

---

# EL OZONO ATMOSFÉRICO, ¿BENEFactor O MALHECHOR?

---

Joan Josep Solaz Portolés  
Depto. de Didáctica de les Ciències  
Universitat de València  
València - España

## Resumen

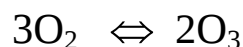
*En este trabajo se analiza la presencia del gas ozono en la estratosfera y en la troposfera, la acción de determinados agentes contaminantes que alteran su equilibrio natural y las consecuencias que esto último comporta. Finalmente, se apuntan posibles acciones individuales que pueden ayudar a restablecer las proporciones adecuadas de ozono en las distintas capas atmosféricas.*

## I. El ozono

Cuando se produce una descarga eléctrica en una atmósfera de oxígeno o de aire, aparece un olor característico debido a la formación de una nueva sustancia: el ozono. Se puede producir ozono a partir de oxígeno perfectamente seco y puro, en consecuencia, en su constitución sólo interviene el oxígeno, lo que implica que el ozono es una variedad alotrópica del oxígeno.

En condiciones ordinarias el ozono es gaseoso y se puede separar del oxígeno mediante una disminución de la temperatura del sistema a unos  $-112\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que produce una condensación del ozono en forma de un líquido de color azul. El ozono es más soluble en agua que el oxígeno (49 volúmenes de ozono se disuelven en 100 volúmenes de agua a una temperatura de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y es tóxico (la concentración máxima admisible en el aire es del 10-5 %, incluso a esta concentración su olor es bien perceptible). La molécula de ozono es diamagnética, angular y polar. Su ángulo de enlace es de  $117^{\circ}$ , su momento dipolar es de  $1,7 \cdot 10^{-30}\text{ C}\cdot\text{m}$  y la distancia interatómica de  $0,128\text{ nm}$ .

La formación del ozono ( $\text{O}_3$ ) a partir del oxígeno ( $\text{O}_2$ ) puede representarse mediante la ecuación:



y la entalpía estándar de formación del ozono es de  $142,5\text{ kJ/mol}$ . La variación de la energía libre de Gibbs estándar de esta reacción es positiva ( $163\text{ kJ/mol}$ ), y por tanto, la

transformación de oxígeno en ozono no se produce espontáneamente en condiciones estándar (25 °C y 1 atm) y requiere un aporte energético. En cambio, la descomposición del ozono en oxígeno sí que es espontánea o, dicho de otro modo, el ozono es una sustancia inestable.

El ozono es uno de los oxidantes más enérgicos conocidos. Oxida a todos los metales, excepción hecha del oro y de los del grupo del platino, así como la mayoría de los no metales. En la mayoría de las reacciones de oxidación el ozono pierde uno de sus átomos de oxígeno y se transforma en oxígeno molecular. Es posible sacar partido de su poder oxidante sobre bacterias y virus, utilizándolo en la desinfección del agua y del aire.

Las disoluciones de yoduro de potasio liberan yodo en presencia de ozono:



Esta reacción puede ser utilizada para la determinación de ozono, aunque hay que tener en cuenta que otros oxidantes presentes en la atmósfera también reaccionan del mismo modo. Un papel almidonado e impregnado con una disolución de yoduro potásico, se torna azul en presencia de ozono.

## II. El ozono como componente natural de la atmósfera

### II.1. Ozono estratosférico

La mayor parte del ozono se forma y se encuentra en la estratosfera, a una altura entre 12 y 40 km sobre la superficie terrestre. Aunque a esta altura la atmósfera es poco densa, la estratosfera contiene una capa de ozono de billones de toneladas.

El ozono se genera por la acción de la radiación ultravioleta solar de longitudes de onda menores de 242 nm sobre las moléculas de oxígeno, que se descomponen en átomos:



El oxígeno atómico se recombina con el molecular en presencia de una tercera molécula M, necesaria para disipar la energía liberada en la reacción, que suele ser O<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>:



Por otra parte, el ozono se descompone de manera natural también por la radiación solar (ultravioleta de 200-310 nm, y en mucho menor grado la infrarroja) en átomos y moléculas de oxígeno:



El oxígeno atómico resultante de esta reacción podría nuevamente generar ozono, de acuerdo con la reacción (2). Por consiguiente, lo más relevante de la reacción

(3) es la absorción en la franja ultravioleta 200-310 nm, protegiendo a los seres vivos de los dañinos efectos de esta radiación sobre la superficie terrestre.

Asimismo, en la estratosfera los átomos de oxígeno pueden combinarse con otras moléculas de ozono para dar moléculas de oxígeno:



El conjunto de reacciones de la (1) a la (4) constituye el denominado *ciclo de Chapman* (Chapman explicó en 1930 la presencia de la capa de ozono en la estratosfera mediante estas reacciones). Cada día 300 millones de toneladas de ozono son creadas y destruidas por estos procesos. El balance del ciclo es positivo para la creación de ozono en aquellas zonas de la Tierra donde se tiene mayor irradiación solar, a saber, en el ecuador. La circulación estratosférica conduce al ozono hasta los polos, en donde, debido a la menor temperatura y densidad del aire, este gas incrementa su concentración. En relación con la estación, en verano aumenta la concentración de ozono respecto del invierno. Así, se ha observado que la concentración de ozono puede variar entre un 25% y un 35% del invierno al verano. Por último, la concentración de ozono es menor durante la noche. En definitiva, la concentración de la capa de ozono varía ampliamente con la hora del día, estación del año, latitud terrestre y flujo luminoso solar.

## II.2. Ozono troposférico

Una parte del ozono de la estratosfera es transportado hacia la troposfera, llegando de este modo hasta las capas de aire próximas al suelo. También los procesos naturales en la biosfera producen la formación de ozono, a partir de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. La biomasa desprende óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, además los primeros se originan en las tormentas con aparato eléctrico y los últimos en volcanes y fermentaciones. La mayor fuente de ozono en la troposfera es el dióxido de nitrógeno. Cuando sobre este gas incide la luz solar puede producirse la fotodisociación:



La máxima longitud de onda para este proceso se encuentra alrededor de los 391 nm, esto es, en la región UV-A (ultravioleta-A). A continuación, los átomos de oxígeno reaccionan con moléculas de oxígeno, para producir ozono:



El ciclo se completa en el momento que el ozono reacciona con el óxido nítrico, para producir dióxido de nitrógeno y oxígeno molecular:



La presencia adicional de hidrocarburos, aldehídos y monóxido de carbono puede alterar el ciclo constituido por las reacciones (5), (6) y (7). Así, los hidrocarburos (en presencia de radicales hidroxilo  $\text{OH}\cdot$  que se hallan en la troposfera) rompen el ciclo participando en reacciones que posibilitan que el óxido nítrico se transforme en dióxido de nitrógeno sin consumir ozono. De este modo, el ciclo se desequilibra y el monóxido de nitrógeno se convierte en dióxido a mayor velocidad de la que se fotodisocia el dióxido. El resultado final es el aumento de la concentración de ozono troposférico. La posible secuencia de reacciones en las que un hidrocarburo, por ejemplo un alqueno  $\text{RHC=CHR}$ , transforma el monóxido de nitrógeno en dióxido es larga y complicada. No obstante esto, la reacción global correspondiente al conjunto de reacciones podría escribirse:



donde  $\text{RO}\cdot$  es un radical alcoxi.

De hecho, no todos los hidrocarburos poseen la misma capacidad de oxidación del NO en  $\text{NO}_2$ . Los más activos son los alquenos, seguidos por los aromáticos y los alcanos. El acetileno es prácticamente inactivo.

Con todo, hemos de indicar que la misma biosfera desempeña un papel fundamental en el balance global de la composición de gases atmosféricos. Esto es así, por su capacidad de retención del ozono y de los óxidos de nitrógeno.

Todas las reacciones químicas aparecidas en este apartado son una simplificación de las que realmente participan en la fisicoquímica atmosférica del ozono. En la actualidad, se utilizan modelos que mediante un gran número de reacciones, más de doscientas, consiguen simular los procesos reales del ozono en la atmósfera.

### III. Alteración de la concentración del ozono atmosférico

#### III.1. Alteración del ozono estratosférico

A comienzos de los años cincuenta la exploración espacial permitió medir con precisión el espectro solar en la estratosfera y, especialmente, las intensidades de radiación en el ultravioleta que, al quedar absorbidas, no podían medirse desde la superficie terrestre. Estas experiencias dieron como resultado concentraciones de ozono inferiores a las predichas mediante cálculos teóricos a partir de las ecuaciones del *ciclo de Chapman*. En concreto, la teoría anunciaba una cantidad de ozono en la estratosfera dos veces superior a la encontrada experimentalmente. Se concluyó que debían existir otros procesos, aparte de la reacción (4) del *ciclo de Chapman*, que provocasen la destrucción del ozono y que eran responsables del mantenimiento de su equilibrio

atmosférico. De este modo, se supuso la existencia de ciertas reacciones en forma de ciclos catalíticos que podían destruir ozono. En concreto:



con un balance neto de:



donde X representa una especie química catalizadora de la descomposición del ozono y, como veremos a continuación, puede ser un átomo de hidrógeno, un radical hidroxilo (OH<sup>·</sup>), una molécula de óxido nítrico (NO), un átomo de cloro o un átomo de bromo, siendo especialmente activos en la descomposición los tres últimos. Como puede observarse, X se recupera al final del ciclo, en consecuencia, un solo átomo o molécula de X puede, en principio, eliminar multitud de moléculas de ozono. No obstante esto, los diferentes ciclos pueden interferir entre sí, interrumpiendo la cadena de reacciones y provocando la conversión química de las especies catalizadoras en otras sustancias inactivas para el ozono, como por ejemplo, el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) o el cloruro de hidrógeno (HCl). El origen de X puede ser natural o antropogénico, y es precisamente el aumento de las emisiones de las distintas especies X lo que supone una verdadera amenaza para la capa de ozono.

En primer lugar, se pensó que las especies causantes de la destrucción eran radicales con hidrógeno (H<sup>·</sup>, OH<sup>·</sup>, HO<sub>2</sub><sup>·</sup>), Estas especies se forman como resultado de la fotodisociación del vapor de agua y del metano. Sin embargo, se comprobó que su contribución a la eliminación del ozono era realmente baja.

En los años setenta algunos trabajos de investigación sugirieron que los óxidos de nitrógeno también podían provocar reacciones catalíticas que descompusiesen ozono. Se determinó que los óxidos de nitrógeno podían ser los responsables de la destrucción de un 70% del ozono estratosférico, por lo que un aumento en su concentración podría desplazar el equilibrio con consecuencias catastróficas. Precisamente, en esos momentos se anunció la construcción de aviones supersónicos capaces de realizar vuelos en la estratosfera. Los científicos, atendiendo a que en los procesos de combustión a elevada temperatura que tienen lugar en la turbina del motor del avión se forman óxidos de nitrógeno, alertaron del potencial peligro de estos aviones supersónicos. Investigaciones posteriores mostraron que los efectos de la emisión de los óxidos de nitrógeno dependían de la altura de vuelo. Así, las emisiones a 20 km de altura podrían reducir la capa de ozono, pero a 10 km parecía que incrementaban la concentración de ozono.

En la década de los ochenta las determinaciones cuantitativas de ozono revelaron que la concentración de ozono estratosférico en la Antártida había disminuido considerablemente. Esto es lo que se ha venido a llamar *agujero de ozono*. Este fenómeno ocurre en la primavera austral a nivel del vórtice polar. Esta disminución es

tan intensa y variable que un día a otro puede fluctuar hasta en un 90%. En el Ártico también se ha observado una fisicoquímica de la estratosfera anómala, especialmente en invierno, apuntando hacia una pérdida apreciable de gas ozono.

Los trabajos experimentales y los modelos matemáticos desarrollados en los últimos años, ponen en evidencia que la pérdida de ozono se debe en una gran medida a la presencia de átomos de cloro y de bromo libres en la estratosfera. Ambos se originan en la estratosfera por fotólisis de compuestos procedentes de la troposfera, bien de manera natural -la menor parte-, bien como consecuencia de actividades humanas. Entre estos últimos destacan los clorofluorocarbonos (CFC o freones), los halones (compuestos bromados), el tetracloruro de carbono, el tricloroetano y el bromometano. Debido a su gran estabilidad, estos compuestos ascienden sin ninguna modificación a través de la troposfera hasta la parte superior de la estratosfera, en donde, por acción de la luz UV de longitud de onda entre 190 y 220 nm, liberan sus halógenos, en forma de átomos (radicales)  $X^{\cdot}$ .

Los CFC constituyen un grupo de compuestos orgánicos de bajo peso molecular de cadena abierta (alifáticos) o cerrados en forma de anillos (alíclicos), cuyos hidrógenos han sido reemplazados en alta proporción por los halógenos cloro y flúor. Los halones tienen las mismas características, pero incorporan como halógeno al bromo. Tanto los halones como los CFC son virtualmente inertes en la troposfera y tienen un bajo nivel de toxicidad para los organismos vivos.

Los CFC más utilizados son el diclorodifluorometano o CFC-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) y el triclorofluorometano o CFC-11 ( $\text{CFCl}_3$ ). Se emplean como refrigerantes, propelentes de pulverizadores, disolventes y espumantes. El uso fundamental de los halones se encuentra en la extinción de incendios con llamas. En concreto, los halones de mayor interés son  $\text{CF}_3\text{Br}$ ,  $\text{CClF}_2\text{Br}$  y  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ .

En el año 1985 en el científico J.C. Farman y sus colaboradores pusieron en evidencia que las pérdidas estacionales de ozono sobre el Polo Sur no eran justificables de acuerdo con los modelos (ciclos catalíticos) planteados hasta el momento. No obstante, se ha de señalar que la disminución del ozono estratosférico no sólo tiene lugar en las zonas polares. Los datos tomados del satélite de investigación atmosférica Nimbus-7 muestran que la disminución global es mucho más fuerte que la esperada por los cálculos teóricos.

Hay pruebas bastante evidentes de que dos características de la meteorología polar desempeñan un importante papel en la destrucción del ozono. En primer lugar, las bajas temperaturas conducen a la formación de nubes estratosféricas, sobre cuyas superficies sólidas pueden tener lugar determinadas reacciones químicas heterogéneas que convierten algunas sustancias *inactivas* en la eliminación de ozono en *activas*. Así, por ejemplo, se pueden convertir los compuestos *inactivos*  $\text{HCl}$  y  $\text{ClONO}_2$  en los *activos*  $\text{Cl}_2$  y  $\text{HOCl}$ . En segundo lugar, la dinámica de la atmósfera polar posibilita que en algunos días de septiembre se haya llegado a medir una disminución diaria de hasta un 10 % de ozono dentro de una superficie de unos tres millones de kilómetros cuadrados. Parece que ningún proceso químico puede explicar

una disminución tan repentina y espectacular. Sólo puede hacerlo el movimiento atmosférico: un aire pobre en ozono procedente de la baja estratosfera que haya penetrado en el interior de la susodicha superficie.

### **III.2. Alteración del ozono troposférico**

Existen datos de cierta fiabilidad que nos indican que hace cien años la concentración media anual de ozono en la troposfera era de unas 10 ppbv (partes por billon, en volumen) y su máximo se alcanzaba en la primavera. En la actualidad, la concentración media anual de ozono se ha más que duplicado, incluso en las zonas rurales, y el máximo aparece en verano. Todo ello no puede sino ser interpretado como una perturbación humana del balance del ozono troposférico.

Contrariamente a su efecto protector sobre la vida cuando se halla en la estratosfera, en la troposfera el ozono actúa como un tóxico dañino para vegetales y animales. Por otra parte, el ozono troposférico absorbe muy eficazmente la radiación infrarroja (en la banda comprendida entre los ocho y diez micrómetros), de modo que contribuye, junto al dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano, al efecto invernadero. Esto es, las variaciones de ozono en esta capa atmosférica pueden alterar las condiciones climáticas sobre la Tierra.

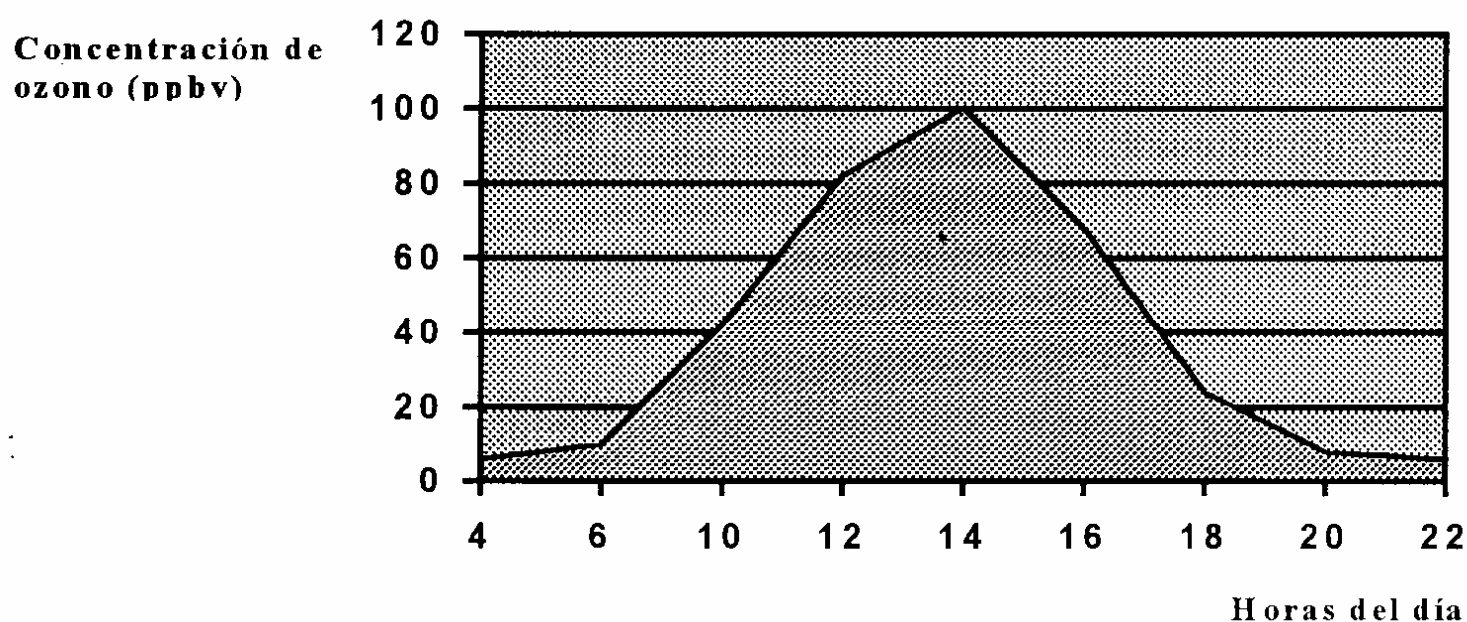
Parece bastante claro que la causa del incremento del ozono troposférico está en el aumento de la emisión de gases precursores, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, liberados en los procesos de combustión de los vehículos, sistemas de calefacción, industrias y centrales de producción energética. De las ingentes cantidades de óxidos de nitrógeno emitidos da cuenta el enorme incremento de nitratos observado en el hielo de Groenlandia en las últimas décadas. Asimismo, la evaporación de disolventes, de combustibles y la combustión incompleta de todo tipo de materiales fósiles producen una amplio abanico de hidrocarburos que se liberan a la atmósfera. Los procesos mediante los cuales se libera ozono a partir de hidrocarburos y dióxido de nitrógeno ya han sido analizados en un apartado anterior.

Los gases precursores del ozono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, se producen principalmente en zonas urbanas e industriales. Cuando hay suficiente viento estos gases se dispersan con rapidez. Pero en días claros, calurosos y sin viento se incrementan los ciclos fotolíticos que dan lugar a la formación de ozono y otros contaminantes fotoquímicos igualmente peligrosos. En esos días, los niveles troposféricos de ozono tienen su origen más importante en las fuentes móviles (vehículos), más que en las estáticas o industriales. Sin embargo, los niveles más elevados de contaminación por ozono no se dan en los focos de contaminación sino en áreas suburbanas y rurales. En concreto, se observan mayores valores de ozono en las zonas a sotavento de los núcleos de emisión.

Se ha descubierto que el gas ozono puede sintetizarse también en los bosques de coníferas próximos a núcleos urbanos. Estos árboles producen hidrocarburos volátiles capaces de reaccionar con los óxidos de nitrógeno transportados

hasta allí desde las ciudades por el viento. También se ha constatado que las selvas tropicales desprenden hidrocarburos, el más importante de los cuales es el isopreno ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$ ), un alqueno con gran capacidad de formación de radical libre peróxido. Este radical cuando reacciona con el óxido de nitrógeno (NO) genera dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), con el consiguiente aumento del nivel de ozono, según nos indican las ecuaciones (5) y (6). Además, las transformaciones biológicas y químicas de los compuestos nitrogenados de los suelos conducen a la formación de óxidos de nitrógeno. Diversos estudios efectuados han dado como resultado que la introducción de abonos nitrogenados aumenta los flujos de óxidos de nitrógeno entre cinco y ciento cincuenta veces.

En la Fig. 1 se representa la concentración de ozono, expresada en partes por billón en volumen, en una gran ciudad a lo largo de un día claro, caluroso y sin viento.



*Fig.1: Concentración de ozono, expresada en partes por billón en volumen, en una gran ciudad a lo largo de un día claro, caluroso y sin viento.*

La producción de ozono cesa durante la noche, debido a la ausencia de radiación solar, disminuyendo la cantidad de ozono por deposición en el suelo o en la vegetación, o por su destrucción mediante reacciones químicas. A este respecto cabe recordar que la biosfera desempeña un importante papel, pues además de absorber el gas carbónico, retiene a los óxidos de nitrógeno y al ozono que se deposita sobre la vegetación.

## IV. Consecuencias de la alteración del ozono atmosférico

### IV.1. Consecuencias de la reducción del ozono estratosférico

Una ligera disminución del contenido de ozono en la estratosfera conduciría principalmente a un aumento de la intensidad de la radiación ultravioleta de longitudes comprendidas entre los 280 y 320 nm. En pequeñas dosis, dicha radiación produce ligeras quemaduras, pero las exposiciones prolongadas, durante años, pueden producir cáncer de piel. Así, por ejemplo, y dejando de lado la posible incidencia del factor genético, los factores medioambientales hacen que en Australia se tenga mayor porcentaje de cánceres de piel que en la Gran Bretaña, lo que ha conducido a sus autoridades sanitarias a realizar campañas de prevención entre la población. En el cartel de dicha campaña reza el siguiente lema: *Between eleven and three, slip under a tree*.

Asimismo, pueden empeorar algunas enfermedades oculares. El exceso de radiación ultravioleta es causa de cataratas, enfermedad que provoca ceguera en 12 millones de personas en todo el mundo y que debilita la visión de otros 18 millones.

El aumento de la radiación ultravioleta altera las macromoléculas orgánicas como el ADN, con posibles efectos mutágenos, e inhibe el sistema inmunitario del hombre y de los animales, por lo que los cánceres pueden establecerse y extenderse con mayor facilidad, y se incrementa la predisposición a contraer herpes, hepatitis y otras infecciones.

En un estudio reciente, dos tercios de 200 plantas sometidas a crecientes radiaciones ultravioleta-B (UV-B) mostraron algún tipo de sensibilidad hacia las mismas. En concreto, la semilla de soja sufre una disminución de un 25 % en su productividad cuando la UV-B aumenta en un 25%. Esto es, la calidad y cantidad de las cosechas pueden reducirse ostensiblemente.

En los océanos pueden producirse cambios en los ecosistemas marinos. El fitoplancton, minúsculos organismos flotantes que están en la base de la cadena alimenticia, también se ve afectado por el incremento de las radiaciones ultravioleta. Del mismo modo, se las larvas de algunos peces también sufren sus efectos. No puede obviarse que la luz ultravioleta penetra en ciertos casos hasta unos 20 metros de profundidad.

Los materiales, especialmente los polímeros, también padecen las consecuencias de una mayor intensidad de luz ultravioleta: se degradan con mayor rapidez.

En otro orden de cosas, la reducción de la capa de ozono puede tener efectos en el cambio climático, pues el proceso de absorción de radiación UV desempeña un papel clave dentro del balance energético de la atmósfera. Esto es así, por su capacidad de transformación de energía solar (luminosa) en energía mecánica y térmica (movimientos de masas de aire caliente y frío), además de contribuir al inicio de las reacciones (ciclos) fotoquímicas. En definitiva, la disminución de la capa de ozono

en la estratosfera probablemente va acompañada de modificaciones en el sistema climático que hacen más complicado el trabajo de predicción de los meteorólogos.

## IV.2. Consecuencias del aumento del ozono troposférico

Bajo concentraciones altas de ozono se observan daños en las hojas viejas de árboles y cultivos, un daño que se manifiesta por aumentos de la fluorescencia, respiración y estrés hídrico, y por menores concentraciones de pigmentos fotosintéticos, nitrógeno, azufre y otros nutrientes. La disminución de la clorofila coincide con la clorosis, enfermedad que se observa en muchas de estas plantas y árboles. Por otra parte, la disminución de nitrógeno provoca una reducción de la síntesis proteica.

No es de extrañar, por tanto, que en 1994 se comprobase que los agricultores de regiones próximas a París sufrían pérdidas de hasta un 20% de la cosecha de trigo por culpa del ozono; y que poco después se implicase a esta misma molécula en la defoliación de los bosques de pinos del sur de Francia y del norte de Italia. También se ha constatado por el ASPA (*Association pour la Surveillance et l'étude de la Pollution atmosphérique en l'Alsace*) que en el bosque de los Vosgos el ozono es el contaminante atmosférico más perturbador para las piceas.

Parece que el ozono deteriora las membranas celulares y las cutículas de cera, así como las otras membranas, las mitocondriales y las de los cloroplastos. Estas últimas sufren en menor grado los efectos del ozono y de los radicales que de él se derivan (hidroxilo, oxígeno, superóxido, etc.), ya que éstos se diluyen progresivamente desde el exterior al interior de la célula.

Probablemente, la causa de todos estos problemas de la vegetación no reside únicamente en el ozono, más bien todo apunta hacia la interacción de ozono con otros contaminantes atmosféricos, en especial la lluvia ácida, y de factores tales como la sequía o las heladas. Se han obtenido evidencias experimentales últimamente mediante la fumigación con ozono, que revelan que concentraciones elevadas de ozono predisponen a sufrir mayores daños en la vegetación ante sequías, heladas o parásitos.

Recientes investigaciones han descubierto que el ozono aumenta la producción de etileno en los vegetales, que a su vez provoca una mayor sensibilización ante el ozono. El etileno es una hormona reguladora del crecimiento, cuya liberación se asocia frecuentemente a los ataques de agentes patógenos (insectos, virus, bacterias, etc.) sobre las plantas. Se piensa que el ozono reacciona con el etileno para producir radicales que oxidan a lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Si esto es así, las plantas serían más vulnerables al ozono cuando producen etileno en respuesta a factores estresantes (sequía, contaminantes atmosféricos o agentes patógenos). De hecho, se ha constatado que la inhibición de la síntesis de etileno conduce a menores daños por ataque del ozono; y que la estimulación de la liberación de etileno produce mayores efectos ante el ozono.

En Estados Unidos, donde el ozono es considerado el contaminante atmosférico más importante, y en Alemania, voluntarios sanos y asmáticos han sido

expuestos al ozono en cámaras de inhalación, incluso a altas dosis. Se ven aparecer conjuntivitis, lagrimeo, accesos de tos, irritaciones nasales, dificultades respiratorias, fuertes fatigas y espasmos bronquiales. Se ha encontrado que incluso las concentraciones por debajo del límite permitido en los países más desarrollados, en torno a los 120 ppb en volumen, pueden causar graves problemas respiratorios.

Los problemas con el ozono no sólo aparecen al estar al aire libre. En lugares donde hay generadores de alto voltaje, aparatos de rayos X, lámparas ultravioleta, procesos de soldadura eléctrica, fotocopiadoras, etc., y no se ventilan suficientemente, se superan con mucha facilidad los niveles máximos recomendados por la legislación vigente.

Tanto en animales como en humanos se ha descrito cierta tolerancia al ozono, desarrollada después de una continua exposición a concentraciones altas. Así, por ejemplo, los habitantes de Los Ángeles resisten mejor las pruebas en cámaras de inhalación con ozono que los de los bosques del Canadá. Es decir, los habitantes de Los Ángeles parece que han incrementado sus defensas antioxidantes. Con todo, las personas con deficiencias en el sistema inmunitario son mucho más sensibles a los efectos del ozono.

Existe un acuerdo general en que el ozono puede dañar las paredes bronquiales y alveolares, provocar acúmulos de agua (edemas pulmonares) e inflamación. Así, se observa en las células epiteliales la pérdida de cilios, vacuolación citoplasmática y condensación de las mitocondrias. Una de las acciones más nefastas del ozono consiste en inhibir la actividad mucociliar y provocar una acumulación de mucus. Más aún, en la superficie de la membrana alveolar, la presencia de ozono altera la fagocitosis de bacterias y virus que llevan a cabo unas células denominadas macrófagos. Con ello el medio se vuelve propicio a las infecciones.

El efecto nocivo del ozono sobre los organismos se debe a su ataque a los dobles enlaces conjugados y a los grupos sulfhidrilo. Como consecuencia, se destruyen estructuras tan importantes como las membranas, o sustancias tan fundamentales como los enzimas, al tiempo que se producen mutaciones genéticas por inhibición de los mecanismos de reparación del ADN. Los aminoácidos cisteína, metionina y triptófano son atacados por el ozono en disolución acuosa. En los dos primeros, los grupos sulfhidrilo se oxidan a puentes disulfuro o sulfonato, en tanto que en el último, el anillo pirrólico se abre. Estos daños revisten una especial gravedad cuando se ve afectada la estructura secundaria o terciaria de una proteína que forma parte del centro de reacción de una enzima.

Por otra parte, los polímeros orgánicos con dobles enlaces son atacados muy fácilmente por el ozono. Este ataque produce la rotura de las cadenas hidrocarbonadas y en entrecruzamiento de las mismas, así como la formación de radicales peroxilo que pueden excitarse fotoquímicamente y producir más radicales libres. De este modo, se degradan polímeros naturales, como por ejemplo caucho, algodón, celulosa o cuero; y artificiales como plásticos, elastómeros o pinturas.

Por último, destacaremos la contribución del ozono troposférico al efecto invernadero. La vida media de la molécula de ozono en la troposfera es de pocas semanas y su concentración nunca ha tenido tiempo de alcanzar el valor global constante como los restantes gases con efecto invernadero. Se suele emplear el valor de 40 ppm (partes por millón) en volumen para la concentración actual de ozono troposférico, y pese a ser, en términos relativos, una cantidad de ozono pequeña, absorbe muy eficazmente la radiación infrarroja. A este respecto, se ha calculado que reduciendo a la mitad la cantidad de ozono en la troposfera, se conseguiría una reducción de la temperatura de la superficie terrestre de 0,5 °C. De doblarse la concentración actual se llegaría a un aumento de la temperatura de 0,9 °C. Se estima que en las próximas décadas contribuirá al efecto invernadero más que el óxido nitroso y casi tanto como el metano.

## V. Actuaciones para evitar la alteración del ozono atmosférico

Los problemas con el ozono atmosférico, reducción del estratosférico y aumento del troposférico, debieran ser solucionados a través de políticas globales que implicasen a todos los países del mundo. Desgraciadamente, todos sabemos que estos acuerdos a nivel mundial tienen escasos resultados. Sin embargo, es mucho lo que se pueden hacer desde el punto de vista individual y educacional. No es éste el lugar donde discutir los aspectos que pueden ser abordados desde la Educación Ambiental dentro y fuera de la Escuela, Instituto o Facultad. Sí que vamos a plantear aquí las acciones individuales que pueden contribuir a reducir los problemas del ozono.

Para evitar la destrucción de ozono estratosférico:

- No comprar o utilizar extintores con halones.
- Evitar la espuma de poliestireno (*corcho blanco*). Esto incluye los materiales que protegen a los electrodomésticos durante su transporte y las neveras portátiles. En muchos casos en su fabricación se han empleado CFC. Éstos no sólo se emiten durante el proceso de fabricación, también pasan a la atmósfera cuando se rompe o desmenuza la espuma.

- No comprar aerosoles, ni los que contienen CFC ni los restantes, ya que contienen propelentes que no suelen ser inocuos. Comprar sólo envases de presión manual recargables.

Para evitar el aumento del ozono troposférico:

- Renunciar voluntariamente al automóvil para recorridos cortos y utilizar los medios de transporte públicos.

- Emplear pinturas y barnices solubles en agua, que no contengan disolventes orgánicos o que los tengan en muy pequeña proporción.

- Disminuir el uso de productos del hogar que contengan como base disolvente: ceras para muebles, abrillantadores de parquet, lacas de pelo y lubricantes.

- Procurar reducir fuegos que utilicen combustibles fósiles y las quemas de maleza y vegetación.
- Plantar árboles y todo tipo de vegetación.
- Reducir la utilización abusiva de fertilizantes nitrogenados.

Estas medidas, si bien consideradas de forma aislada pudieran parecer insignificantes, si se generalizasen podrían repercutir de forma ostensible los problemas con el ozono.

## VI. Bibliografía

BIGAS, J. (1994). 50 cosas sencillas que tú puedes hacer para salvar la Tierra. Plaza & Janes: Barcelona.

CACHO, J. & SAINZ DE AJA, M.J.(1989). El agujero de ozono. Tabapress: Madrid.

CARWARDINE, M. (1992). Manual de conservación del medio ambiente. Plural: Barcelona.

CLIMENT, M.D. (1992). Conocer la química del medio ambiente. Servicio de Publicaciones de la UPV: Valencia.

CHOVIN, P. & ROUSSEL, A. (1986) La polución atmosférica. Orbis: Barcelona.

COLIN BAIRD, N. (1995). Introducing atmospheric reactions. *Journal of Chemical Education*, 72 (2), 153-157.

CONTRERAS, A & MOLERO, M. (1999). Introducción al estudio de la contaminación y su control. UNED: Madrid.

DAVISON, W. & HEWITT, C.N. (1993). Environmental chemistry comes of age. *Education in Chemistry*, 30 (2), 48-50.

DE KERMIKRI, I. (1995). El aire de las ciudades, causa de enfermedades. *Mundo científico*, 15 (162), 934-938.

DICKSON, T.R. (1996). Química. Enfoque ecológico. Limusa: México.

FONTAN, J. (1993) La contaminación atmosférica en los trópicos. *Mundo científico*, 13 (136), 540-548.

GARREC, J.P. & ROSE, C. (1991). La piceas jóvenes, víctimas del ozono. *Mundo científico*, 11 (119), 1218-1220.

- GRIBBIN, J. (1992). El agujero del cielo. Alianza: Madrid.
- GRIBBIN, J. (1991). El efecto invernadero y Gaia. Pirámide: Madrid.
- LAING, M. (1996). Bonding in ozone. *Education in Chemistry*, 33 (2), 46-50.
- LUDEVID, M. (1996). El cambio global en el medio ambiente. Marcombo: Barcelona
- Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente de España (1995). El ozono troposférico. Centro de Publicaciones del Ministerio: Madrid.
- PEÑUELAS, J. (1993). El aire de la vida. Ariel: Barcelona.
- PRÉNDEZ, M. (1992). Poder destructivo de los halones sobre el ozono estratosférico. *Revista Española de Física*, 6 (3), 27-30.
- TWEDDLE, R. (1995). Environmental issues – CFC alternatives. *Education in Chemistry*, 32 (1), 17-19.
- VELÁZQUEZ, F., LÓPEZ, F. & HERNÁNDEZ, E. (2000) Evolución del ozono troposférico. *Investigación y ciencia*, Octubre, 76-81.
- WAYNE, R.P. (1992). Change in the air. *Education in Chemistry*, 29 (4), 128-130.