríguez (La Coruña), y la de Andorra (Teruel), emiten un millón de Tm. de SO₂ anuales. Los efectos de la lluvia ácida producida por las emanaciones de la central del Andorra (utiliza el lignito de la zona que posee un alto contenido de azufre), se dejan sentir en los bosques de la comarca castellonense de Els Ports (distante 50 km).

Otra de las consecuencias de la lluvia ácida es el **mal de piedra**, que afecta a monumentos construidos, fundamentalmente, con rocas calizas (Esfinge de Gizé, monumentos atenienses, catedrales, Alhambra), o tienen cemento calcáreo (areniscas del templo de Debod). La actuación de la lluvia ácida produce yeso:



Este yeso se disuelve o, si el monumento está construido cerca del mar, es atacado por el ClNa traído por el viento, produciéndose sulfato sódico, que es muy corrosivo:



Los tratamientos básicos consisten en sanear e impermeabilizar la roca, en general con resinas sintéticas inertes.

El smog o contaminación fotoquímica.

Es un tipo de contaminación atmosférica caracterizada por la formación de nieblas de sustancias agresivas para la salud y el medio ambiente.

La formación de smog es un proceso en el que intervienen factores geográficos y meteorológicos, junto a características propias de los contaminantes emitidos en la atmósfera. Los fenómenos atmosféricos de inversión térmica, estacionales o debidos a peculiaridades geográficas (valles encajonados), impiden la difusión de los humos contaminantes, que pueden provocar la saturación del aire formando nieblas:

Smog ácido. Más frecuente en invierno, se provoca por la aparición de SO₂ y cenizas en el aire procedente, generalmente, de la combustión de carbones y combustibles de elevado contenido en azufre. El proceso de formación de smog ácido se inicia cuando las cenizas y otras partículas en suspensión, sirven como núcleos de condensación de vapor de agua, que junto al SO₂ existente forman aerosoles de ácido sulfúrico.

El smog ácido provoca molestias respiratorias, irritación ocular y afecciones crónicas de pulmón y corazón.

² En los suelos calcáreos (básicos) los ácidos se convierten en sales.

Smog oxidante o fotoquímico. Más frecuente en los meses de verano, cuando la luz y la t^a son más elevadas; se debe a la abundancia de oxidantes fotoquímicos en la atmósfera, se manifiesta en forma de neblina sobre las ciudades. Procede de la concentración de NO_2 y de componentes orgánicos insaturados, provenientes de la combustión incompleta de combustibles líquidos en los motores de explosión, que por acción de los rayos solares reaccionan fotoquímicamente con los componentes del aire produciendo un conjunto de contaminantes (secundarios) de naturaleza oxidante. Típicamente el smog oxidante se compone de: ozono, formol, ácido fórmico, etc.

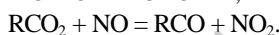
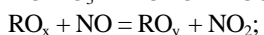
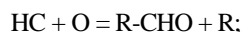
También provocan la irritación de las mucosas oculares, nasales, faringitis, bronquitis, sinusitis, etc. En los vegetales lesionan el parénquima en empalizada, provocando fenómenos de plasmolisis y decoloración. Corroe metales, altera la fachada de los edificios, descompone cauchos y plásticos, etc.

Las reacciones atmosféricas responsables de la producción de los oxidantes fotoquímicos son numerosas, muy complejas y no conocidas en su totalidad.

- **Formación de ozono a partir del ciclo fotolítico de NO_2 .**

$\text{NO}_2 + \text{luz} = \text{NO} + \text{O}$; $\text{O} + \text{O}_2 = \text{O}_3$ Si no están presentes los hidrocarburos, el O_3 reacciona con el NO y da de nuevo NO_2 . No se desequilibra el ciclo y no se acumula O_3 .

- **Formación de radicales libres activos a partir de radicales de hidrocarburos, que producen la oxidación de NO a NO_2 .**



Si existen hidrocarburos (HC), el ciclo fotolítico se desequilibra al reaccionar sus radicales con el NO, oxidándolo y originando los radicales activos. Así aumenta la concentración de ozono, puesto que no participa en la oxidación del NO a NO_2 .

- **Formación de PAN (nitrato de peroxiacetileno).** Los radicales libres reaccionan entre sí, con contaminantes primarios u otros constituyentes del aire, formando una mezcla compleja de oxidantes, entre los que destacan el PAN y los aldehídos.

Paralelamente disminuye la concentración de hidrocarburos (como consecuencia de su participación en el proceso oxidativo) y la de NO y aumenta la de NO_2 . El resultado final es la concentración en la atmósfera de sustancias muy oxidantes (O_3). Este fenómeno va en aumento en ciudades con mucha industria y gran densidad de tráfico.

Contaminación radiactiva.

Los rayos cósmicos también interaccionan con los componentes de la atmósfera, produciendo elementos radiactivos (C^{14} , etc.) que posteriormente, arrastrados por la lluvia, se incorporan a los ríos y océanos. El C^{14} , el Sr^{90} , el Cs^{137} y otros pueden permanecer durante meses en la troposfera y en la estratosfera, en el mismo hemisferio donde se produjeron, depositándose posteriormente.

Contaminación por la minería .

La contaminación del aire puede ser grave y suponer graves riesgos para la salud. Se origina al dividir, triturar o remover suelos, sedimentos y rocas; a partir de escombreras, balsas de sedimentación o detritos de cualquier tipo, por vertidos o escapes de las plantas de tratamiento, talleres, ventilación, vehículos, etc. Desde el siglo XVI se conoce, a pequeña escala, contaminación del aire por actividades mineras en centroeuropa, se daba en distritos mineros donde se procesaban menas de azufre. Los agentes más importantes son:

- **AEROSOLES y POLVO.** Dependen del tipo de materiales y de las técnicas de extracción, en menor medida dependen del clima.
- **GASES**, óxidos de C, N, S, y en ocasiones SH_2 y FH. La quema de combustibles fósiles, como todos sabemos, es generalmente nuestra principal fuente de contaminación del aire. Además de la emisión de sustancias contaminantes como compuestos hidrocarbonados, óxidos de N y de S, la quema de combustibles suelta grandes cantidades de calor en la atmósfera. Como consecuencia de ellos los climas urbanos se ven sustancialmente modificados y pueden producirse importantes efectos planetarios sobre el clima del futuro, dado el progresivo aumento de la cantidad de combustible

quemado. Además, la fusión de menos, en particular las sulfurosas, constituye una importante fuente de contaminación del aire en zonas contiguas a las fundiciones, que puede afectar gravemente a la vegetación y al agua superficial.

La extracción superficial de cualquier recurso mineral, sea ~~mena~~ metálica o carbón, siempre ha sido peligrosa. La inhalación de polvo de carbón o de silicatos pulverizados supone un grave peligro para la salud de los mineros.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se producen en la evaporación de sustancias orgánicas. Los PCB, dioxinas y furanos se forman en el transcurso de reacciones en el tratamiento de productos químicos clorados y en la incineración de residuos que contienen sustancias cloradas. Su proceso de formación no está bien conocido.

La capa de ozono.

La destrucción parcial de la capa de ozono es uno de los últimos problemas derivados de la contaminación atmosférica. Aunque algunos científicos niegan la conveniencia del término agujero de ozono argumentando que lo que se produce es el debilitamiento del O_3 en un nivel de 1 o 2 km. de la capa situada a unos 16 km de altura, y no una desaparición de la ozonósfera, lo cierto es que el nombre es demasiado popular para sustituirlo.

Desde el punto de vista ambiental parece demostrado que la capa de ozono puede disminuir de espesor a causa de:

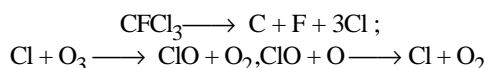
- **El papel de los óxidos de nitrógeno (NO_x).** Éstos se producen en grandes cantidades durante las tormentas. El N_2O liberado junto con los NO_x en las combustiones y procedentes de la desnitrificación de los suelos agrícolas (incrementada actualmente por el uso excesivo de abonos nitrogenados), es un compuesto poco reactivo que puede ascender hasta la estratosfera, donde se transforma en NO_x mediante fotólisis. Su reacción con el ozono es la siguiente: $NO + O_3 = NO_2 + O_2$; $NO_2 + O = NO + O_2$, sumando ambas reacciones tenemos que $O_3 + O = 2 O_2$ (1).

Como podemos ver, los NO_x estratosféricos participan como catalizadores (no se consumen) en la reacción de destrucción del ozono, pudiendo repetirse una y otra vez.

Si estas reacciones fueran las únicas existentes, supondrían una rebaja en los niveles de O_3 ; pero esto no es así, ya que los NO_2 pueden reaccionar de otras múltiples maneras, entre otras con grupos OH para formar NO_3 .

- **Algunos agentes propulsores licuados** (tricloromonofluórometano ó CCl_3F y el diclorofluórometano ó CCl_2F_2). Se les conoce como CFC. Se encuentran en aerosoles y aparatos de refrigeración de aire (gas freón). Estos hidrocarburos halogenados, expulsados a la atmósfera, llegan a la estratosfera donde se descomponen por acción de la radiación UV liberando átomos de cloro. Estos átomos contribuyen a la destrucción del ozono (el Cl libre actúa como catalizador destruyendo al ozono, un átomo de Cl puede destruir 100.000 moléculas de O_3) que, como se sabe, nos protege de la radiación UV (Ver tema 50). Los hidrocarburos halogenados, cuanto menos hidrógeno contengan, más perjudiciales son.

Se han detectado "agujeros en la capa de ozono" (disminución de espesor), tanto en el círculo boreal como austral. Esta mayor pérdida en las inmediaciones de los polos se debe a las bajas t° ($-80^\circ C$), ya que los óxidos de nitrógeno que pueden capturar el Cloro se inactiva al helarse, formando nubes en cuyos cristales de hielo, además, la liberación de cloro de los CFCs se produce con gran eficacia.



La suma de estas dos reacciones nos da que $O_3 + O = 2 O_2$ (2)

Por último puede tener lugar otra reacción mezcla de los procesos (1) y (2), $NO_x + ClO = ClNO_3$. Al formarse nitrato de cloro se protege al ozono de la acción del cloro. Así los NO_2 de la estratosfera desempeñan el importantísimo papel de atrapar al cloro, inactivándolo.

- Las **explosiones nucleares y los reactores de vuelo** a gran altura pueden destruir también la capa de ozono.

La mayor incidencia de la radiación UV puede provocar cánceres de piel y pérdida de la visión. Su efecto sobre el fitoplancton y sobre las cosechas (si la situación llega a latitudes más bajas) se desconoce, aunque son potencialmente graves. Actualmente se desarrolla un gran esfuerzo de investigación para descubrir si algunas disminuciones de productividad (de hasta el 12 %) observadas recientemente en el plancton antártico, así como daños en la flora de Groenlandia, podría tener, como se sospecha, una relación causal con la disminución anual de O₃.

11.3.2. Métodos de determinación y corrección de la contaminación atmosférica.

Los gobiernos de los países más desarrollados van tomando conciencia de la progresiva degradación del medio ambiente, originada por la explotación intensiva de los recursos naturales, el desarrollo tecnológico y la creciente industrialización. Normalmente son los ministerios de Industria o, en su caso, las Consejerías de Industrias de las respectivas comunidades autónomas, los organismos españoles a quienes les están encomendadas la funciones de **prevención, vigilancia y corrección** de la contaminación dentro del ámbito de sus competencias.

Las preocupaciones por estos temas alcanzan dimensiones mundiales. Las distintas administraciones tienen que asumir una posición más activa respecto a estos temas, y con mayor razón en zonas en las que por el grado actual de industrialización aún no se han alcanzado niveles intolerables de degradación medio-ambiental.

Definir el concepto de calidad del aire es difícil y, normalmente corresponde a un conjunto de normas y disposiciones de mayor o menor vinculación desde el punto de vista legislativo, y que definen una frontera más o menos real entre el aire limpio y contaminado. La OMS establece cuatro índices de calidad del aire, según la concentración y exposición al contaminante:

- Nivel I: No se observa ningún efecto
- Nivel II: se producen irritaciones en los órganos de los sentidos, efectos nocivos sobre la vegetación y reducción de la visibilidad.
- Nivel III: Ataque a las funciones fisiológicas vitales, alteraciones que llegan a enfermedades crónicas o a muertes prematuras.
- Nivel IV: Producción de enfermedad aguda y muerte en grupos vulnerables.

Las acciones deben tender a frenar y reducir la contaminación de origen industrial y urbano, sobre todos en los centros urbanos donde existe una promiscuidad de industrias y viviendas, y en zonas donde existe una poderosa industria básica pesada (Cartagena). La mayoría de las comunidades autónomas tienen en funcionamiento, dependiendo de sus respectivas consejerías de Industria, un **Laboratorio de Medio Ambiente Industrial** que tiene como objetivo fundamental el conocimiento directo del estado real de las industrias respecto al medio ambiente. Entre sus competencias destacamos:

- Análisis de los antecedentes de cada industria. Expedientes, iniciativas, reclamaciones, inspecciones, etc.
- Conocimiento de las características técnicas de las instalaciones, desde el punto de vista medio ambiental.
- Toma de muestras de los efluentes gaseosos y/o líquidos en los puntos de emisión de los mismos.
- Determinaciones analíticas de los contaminantes emitidos en cada caso.
- Análisis de resultados y dictamen sobre cada una de las industrias en relación con el cumplimiento de los niveles de emisión que le son aplicables.

La **legislación básica** sobre la contaminación atmosférica española data desde la Ley de Protección del Ambiente Atmosférico del año 1972 y decretos posteriores. Exige la adopción de medidas para reducir los volúmenes de las emisiones, mejorar su dispersión, determina las labores de inspección, obliga a la instalación de aparatos para el control periódico de las emisiones (balance estequiométrico semanales de azufre y halógenos, opacidad), etc. También especifican los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las principales actividades industriales potencialmente contaminadoras de la atmósfera como: Centrales térmicas de fuel-oil, instalaciones de combustión industrial, instalaciones que utilizan fuel-oil, Metalurgia no férrea (sobre todo la del plomo), industria de Zinc, refinerías de petróleo, fabricación de cal, fábricas de cementos, cerámica, vidrio y fibras minerales, plantas de aglomerados asfálticos, fábricas de ácido sulfúrico y nítrico, fábricas de fertilizantes, y otras.

Algunos documentos legales:

- Declaración de Principios de la ONU sobre la lucha contra la contaminación del aire.
- Convenio de Ginebra sobre contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia.
- Carta Europea del patrimonio arquitectónico.
- Convenio Internacional de Viena sobre protección de la capa de O₃.
- Protocolo de Montreal sobre eliminación de las sustancias que destruyen el O₃.
- La Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en Río de Janeiro (Brasil), en la que se aprobaron el convenio sobre cambio climático y el programa 21, sobre la contaminación atmosférica.
- La UE ha propuesto el pago de ecotasa, o impuestos sobre la emisión de determinados contaminantes, y tratar de fijar unos límites en las emisiones de CO₂ permitidas a cada país, con el fin de reducir las emisiones para el año 2000 a los niveles de 1990.
- En la convección sobre el cambio climático, celebrado en Kioto en diciembre de 1997, se aprobó un protocolo de mínimos en el que se prevé que los 39 países más desarrollados reducirán en una media del 5,2 % sus emisiones de gases de efecto invernadero antes del 2010. Este pacto se aleja de los deseos de la U.E., ya que su propuesta fue del 15 %.

Salvo excepciones, la pauta de acción de los gobiernos es firmar cualquier convenio siempre que no perjudique sus intereses económicos. Los países más desarrollados han sido siempre los más renuentes a firmar convenios que contengan limitaciones a la explotación.

La legislación española se ha ido cargando de coletillas medioambientales ineficaces e incluso contradictorias. Y aunque el delito ecológico ha sido incorporado al nuevo código penal, redactado hace nueve años, sólo ha producido hasta hoy 15 sentencias condenatorias (el 90 % de los juicios son sobreseídos por falta de pruebas). Urge una Ley general del Medio Ambiente.

Respuestas tecnológicas

Vigilancia de la calidad del aire.

Se entiende por vigilancia el conjunto de sistemas y de procedimientos utilizados para evaluar la presencia de agentes contaminantes en la atmósfera, así como la evolución de sus concentraciones en el tiempo y en el espacio, para prevenir y reducir sus efectos. Dicha vigilancia se puede llevar a cabo por:

- Redes locales (urbanas)
- Redes comunitarias: mediante programas específicos de vigilancia de contaminación transfronteriza (ej. Programa EMEP), que tiene en funcionamiento una red de estaciones para detectar contaminantes en toda la UE (en España hay seis de esas estaciones).
- Redes mundiales, elaborando programas de ámbito mundial como la red BAPMON, que se encarga del análisis y evolución de los datos sobre los gases invernadero o el estudio de la disminución de la capa de ozono.

Medidas de prevención

Van encaminadas a evitar la aparición de problemas, son:

- La planificación de usos del suelo, que mediante planes de ordenación del territorio contemplen lugares idóneos para establecer industrias, de forma que sus efectos sobre las poblaciones, vegetación, animales y materiales sean menores.
- La evaluación de impacto ambiental, que son estudios previos de las alteraciones que sobre el medio ambiente en general y sobre la atmósfera en particular van a provocar la realización de determinadas acciones, proyectos, etc., con el fin de establecer medidas correctoras que mitiguen los impactos antes de llevarse a cabo.
- El empleo de tecnologías de baja o nula emisión de residuos. Basadas en el desarrollo de procesos que traten de evitar la contaminación de origen.

Medidas correctoras. Ejemplo de algunos medios técnicos.(OPCIONAL)

La contaminación del aire puede reducirse o bien captando los gases contaminantes en su punto de emisión, o bien modificando el proceso industrial, convirtiendo los productos peligrosos en otros menos perjudiciales. El primer tipo de control es efectivo contra las partículas sólidas, que pueden ser retenidas en **filtros**, un sistema barato y cuya eficiencia alcanza el 99'9 % sin embargo, los filtros suelen estar fabricados por materiales combustibles, por lo que no se pueden aplicar a chimeneas.

En este caso se emplean precipitadores electrostáticos, que cargan las partículas con alto voltaje para atraerlas a unas placas cargadas. La eficacia de estas **trampas electrostáticas** es elevada (entre 98 al 99'5 %) pero también lo es su coste, que sólo permite su uso en centrales térmicas. A veces se usan trampas electrostáticas húmedas, en las que el aire contaminado pasa a través de una niebla de agua, que no sólo capta mejor las partículas sólidas, sino que también disuelve algunos gases. Hay trampas electrostáticas húmedas con una solución limpiadora de cal (CaO) o caliza (CaCO₃) que reaccionan con los gases de S y por ello es la mejor solución en chimeneas de centrales térmicas, aunque genera residuos líquidos contaminados.

Los gases de los automóviles contienen CO y diversos hidrocarburos. Para limitar su volumen, muchos fabricantes incorporan a sus modelos **convertidores catalíticos**, en los que un catalizador (de platino o metal similar) mejora la combustión de estos gases transformándolos en CO₂ y agua. Estos convertidores, por desgracia, también oxidan las trazas de azufre y nitrógeno de la gasolina, produciendo los correspondientes óxidos.

La **incertidumbre** que reina sobre la existencia y **dimensiones del efecto invernadero**, no contribuye en que, en este momento, se tomen medidas para solucionarlo; medidas que no parecen fueran otras que el establecimiento de restricciones en el consumo de combustibles fósiles. La repoblación forestal, que consumiría grandes cantidades de CO₂ contribuiría también a paliar el problema. Por otra parte, ya se han dado desde que el hombre existe grandes cambios climáticos, glaciaciones y épocas más cálidas que la actual; quizás la humanidad venidera tenga que aprestarse a convivir con una atmósfera de mayores tª y contenido en CO₂.

La **reducción de la lluvia ácida**. Reducir cantidades de derivados del S y del N lanzadas a la atmósfera, se puede conseguir obligando a las fuentes emisoras a instalar los filtros oportunos. Se pretexto el elevado coste que supondría estas instalaciones (100.000 millones de dólares sólo en E.E. U.U. de América hasta final de siglo). La actividad humana hace que la concentración de estos derivados sea de 5 a 20 veces mayor que las concentraciones naturales.

Hasta hace poco tiempo no se han dispuesto de técnicas fiables para medir la acidez del agua de lluvia y, si se habla de tendencias a largo plazo, parece que desciende ligeramente. Pero aumente o no, si que aumenta la presión política para reducirla. Es necesario conocer bien los mecanismos que producen la lluvia ácida, y disponer de estudios empíricos que muestren la relación entre emisión de contaminantes en un punto y depósitos de ácidos en otro.

En España, el Plan Energético Nacional 1991-2000 prevé una reducción de un 30 % en emisiones de SO₂ tomando como base las emisiones de 1980.

El **Smog oxidante** es un fenómeno de contaminación típicamente urbano, que tan sólo se puede evitar con la regulación de la emisión de sustancias que lo provocan.

Para evitar la reducción de la capa de ozono, lo más aconsejable es sustituir a los propulsores licuados halogenados por otros.

A nivel técnico, las medidas a tomar para atenuar los procesos de **contaminación transfrontera** serían:

- Fomento de investigación sobre metodologías industriales no contaminantes, así como el desarrollo de los canales de información entre organismos competentes en temas medio-ambientales.
- Homogeneización de los criterios técnicos referentes a la contaminación ambiental en las diferentes naciones (umbrales de contaminación, métodos de determinación).
- Confección conjunta de proyectos de depuración del medio en las zonas afectadas y de ordenación del territorio en zonas fronterizas.
- Obligación de informar sobre la implantación de actividades que puedan provocar contaminación transfrontera.

- e) Estudio sobre evaluación de daños ecológicos de proyectos industriales que produzcan contaminación transfronteriza.

OPCIONAL: El fenómeno de “El Niño”

“El Niño” es el nombre que recibe la corriente cálida que aparece por Navidad en las costas peruanas. A escala local, esta corriente frena el aporte de nutrientes y, en consecuencia, produce una disminución de la pesca en estas zonas. Sin embargo, algunos años se producen episodios especialmente intensos de este fenómeno, con la llegada de aguas anormalmente cálidas y con una duración extrema. Sólo se habla de El Niño cuando se producen estos episodios extremos, excluyéndose el calentamiento anual (entre uno y dos °C) que periódicamente aparece en las costas americanas del Pacífico.

La causa del Niño se explica analizando la dinámica atmosférica en las costas pacíficas. El Sol calienta las zonas ecuatoriales, por lo que el aire tiende a elevarse y a ser reemplazado por el aire de las zonas anticiclónicas. El efecto Coriolis, que desvía estos flujos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur, hace que en ambos casos exista un flujo de aire hacia el ecuador y hacia el oeste.

Por otra parte, en el océano el viento empuja al agua superficial hacia el oeste, provocando que el nivel del mar en Indonesia esté unos 50 cm más alto que en las zonas sudamericanas. Este desplazamiento del agua superficial en las zonas americanas debe ser compensado con un afloramiento de agua de las profundidades que es muy rica en nutrientes y favorece el desarrollo de importantes bancos pesqueros.

En Indonesia, los vientos alisios convergen con los vientos del Oeste, provocando el ascenso del aire (borrascas) y desencadenando importantes precipitaciones. En altura el aire se mueve hacia el Este y desciende en el Pacífico central y oriental, donde el tiempo es seco.

Normalmente, la presión en la costa americana es superior a la de Indonesia, pero cuando esta tendencia se invierte, los vientos alisios cerca de la costa americana producen el efecto contrario, generando incendios forestales y tiempo seco en Indonesia y Australia, y lluvias torrenciales en Ecuador y Perú. La elevada t^a del agua del mar en las costas centroamericanas provoca la aparición de huracanes. Este tipo de fenómenos anómalos son impredecibles, pero acostumbran a tener la duración de un año y se repiten, de forma irregular, cada tres u ocho años.

Los periodos con anomalías térmicas positivas en la costa oeste americana (años de El Niño) tienden a alternarse con años anormalmente fríos, (La Niña), que producen también notables efectos catastróficos. La Niña constituye la contrapartida de El Niño, el otro extremo de la oscilación en el que se producen inundaciones excepcionales en las costas asiáticas y sequías extremas en las costas americanas.