

## **EL AGUJERO EN LA CAPA DE OZONO: ORIGEN, EVOLUCION Y ESTADO ACTUAL**

**Fausto POSSO**

*Universidad de Los Andes–Táchira  
Departamento de Ciencias  
San Cristóbal–Venezuela*

### **RESUMEN**

Se estudia el problema del agujero en la capa de ozono, suceso estacional que ocasiona graves perturbaciones sobre toda forma de vida en el planeta al producir un aumento en la incidencia de emisiones UV del sol. Se hace un recuento de los principales resultados de investigaciones hechas desde sus orígenes hasta el presente, haciendo énfasis en los aspectos fenomenológicos y presentando las principales teorías que tratan de explicar la anomalía. En resumen se considera al agujero en la capa de ozono como el producto de la interacción y acoplamiento de fenómenos dinámicos de naturaleza química y meteorológica en la atmósfera antártica. Este artículo tiene por objeto difundir y sensibilizar sobre este grave suceso que nos afecta a todos, con el fin de crear una educación y conciencia ambiental de manera que aún triviales actos cotidianos contribuyan de alguna forma a evitar que esta situación continúe.

**Palabras claves:** Capa de ozono, Impacto ambiental, Antártida

### **THE HOLE IN THE OZONO LAYER: ORIGIN, EVOLUTION AND PRESENT STATE**

### **ABSTRACT**

The problem of the hole in ozone layer is studied, as a seasonal event that causes serious perturbations in every form of life in the planet when the sun produces an increase in the incidence of emissions of UV. An inventory is made of the principal results of investigations from their origins to the present, emphasizing phenomenological aspects and presenting the principal theories that intend to ex-

plain the anomaly. In summary the hole in the ozone layer is considered the product of the interaction and the adjusting of dynamic phenomena of chemical and meteorological nature in the antarctic atmosphere. The object of this article is to diffuse and to sensitize about this serious event that affects us, with the purpose of creating an environmental education and conscience so that even trivial daily acts contribute somehow to stop this situation from going on.

**Key-words:** Ozono Layer, Environmental Impact, Antarctic.

## INTRODUCCION

Estamos frente a una situación francamente delicada, debido fundamentalmente a la acción del hombre la capa protectora de la vida, *la capa de ozono*, está siendo amenazada en su existencia. La manifestación más evidente de esta situación es el llamado *agujero en la capa de ozono*, fenómeno estacional que actualmente exhibe características verdaderamente alarmantes a pesar de todos los esfuerzos hechos, que en la mayoría de los casos no pasa de buenas intenciones. No es una actitud pesimista, basta decir que uno de los últimos reportes científicos del año 98 indica que el agujero alcanzó en ese año niveles récord de extensión y altitud. Definitivamente esta situación y su solución no sólo corresponden a científicos y ambientalistas preocupados sino es un asunto que nos compete a todos. Se debe esencialmente crear conciencia del problema y este artículo apunta en esa dirección, así el objetivo no es ahondar en sucintas explicaciones fenomenológicas de los diferentes aspectos involucrados en la destrucción de la capa de ozono ni hacer una apología de buenas intenciones y hechos contrarios, sino más bien presentar una sencilla visión retrospectiva del fenómeno desde sus albores hasta las condiciones actuales, evitando caer en lo posible en imprecisiones y/o ambigüedades, tratando de mantener un equilibrio entre el formalismo científico y una narración orientada a la difusión y educación ambiental.

En cuanto a su contenido, este trabajo comporta una serie de secciones que tratan aspectos independientes pero que conforman un todo coherente y consistente, los cinco primeros comprenden los fundamentos y nociones básicas, los efectos potenciales, las fuentes de destrucción de la capa de ozono y el estado actual, tratando de establecer un marco de referencia. Luego se describen las diferentes modelos y teorías que intentan entender y/o explicar los diferentes fenómenos involucrados. Posteriormente se muestran los intentos del hombre y la sociedad de resarcir los daños ocasionados por el hombre planteando a su vez acciones remediales, aunque sea por la vía de la imposición de normas y tratados internacionales. Finalmente, una propuesta de acciones simples que todos podemos hacer cotidianamente y que de alguna manera contribuyen a crear cultura de conservación y de amor hacia nuestro ambiente. Finalmente, las conclusiones respectivas y las referencias bibliográficas utilizadas.

## FUNDAMENTOS Y NOCIONES BASICAS

La atmósfera es el medio gaseoso que rodea la tierra, entre sus funciones está la de actuar como una cubierta térmica evitando que el planeta se congele y permitiendo al mismo tiempo que se escape parte del calor incidente como para que no se produzca un sobrecalentamiento. De manera que su diseño (por decirlo de alguna manera) corresponde al de un perfecto mecanismo regulador bastante difícil de emular, pero si susceptible de alterar. En cuanto a su estructura, en forma general, puede dividirse en cuatro regiones: la capa más inferior o *troposfera*, se extiende hasta una altitud de unos 13 km. (18 km. en los trópicos) y es la zona en la que tiene lugar la mayor parte de la actividad humana y la contaminación asociada. Luego está la *troposfera*, que contiene alrededor del 75 % de la masa total de la atmósfera. La siguiente capa, la *estratosfera*, es unas tres veces más gruesa que la troposfera, pero contiene sólo el

15 % de la masa atmosférica total llegando hasta, aproximadamente, 50 km. El estrato siguiente, llamado *mesosfera*, que va desde los 50 a los 80 km, se caracteriza por un marcado descenso de la temperatura al ir aumentando la altura. Por encima de los 80 km. está la *ionosfera*, llamada así por su relativamente elevada concentración de iones y se extiende hasta los 640 km. La región que hay más allá de la ionosfera recibe el nombre de *exosfera* y se extiende hasta los 9.600 km., lo que constituye el límite exterior de la atmósfera.

En la estratosfera se encuentra la *capa de ozono*, esta capa constituye uno de los fenómenos atmosféricos que ha contribuido para crear un entorno ambiental idóneo para el desarrollo de la vida. El límite inferior de la capa de ozono se ubica alrededor de los 15 km. a bajas latitudes y en 9 km. en latitudes altas, por otra parte, el límite superior está ubicado alrededor de los 45 km. La columna vertical de la capa de ozono aumenta con la altitud, hasta alcanzar un máximo entre los 20-25 km., aproximadamente, decreciendo luego. Con respecto a su origen, este se remonta al propio origen de la atmósfera primitiva de la Tierra, y es producto del equilibrio dinámico entre diferentes mecanismos de intercambio energético en especial la fotosíntesis y respiración. La capa de ozono no deja pasar la radiación UV solar con una longitud de onda  $\lambda$  menor de 200 nm. Al mismo tiempo, la absorción del ozono en la parte infrarroja del espectro se ubica en los 9.500 nm y causa que un 20 % de la radiación no traspase la capa de ozono. La fotodisociación del oxígeno molecular ( $O_2$ ) es el principal mecanismo de formación del ozono en la atmósfera superior, de esta manera las radiaciones UV del sol descomponen las moléculas de oxígeno para producir dos átomos de oxígeno que se combinan a su vez con otras moléculas de oxígeno para formar moléculas de ozono ( $O_3$ ). Estas últimas vuelven a ser descompuestas por las radiaciones UV del sol, manteniendo así en la atmósfera un balance entre átomos y moléculas de oxígeno ( $O-O_2$ ) y el ozono ( $O_3$ ). Este balance puede verse alterado como resultado de las reacciones entre moléculas de ozono y átomos de

cloro, nitrógeno o bromuro (o combinaciones con otros elementos). La concentración en el equilibrio del ozono atmosférico varía con la altitud, con las estaciones y con los ciclos solares de once años de duración.

### **EFFECTOS POTENCIALES DE LA REDUCCIÓN DEL OZONO ESTRATOSFÉRICO**

Se ha reconocido (Fischer, 1993), (Gribbin, 1992), el hecho de que aún una pequeña reducción en la capa de ozono se traduce en unos niveles peligrosamente altos de radiación UV en la superficie terrestre que podrían dañar la vida en todas sus formas. En el hombre los posibles efectos son múltiples, puede destruir ácidos nucleicos (ADN y ARN) y proteínas, incrementar las posibilidades de desarrollar cáncer de piel, incluyendo el meloma maligno, que en muchas ocasiones es mortal, (Gribbin, 1992). Existen indicios que permiten establecer una relación entre un incremento en la radiación y el aumento en el número de víctimas de cataratas, (Gribbin, 1992). Además, el aumento de la radiación UV inhibe el sistema inmunológico del hombre, por lo que el cáncer en sus diferentes formas puede establecerse y extenderse con mayor facilidad, e incrementándose la predisposición a contraer herpes, hepatitis e infecciones de la piel causadas por parásitos. Finalmente, existe la posibilidad de que se den mutaciones a largo plazo en tejidos y órganos de los seres vivos. En cuanto a la vida vegetal, las investigaciones (Johanson, 1995), muestran que la calidad y cantidad de las cosechas pueden disminuir sensiblemente. Los estudios también sugieren que podría disminuir la cosecha de soya, maíz, arroz y trigo. Por otra parte, en los océanos pueden producirse cambios en los ecosistemas marinos. El fitoplancton, también parece afectado por el aumento de las radiaciones, al igual que las larvas de algunos peces, (Lean, 1991). Los efectos se dejan sentir también en algunos materiales, como los polímeros que pueden degradarse con mucha rapidez debido a la mayor incidencia de la radiación UV, (Jokela, 1993). Por último, la reducción de la capa de ozono puede tener

efectos en el cambio climático haciendo mas complicada la predicción en el futuro del clima en el ámbito regional o global. No obstante, es necesario realizar más y mejores experimentos para pronósticos más adecuados. Recientemente, (Bjorn, 1998) lleva a cabo un experimento bastante interesante: la simulación de los efectos de la destrucción del ozono sobre los ecosistemas terrestres mediante irradiación con rayos UV artificiales con longitudes de onda entre los 280 y 315 nm. Obtiene que esta radiación tiene efectos biológicos pronunciados y un incremento de la misma por encima de los niveles considerados normales resulta en daños e inhibición de procesos biológicos. Para culminar esta sección, una muestra de la gravedad de la situación lo presenta el mismo Borjn, cuando indica que el valor promedio anual de radiación UV-B a 305 nm sobre Toronto se incrementa acerca del 2% anual

## **LAS FUENTES DE DESTRUCCIÓN**

Son variadas las fuentes de destrucción de la capa de ozono, dentro de las relevantes se tienen: la evaporación de los mares, la actividad solar intensa, grandes erupciones volcánicas y fundamentalmente factores antropogénicos. De todos estos, el debido a la actividad humana ha sido el de mayor importancia y controversia, principalmente por factores económicos ya que está en juego una industria que genera miles de millones de dólares. Los compuestos químicos clorofluorocarbonados o CFC en sus diferentes tipos parecen ser los principales responsables de esta acción. Comercialmente se conocen con el nombre de freones y sus aplicaciones son múltiples: como propelentes en aerosoles (25 %), como refrigerantes (17 %), en la fabricación de recipientes desechables (14 %) y como limpiadores de mecanismos electrónicos (13 %), (Monatersky, 1988).

### *¿Cómo actúan los CFC?*

Los CFC una vez sueltos en la atmósfera, son químicamente inertes en la Troposfera y baja estratosfera. De la circula-

ción media ellos son suavemente transportados a altas altitudes (> 40 km.) donde se fotolizan mediante radiación UV ( $\lambda < 230$  nm) y generan cloruros. Después estos son llevados hacia abajo y alcanzan la capa de ozono donde destruyen catalíticamente el ozono. Un aspecto importante de las predicciones sobre los efectos de la reducción de la capa de ozono es la amenaza futura que plantean los CFC ya presentes en la atmósfera. Debido al efecto de retardo, incluso aunque la producción del CFC se parase en forma inmediata - algo improbable - la velocidad de destrucción del ozono no bajaría en forma abrupta durante los años venideros debido a los miles de toneladas de CFC que ya han sido liberadas a la atmósfera durante los últimos cincuenta años. Otro aspecto no menos preocupante es la participación de los CFC en el efecto invernadero, se ha calculado que los CFC contribuyen apreciablemente a la intensificación del efecto invernadero atribuible a causas humanas, (Reinsel y Tao, 1987)

#### Quemado de biomasa

Cicerone, (1994) indica que el quemado de biomasa también produce MeBr (bromuro de metil,  $\text{CH}_3\text{Br}$ ) gaseoso y que esta fuente puede producir el 30 % del MeBr en la atmósfera. Apparently el Br tiene una alta eficiencia destructiva del ozono aún mayor que la del cloro (20 a 60 veces más). Si bien, la pérdida de ozono observado es mayoritariamente atribuido al Cl de los CFC, alrededor del 25% puede ser atribuible al Br de compuestos sintéticos del halón y  $\text{CH}_3\text{Br}$ , aún cuando las cantidades de Br inorgánico atmosférico es menor del 1 % de la concentración de cloro inorgánico. Los átomos de Bromo son liberados en los límites de la estratósfera formando parte de compuestos orgánicos relativamente estables tales como el Halon 1301 ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ), Halon 1211 ( $\text{CF}_2\text{BrCl}$ ) y MeBr, la mayoría de los cuales alcanza la estratósfera intactos. Además de la curiosidad científica existe un razón práctica, en Noviembre de 1993 la Agencia de Protección del Ambiente de

EE.UU. (siglas EPA, en inglés) añadió el MeBr a la lista de sustancias que destruyen la capa de ozono, estableciendo normas que congelan la producción y explotación de MeBr en 1994 a niveles de 1991 y eliminación de su producción y consumo en el 2001.

#### Señales volcánicas

Otra de las posibles fuentes de destrucción de la capa de ozono son las grandes erupciones volcánicas, esta presunción ha generado diversos estudios sobre posibles señales volcánicas en la capa de ozono, (Zerefos et. al., 1994). Una de las grandes dificultades y limitaciones sobre la estimación del efecto de grandes señales volcánicas como la de El Chichón es que el mismo se ve interferido por la presencia de otros fenómenos oscilatorios simultáneos. Se ha tratado este aspecto analizando la distribución espacial y temporal de los residuos medios mensuales del ozono global posterior a grandes erupciones volcánicas de El Chichón y Pinatubo. Los análisis muestran deficiencias de ozono. Cuantitativamente hablando, la magnitud de la deficiencia puede atribuirse a que el efecto volcánico es menor que el reportado anteriormente tanto a partir de las observaciones como de la teoría. Los resultados obtenidos, muestran sin embargo, que nuestro entendimiento de los fenómenos físicos involucrados son, probablemente, todavía incompletos.

#### Evaporación en los mares

Más recientemente, (Vandendorpe, 1998) se ha planteado una posibilidad bastante interesante: la vinculación del agua de mar con la destrucción del ozono atmosférico, atribuyendo la destrucción del ozono troposférico a la sal del mar. En efecto, investigadores de la Universidad de Purdue presumen que el cloruro y bromuro de sodio del agua de mar son naturalmente convertidos a gases y lanzados a la atmósfera donde destruyen el ozono atmosférico. Quizá la conclusión más

relevante de su estudio es que efectivamente se demuestra que el agua de mar afecta los niveles del ozono troposférico alrededor del mundo, de confirmarse la importancia de éste fenómeno, los modelos atmosféricos existentes deben ser modificados drásticamente ya que sobre un 70 % del mundo es océano. Es importante anotar que los modelos actuales no incluyen este aspecto de la química atmosférica y ningún estudio de la destrucción del ozono troposférico se ha publicado. Lo difícil de esta situación es que no existe ninguna forma de que los humanos modifiquen este fenómeno que se debe estar realizando por muchos millones de años.

## LA SITUACIÓN ACTUAL

Observaciones por varios años y en varios sitios de la Antártida han establecido que la declinación del ozono ocurre fuertemente durante los meses de septiembre y octubre. A principios de septiembre la concentración de ozono alcanza niveles máximos, pero en la medida que transcurren los días el ozono disminuye rápidamente alcanzando un mínimo a principios de octubre. El valor del ozono en octubre es aproximadamente un 50% menor que los valores promedio históricos de 300 UD (una Unidad Dobson, UD, corresponde a 1 mm de espesor de capa bajo condiciones standard de presión y temperatura). Este agujero estacional es llenado sustancialmente por el rápido influjo de un aire rico en ozono desde latitudes bajas que acompañan al rompimiento dinámico del vórtice estratosférico polar del invierno, típicamente en octubre o noviembre, (Newman, 1986), (Andrews, et. al., 1987). La pregunta que procede es cómo se ha llegado a ésta convicción y por cuáles mecanismos teóricos fenomenológicos se explica este comportamiento cíclico cada vez más acentuado. Uno de los primeros aspectos que tanto teórica como de observación se preguntaron los científicos e investigadores eran sobre las particulares condiciones meteorológicas que hacían posible el desarrollo y avance del agujero del ozono. En estos momen-

tos está claro que la respuesta tiene que ver con las nubes heladas que se forman a gran altitud sobre la Antártida durante el invierno. Esas nubes polares estratosféricas, o PSC en inglés, forman una cubierta nubosa diáfana en la baja estratosfera formada por miles de millones de pequeñas partículas de hielo. Los científicos dedujeron que al formarse las nubes al principio de invierno, las moléculas de CFC quedaban atrapadas en la gran superficie de las partículas de hielo, provocando lo que se denominan *reacciones por catálisis en superficie*. En el caso de los CFC la reacción que se cataliza es la disociación de las moléculas de CFC en átomos de cloro libres. Los átomos de cloro pueden permanecer ligados a las partículas de hielo durante todo el invierno antártico. Cuando viene la primavera las temperaturas disipan las nubes, y los átomos de cloro son nuevamente capturados y el ozono se puede recuperar por medio de las reacciones oxígeno–radiación ultravioleta, (García, et. al., 1987). La razón de que el agujero apareciese inicialmente sólo sobre la Antártida es que es el único lugar donde las temperaturas estratosféricas disminuyen lo suficiente como para crearse las PSC. De hecho, la reducción de ozono en todo el mundo puede haber propiciado una disminución de las temperaturas en octubre en la estratosfera Antártida de 18 °C entre 1979 y 1985. Esto probablemente ocurrió porque el ozono ayuda a calentar la estratosfera al absorber la luz ultravioleta, mediante un mecanismo de realimentación positiva por el que la reducción de ozono conduce a temperaturas mas bajas que dan lugar a mayor número de PSC, lo que a su vez ayuda a destruir más ozono, (Tuck, 1989).

## ULTIMOS REPORTEES

En octubre de 1997, Monatersky (1997) analiza un Reporte de David Hofman de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU. donde se anuncia que el agujero de la capa de ozono, históricamente ubicado entre los 14 y 19 km., ha subido por

encima de los 20,5 km. en ese mes, causando así un mayor deterioro de la capa de ozono sobre el continente sur. Las medidas por satélite confirman los datos de los globos: en términos de tamaño y severidad el agujero de 1997 es bastante similar al del año 96. También, las concentraciones de Cl y Br, que ya han alcanzado su pico en la baja atmósfera, todavía siguen aumentando en la estratosfera. Los cálculos a partir de los modelos sugieren que las concentraciones estratosféricas deben alcanzar su máximo alrededor del año 2.000 y empezar a declinar alrededor del 2010. Se concluye que este crecimiento puede deberse al incremento en la polución de Br y Cl en la atmósfera y a las fluctuaciones en la temperatura atmosférica.

En 1998 se reportan noticias contradictorias, por una parte, en Julio un estudio publicado por la Organización Meteorológica Mundial (WIMO) y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP), (Chemistry&Industry, 1998), indica que la capa protectora de ozono podría retornar a los niveles de 1960 en la mitad de la próxima centuria. El reporte titulado *“Estimado Científico de la Destrucción del Ozono en 1998”*, es el primer estimado global desde 1994 e incluye contribuciones de acerca de 200 científicos del mundo, en él se predice que la abundancia de los químicos que destruyen el ozono, tales como el CFC, tendrán un pico en el año 2000. El reporte añade que las cambiantes condiciones atmosféricas y la variabilidad natural del ozono hacen difícil identificar el inicio de la recuperación más allá de 20 años. Un hecho catalogado de sorprendente es que los fungicidas agrícolas no son tan dañinos como se pensaba, antes de este informe, se creía que estos compuestos eran los químicos más destructivos.

La noticia anterior bastante esperanzadora contrasta abiertamente con la siguiente: en Octubre 98 se reporta (Monastersky, 1998) que la estratosfera por encima de ambos polos se ha puesto más fría en los años recientes por razones no muy claras para los investigadores. Las recientes temperaturas en la Antártida, son las

más bajas en 2 décadas de medidas e implica que la capa de ozono no “sanará” tan rápido como los científicos han predicho, aún cuando las naciones han moderado el uso de químicos que destruyen el ozono. Es más, ha aumentado de tamaño de acuerdo a las medidas de un satélite de la NASA, que muestran que el hueco del ozono alcanzó una área de 27.3 millones de km<sup>2</sup> el 19 de septiembre, es decir un tamaño mayor que toda Norteamérica. El récord anterior era de 26 millones de km<sup>2</sup> en 1996. El satélite también muestra que la concentración de ozono en la sección más “enferma” está alrededor de las 90 UD, solamente un tercio de lo que debería ser normalmente en esta época del año. Las medidas de los globos sobre el polo sur registran un valor de 92 UD en concordancia con las medidas del satélite. Los científicos atribuyen a las bajas temperaturas atmosféricas los niveles de pérdidas alcanzadas, sin embargo no pueden explicar las temperaturas extremadamente bajas detectadas en Agosto y Septiembre en la Antártida. Una causa puede ser las llamadas ondas planetarias frías de la estratosfera polar que producen una suave destrucción del ozono, (Randell, 1998). Este razonamiento no tiene mucho asidero ya que, en los últimos años se han producido muy pocas ondas planetarias. Por otra parte, modelos de computación desarrollados sugieren que los gases de efecto invernadero, pueden modificar el número de ondas planetarias. Se estima que estos juegan un papel importante en las temperaturas estratosféricas, así el CO<sub>2</sub> y otras formas de polución pueden calentar la baja atmósfera, pero pueden enfriar la estratosfera. Otros modelos han llegado a conclusiones opuestas planteando interrogantes respecto a la validez de sus resultados y demuestra que este es un problema abierto, (Randell, 1998).

La vinculación con los gases de efecto invernadero ha sido también estudiada con un nuevo modelo de computación que sugiere la existencia de una conexión real entre el proceso de destrucción de ozono y la formación de gases de invernadero. En principio, el modelo desarrollado es bastante simple y combina el calentamiento de los gases de efecto invernadero y la destrucción del ozono en

una simulación de largo alcance; los resultados muestran que los gases de invernadero y los CFC se pueden unir para destruir el ozono (Kerr, 1998). En efecto un grupo de investigación del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) reporta, (Kerr, 1998), que durante las próximas décadas el hueco de ozono sobre el ártico en época de primavera alcanzará dimensiones similares al del antártico, de acuerdo a los resultados de la simulación por computadora. Los científicos dedicados al tema han tomado estos resultados seriamente pero con cautela ya que el modelo es bastante preliminar, notando sin embargo que las tendencias del comportamiento del ozono en el ártico soportan estos resultados.

Con base en lo anterior se puede decir que la historia y los acontecimientos recientes demuestran la existencia de un hecho quizás irreversible. Los esfuerzos de investigadores se orientan hacia el establecimiento de una vinculación firme entre los diferentes fenómenos meteorológicos, químicos, dinámicos y ambientales para de esta manera tratar de establecer una teoría general unificada que favorezca la comprensión integral de los fenómenos, aspecto que se tratará en la siguiente sección.

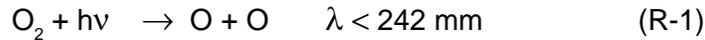
## **FENOMENOS Y MODELOS**

Existe un consenso más o menos generalizado que el agujero en la capa de ozono es el resultado de un conjunto de fenómenos químicos, fluidodinámicos y estacionales íntimamente relacionados y de los cuales hasta mediados de la década pasada no se tenía mayor información y mucho menos un cabal entendimiento. Investigadores por separado y en grupos de trabajo emprendieron investigaciones que de alguna manera explicaran los alarmantes resultados observados con el fin proponer situaciones remediales. Los esfuerzos fueron múltiples y variados y como resultado hoy en día se tiene un conocimiento bastante más detallado de lo que sucede, que

se presenta en forma resumida.

➤ **CICLO NATURAL OXIGENO/OZONO**

1. La vida abandona el refugio de los océanos y emigra a tierra firme producto del incremento en la cantidad del O<sub>2</sub> atmosférico absorbido por la radiación de longitud de onda UV de acuerdo a las siguientes reacciones, (Chapman, 1930):



2. La construcción de una capa atmosférica de ozono genera una reducción en la penetración de la peligrosa radiación UV.

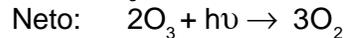
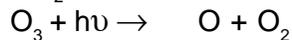
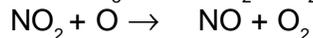
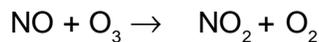


creando así mejores condiciones para el desarrollo formas de vida más perfectas en la tierra

3. La producción del ozono por las reacciones (R-1) y (R-2) está balanceada con la reacción de fotólisis (R-3) y por la reacción subsecuente del O con el O<sub>3</sub>



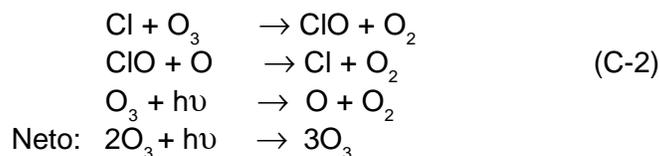
Más pronunciado que (R-3) y (R-4) es el ciclo de destrucción catalítica del nitrógeno, (Crutzen, 1971)



(C-1)

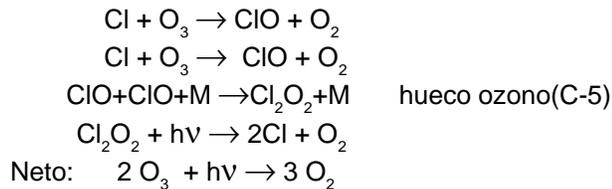
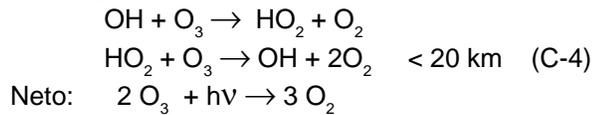
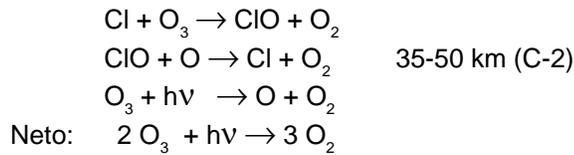
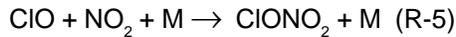
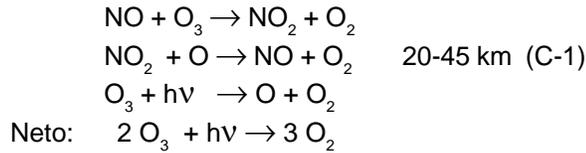
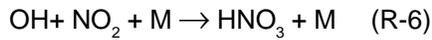
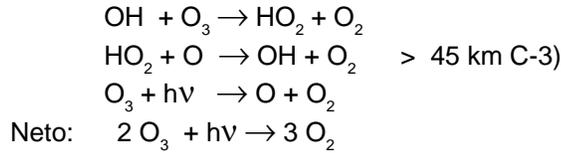
Los óxidos de nitrógeno se forman mayoritariamente por la oxidación del N<sub>2</sub>O, el cual a su vez es producido microbiológicamente vía nitrificación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> o denitrificación del NO<sub>3</sub> mediante procesos microbiológicos en los suelos.

Con el proceso de industrialización masiva, el hombre ha acentuado su interferencia en el balance del ozono estratosférico. Se han reportado niveles de cloruros atmosféricos cuatro veces superiores que los niveles naturales históricos debido al lanzamiento de grandes cantidades de CFC cuya destrucción ocurre únicamente mediante fotólisis UV en la estratosfera. Los átomos de Cl y ClO causan destrucción del ozono vía el ciclo (Molina & Rowland, 1974):



#### ➤ **CICLOS QUÍMICOS DE DESTRUCCIÓN DEL OZONO**

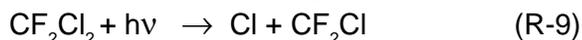
La química de la capa de ozono fue ya estudiada en 1930, (Chapman, 1930), quien propuso un esquema químico consistente de las reacciones (R-1)–(R-4) involucrando sólo a compuestos relacionados con el oxígeno. Este modelo inicial era bastante limitado y el ozono total estratosférico calculado por esta vía era un 30% mayor que el observado. Posteriormente, se han identificado otras fuentes de ozono y planteado varios ciclos de destrucción alternos que involucran al  $\text{NO}_x$ ,  $\text{ClO}_x$  y  $\text{HO}_x$  y que se muestran en forma esquemática a continuación.



Los ciclos (C-1) al (C-3) dependen de la disponibilidad de concentraciones bastantes grandes de oxígeno atómico y cuya producción a partir de la fotólisis del ozono es apreciable sólo a altitudes por encima de los 30 km. El ciclo (C-4) evita la reacción con el oxígeno y es significativo sólo a altitudes bajas. El ciclo (C-5) produce una destrucción agresiva del ozono y se trata en detalle más adelante. Todos los ciclos están acoplados entre sí tal que sus efectos sobre él ozono no son aditivos linealmente. La formación de gases reservorios como  $\text{ClONO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$  resultantes del acoplamiento de los ciclos individuales corresponden a las reacciones (R-5) a la (R-7), estos gases contribuyen fuertemente a la estabilidad del equilibrio químico estratosférico.

De acuerdo a los resultados e hipótesis de Molina y Rowland (1974) se esperaba que las actividades antropogénicas ocasionaran una débil respuesta en las latitudes medias de la capa de ozono, principalmente por encima de los 30 km. y afectando únicamente el 20% de todo el ozono estratosférico. El descubrimiento del hueco antártico del ozono en 1985 (Farman, et.al., 1985) fue completamente inesperado ya que apareció en una región muy remota del mundo industrializado y representaba una muy fuerte señal de la gravedad de la situación ya que la anomalía implicaba la baja estratosfera rica en ozono, echando abajo la creencia de que esta zona no podía ser la región donde la destrucción del ozono se manifestase primero. Más bien se pensaba que el ozono localizado en los 40 km. y en las latitudes medias debían mostrar los primeros signos del cambio o alteración. Hábilmente Farman y colaboradores yuxtapusieron la pérdida de ozono con el incremento en el cloro atmosférico debido a la acción del hombre. La explicación teórica de esta relación se basa en el siguiente esquema:

1. La fotólisis del  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  produce el cloro atómico en la atmósfera



2. El cloro atómico producido puede participar en el ciclo catalítico que destruye el ozono muy efectivamente cerca de los 35-45 km. y correspondiente al ciclo (C-2). Sin embargo, debido a que la mayoría del ozono estratosférico total reside en altitudes mucho más bajas (la densidad máxima del ozono típicamente se ubica entre 20-25 Km), este y otros ciclos químicos de destrucción donde participa el cloro se esperaba que deberían producir un cambio de aproximadamente, un 5 % en la columna integrada del ozono en los próximos cincuenta años, con base en resultados obtenidos de modelos que consideraban en detalle la fotoquímica en fase gaseosa de la atmósfera. Desafortunadamente, estas predicciones teóricas estaban en franco contraste con el cambio del 10% reportado para la Antártida en 1985 y generaron un candente y enriquecedor debate científico y que propició el establecimiento de otras hipótesis, unas más acertadas que otras y que se describirán más adelante.

## LAS TEORÍAS

Las teorías planteadas nacieron con muy poco soporte de datos experimentales ordenados sistemáticamente, no obstante se propusieron varias, unas más contradictorias que otras. La mayoría no soportó un análisis minucioso, finalmente prevalecieron tres: la teoría del ciclo solar, la teoría dinámica y la teoría CFC. La hipótesis denominada de la destrucción química fue difícil de soportar debido a que requería de grandes cantidades de cloro activo para explicar la fuerte pérdida de ozono por los mecanismos propuestos inicialmente.

- **Teoría del ciclo solar** (Callis y Nataragan, 1986): Se fundamenta en asociar una fase inusualmente activa del ciclo solar de once años con la posibilidad de producir cierta abundancia de compuestos de nitrógeno reactivos (NO y NO<sub>2</sub>) en el vórtice polar. Se ha

comprobado que la cantidad de óxidos nítricos en las latitudes medias del hemisferio austral aumentan entre un 30-60 % en períodos de intensa actividad solar. Estos compuestos pueden entonces destruir fotoquímicamente al ozono de manera efectiva luego del retorno de la luz solar en el casquete polar en septiembre de acuerdo al proceso siguiente: el nitrógeno reactivo es producido en la mesosfera y baja termosfera (encima de 60-70 km.); luego, es transportado desde esa zona de formación durante la noche polar hasta la baja estratosfera y los flujos permanentes de aire los arrastran al polo, donde, al entrar en reacción fotoquímica con el ozono, pueda formar el hueco. Alternativamente, los compuestos del nitrógeno son rápidamente destruidos en la fase de luz de la mesosfera.

Los científicos que apoyan esta teoría soportan su propuesta en las mediciones regulares desde el Nimbus 7, así como en cálculos fotoquímicos y de las trayectorias de las masas de aire. Si bien esta suposición luce convincente uno de los factores en contra es no tener una respuesta acertada de por qué las estaciones terrestres tanto en el hemisferio boreal como en el austral no detectaron previamente a 1979 (año donde se registraron bruscos cambios) ningún tipo de disminución. Finalmente, esta teoría fue deshechada en principio por la evidencia de que la abundancia de óxidos de nitrógeno eran excesivamente bajos, no altos, en el vórtice antártico cuando se comparaba con latitudes más bajas o regiones árticas. (Fahey, 1989).

Sin embargo, recientemente (Scientific American, 99) científicos chinos han reeditado la misma al afirmar que la acción solar ciertamente provocaría el agujero en la capa de ozono. El Dr. Yang Xuexiang, profesor de ciencias de la Universidad Tecnológica de Changchun, aduce que el agujero de la capa de ozono se debe a la acción del sol y no a la emisión de gases a la atmósfera desde nuestro planeta. Según sus últimas investigaciones, el viento solar –una corriente de partículas de gran energía– es el culpable del adelgazamiento de la capa de ozono que rodea la tierra. Yang rechaza que

sean las emisiones de gases a la atmósfera producidas por los humanos la causa principal del agujero en la capa de ozono, que es mayor en el sur que en el norte. Según el científico, los planetas pierden parte de su atmósfera a medida que se acercan al sol, debido a la acción de estas partículas energéticas. Esto explica porqué planetas como Mercurio tengan una atmósfera muy fina, en comparación con las gruesas capas protectoras de otros mundos más alejados. Yang calcula que el sur acumula anualmente un 6,6 % más partículas solares que el norte, provocando una mayor destrucción de la capa de ozono en esa zona del planeta. Sin embargo, el agujero continuará ampliándose hasta acabar con la atmósfera ya que las partículas energéticas consumen un 10 % del volumen de ozono de la tierra cada año, y, en su migración hacia el polo norte podría recubrir todo el planeta en unos 10.000 años. A manera de comentario: esto demuestra que ninguna de estas teorías debe ser deshechada totalmente.

- **Teoría dinámica** (Tung, 1986), (Mahlman y Fels, 1986): Trata de explicar el fenómeno sobre la base de procesos circulatorios en la atmósfera y a la redistribución del ozono manteniendo su cantidad total constante. Especula sobre la posibilidad que el calentamiento solar que tiene lugar en un ambiente inusualmente frío tal como la baja estratosfera antártica, pueda generar un calentamiento radiativo basándose en la noción termodinámica básica del ascenso de un aire caliente. Este calentamiento debe proporcionar poca cantidad de ozono aire "arriba" de la Troposfera disminuyendo la abundancia de la columna de ozono total. Ciertamente, al analizar la estratosfera del hemisferio austral, se confirmó la presencia durante el invierno de unas corrientes ascendentes en la región ecuatorial y de un desplazamiento horizontal de las masas de aire hacia el polo sur. Estas corrientes descendentes, prueban indirectamente la existencia de un proceso dinámico; sin embargo, esta teoría no es suficiente para explicar por sí sola el agujero, por varias razones:

1. Al observarse detalladamente la estructura vertical de la des-

- trucción y las observaciones de los aerosoles y otros trazadores del comportamiento del flujo atmosférico, tales como el N O en el vórtice polar, se establece que el movimiento a gran escala no puede explicar ni la magnitud ni la extensión vertical de la destrucción del ozono en septiembre.
2. Las observaciones del trazador sugieren que el comportamiento del flujo meridional en la primavera antártica está más caracterizado por un movimiento descendente que por uno ascendente.
  3. Según esta teoría, debiera registrarse un reflujó de ozono desde la ozonosfera polar y su acumulación en una franja ubicada entre los 60° y 70° de latitud sur. Pero los propios autores de esta hipótesis han reconocido que no se observa el equilibrio de ozono pronosticado.

- **Teoría CFC** (Solomon et. al., 1986), (McElroy et. al., 1986):  
Se basa en resaltar la importancia de la cinética heterogénea en la evolución del fenómeno planteando que varias reacciones químicas claves tienen lugar en las nubes polares estratosféricas (PSC). De esta manera se cambia el énfasis sobre una química estratosférica en fase gaseosa para incluir perturbaciones debido a procesos heterogéneos en superficie. En consecuencia asigna un papel extremadamente importante a las PSC y también al régimen de temperaturas. Su relativo éxito se basa en que ha sido capaz de responder acertadamente a dos interrogantes que engloban aspectos claves del problema:

- a. ¿Cuál es el mecanismo capaz de explicar la conversión efectiva de los gases reservorio en especie cloro activas?
  - b. ¿Por qué el ciclo catalítico es ser capaz de destruir rápidamente el ozono?
- Con respecto a la primera pregunta, se ha sugerido, (Solomon et. al., 1986) que las reacciones del tipo:



pueden convertir el cloro desde unos compuestos relativamente inactivos (HCl Y ClONO<sub>2</sub>) a unas especies mucho más reactivas. Así la molécula de cloro se disocia rápidamente en presencia de luz solar para formar cloro atómico, el cual puede destruir el ozono durante el período de iluminación solar en septiembre. Las reacciones heterogéneas se estima tengan lugar en la parte más fría de la estratosfera antártica donde se forman las nubes (≈ 10-25 km. de altitud). Estos procesos tienen el importante efecto de alterar el rango de altitud sobre el cual los compuestos de cloro son capaces de destruir el ozono, pasando desde altitudes pobres en ozono ubicadas cerca de 35 a 45 km. a bajas altitudes ricas en ozono, generando así la destrucción de la columna total de ozono mucho mayor que la calculada sólo con base en la fotoquímica en fase gaseosa. Además, estudios de laboratorio (Molina y Molina, 1987) confirman esta presunción y demuestran que (R-10) procede rápidamente en la superficie del hielo pero no en fase gaseosa.

- Tratando ahora la segunda pregunta, la misma fue clarificada por experimentos de laboratorio realizados por Molina y Molina [1987] que muestran que a temperaturas suficientemente bajas y altas concentraciones de monóxido de cloro es posible la formación de una molécula de dímero:



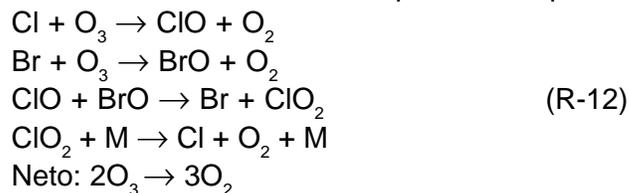
Esta reacción permitió identificar el muy rápido ciclo catalítico (C-5). Es importante notar que para que (R-11) tenga lugar, las temperaturas deben ser muy bajas, de otra manera el dímero Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se descompone rápidamente a 2ClO.

Se ha logrado precisar satisfactoriamente un probable esquema cinético para el ciclo ClO/dímero, (Peter, 1994) que estable-

ce condiciones para la reducción del ozono de acuerdo al régimen ambiental prevaleciente. Indudablemente, estos resultados proveen la más fuerte evidencia de la validez de la hipótesis que el cloro antropogénico es el responsable de la severa destrucción del ozono.

➤ **CICLO BROMO/CLORO**

Pero, además del ciclo dimero (C-5), se ha sugerido que el ciclo acoplado bromo/cloro puede contribuir también a la destrucción del ozono. Así con los niveles de bromo presentes en promedio, se estima que entre un 15-30% del agotamiento del ozono en el antártico puede deberse a este ciclo. Es importante anotar que este ciclo tiene una dependencia con la temperatura menos pronunciada que (C-5) y que también puede ocurrir bajo condiciones menos rigurosas. Cinéticamente, el ciclo está representado por:



Sin embargo, a pesar de estos resultados bastante concluyentes, todavía permanecen sustanciales incertidumbres respecto a las abundancias del ClO y constantes cinéticas de velocidad involucradas en la destrucción del ozono antártico. Además, los datos de estaciones terrenas y aviones se limitan a sitios y tiempos específicos tal que dificultan la deducción de la velocidad de destrucción del ozono fotoquímico basada en extrapolaciones de comportamientos espaciales, temporales y diurnos de especies reactivas claves. Procesos físicos tales como frecuentes variaciones longitudinales y latitudinales en las PSC y excursiones norte/sur de parcelas de aire representan importantes deficiencias en estas extrapolaciones. El mezclado de parcelas de aire, movimientos horizontales y verticales y procesos radiativos son otros obstáculos

para la evaluación cuantitativa de la velocidad de decaimiento del ozono observado y la velocidad derivada de procesos fotoquímicos que hacen difícil el manejar esos procesos. La similitud entre los perfiles verticales de la pérdida del ozono fotoquímico calculada y aquellos derivados de medidas limitadas soportan la visión que la química de los halocarbonos es responsable en mucho y, posiblemente, en todo del declinamiento del ozono antártico acaecido durante 1987, pero un minucioso análisis cuantitativo no es posible con las observaciones actuales. Medidas adicionales espaciales y temporales se necesitan para progresar en este importante aspecto del balance del ozono antártico. En particular, la rápida y completa destrucción del ozono entre los kilómetros 14 y 18 y las bajas columnas de HCl observado son difíciles de entender.

De estos resultados y otros referidos en los trabajos consultados, se pueden extraer las siguientes características del agujero:

- Los ciclos catalíticos que involucran especies de cloro activas son las principales causantes de las pérdidas masivas de ozono en la baja estratosfera antártica por encima del 50% de la columna total del ozono durante la primavera austral.
- El fenómeno del agujero del ozono está relacionado con las especiales condiciones meteorológicas sobre la Antártica en el verano. Las muy bajas temperaturas en el vórtice propician la formación de PSC, las cuales proveen superficies para reacciones químicas heterogéneas, permitiendo la activación del cloro desde las especies reservorio y la transformación de óxido de nitrógeno en ácido nítrico. Sin embargo, aún después de la aceptación general de la presencia de algunas reacciones heterogéneas, es difícil aceptarlas como las causantes totales de la velocidad con la cual el ozono antártico es destruido cada año en agosto.
- En contraste, una destrucción de ozono comparable no ocurre en el hemisferio norte. En la primavera de 1992, a pesar de la presencia de concentraciones récord de ClO, no se

desarrolló ningún “agujero del ozono” porque el vórtice polar norte estaba meteorológicamente sometido a intensas perturbaciones en la forma de actividad de ondas altas planetarias.

- Sin embargo, medidas de largo alcance indican un decrecimiento en las concentraciones de ozono entre los 30 y 60° norte, con una destrucción del ozono en tiempo de primavera está por encima del 0,8% por año durante la última década. Si bien no está todavía bien entendida, esta pérdida gradual de ozono es probablemente también debido a los ciclos de halógeno que se mantienen mediante la activación de reacciones heterogéneas sobre partículas de sulfato de aerosol.
- Los modelos de transporte químico 2D han sido extensivamente desarrollados en las últimas 2 décadas para estudiar el comportamiento, como una función de la altitud y de la altura, de las especies traza atmosféricas. Estos modelos proveen información útil sobre la distribución promedio por zonas, las fuentes y sumideros así como el transporte meridional de esos constituyentes activos químicamente. Una ventaja de esas formulaciones sobre los modelos 1D es su habilidad para representar los efectos de la dinámica de los constituyentes redistribuidos en el plano meridional. Sin embargo, tienen una dificultad en la distribución de la distribución media zonal debido a la naturaleza del transporte estratosférico, la cual es debida en gran parte a las ondas planetarias que son, en esencia 3D.
- También son de singular importancia los procesos dinámicos, esto es el transporte horizontal y movimiento adiabático vertical, los cuales parecen ser la principal causa de los valores anómalamente bajos del ozono en el hemisferio norte durante el invierno de 1991/1992.

### **ACCIONES ANTE EL SUCESO**

La gravedad de la situación a obligado a la sociedad ha responder aunque sea en forma lenta y forzada. Se han establecido tratados internacionales: El Acuerdo de Viena (1985), El Protocolo de Montreal (1987), El Acuerdo de Helsinski (1989), La Enmienda de Londres (1990). En éstos se han establecido límites y plazos para la producción de químicos responsables en gran parte de la destrucción del ozono. Si bien no han sido lo suficientemente efectivos y determinantes, indudablemente, han marcado pautas de comportamiento. También desde el punto de vista científico y tecnológico se han propuesto alternativas remediales tales como: sustitución de las CFC por compuestos “más amigables” con el ozono, eliminación de ciertos usos de los CFC e incluso la generación de una capa de ozono artificial.

Las anteriores alternativas son costosas, lentas en implementar y hasta casi políticas de estado; sin embargo, existen acciones particulares que todos podemos hacer en nuestra vida cotidiana y que de alguna manera es una contribución propia a la solución de un problema que nos compete a todos:

1. No compre productos domésticos, incluyendo sprays para el pelo, quitapolvos y disolventes que contengan productos químicos destructores del ozono tales como CFC y metil cloroforno.
2. Compre extintores que no contengan halon.
3. Evite utilizar productos de poliestireno –recipientes para alimentos y bebidas, materiales para aislamiento y embalajes– que contengan CFC. Presione a las compañías que utilizan estos productos (como las de comidas rápidas y de las ventas por correo) para que cambien a otras alternativas menos dañinas. Algunos de los métodos para persuadirlas son escribir cartas a los directivos de las compañías, evitar comprar embalajes innecesarios y boicotearlos cuando todas las otras

estrategias fallan. Muchas compañías ya han respondido ante la presión de los consumidores.

4. Pídeles a los propietarios de las lavanderías en seco que no empleen disolventes de CFC y evite completamente la lavada en seco comprando ropa hecha con tejidos que se puedan lavar, como por ejemplo el algodón.
5. Si el sistema de aire acondicionado de su casa o de su automóvil tienen que ser reparados pida que el contenedor de refrigerante CFC sea vaciado en un recipiente cerrado en lugar de dejar que se evapore, también pida que sea reciclado.

## CONCLUSIONES

- Han pasado casi veinticinco años desde que Lovelock empezara a develar una historia no tan grata al encontrar los CFC en la estratosfera y quince años desde que Farman y su grupo británico descubrieran el agujero de ozono en la Antártica, desde entonces muchos esfuerzos se han dirigido y muchos científicos en todo el mundo se han dedicado de lleno con un fervor poco usual a tratar de entender los numerosos fenómenos involucrados. A pesar de todo esto y de haber recorrido un largo trecho, persisten todavía muchas interrogantes: ¿Se mantendrá e incluso aumentará la velocidad de destrucción del ozono? ¿Y qué pasará en los próximos años con los agujeros de ozono sobre el Artico y Antártico? ¿Cómo afectará el progresivo calentamiento global a la capa de ozono y viceversa? ¿Cuál es el efecto de millones de toneladas de CFC ya liberados y que todavía están recorriendo su camino hacia la estratosfera?
- Hoy día no hay discusión en considerar al hueco del ozono como un fenómeno estacional debido, fundamentalmente, al acoplamiento dinámico entre procesos químicos heterogéneos y meteorológicos en la atmósfera antártica. También se reconoce que otros fenómenos transientes cua-

- si-periódicos y no periódicos, participan en la destrucción del ozono. Estos fenómenos son manejados por mecanismos térmicos atmosféricos internos en los trópicos (oscilación Quasi.Bienal, El Niño) y externamente por actividad solar, y posiblemente por grandes erupciones volcánicas. Si bien existen en la literatura numerosos estudios de estos fenómenos una teoría completa que estudie estos fenómenos (esto es una teoría unificada) no se ha desarrollado todavía.
- El ozono juega un papel crítico en el balance ecológico de la tierra debido a su fuerte absorción de la luz UV altamente dañina. Es bien reconocido que el cloro puede destruir el ozono estratosférico y que el uso de los CFC ha producido un incremento en el contenido del cloro estratosférico. Desde principios de los 70, varios CFC se han medido en sitios remotos del mundo. La velocidad observada del incremento sistemático de compuestos tales como  $\text{CF}_2\text{CL}_2$  (CFC-12) y  $\text{CFCL}_3$  (CFC-11) en la atmósfera ha mostrado ser consistente con el conocimiento de velocidad de producción antropogénica de todo el mundo, verificando que la actividad humana representa la única fuente significativa de esas moléculas y que su destrucción ocurre únicamente en la atmósfera.
  - La humanidad debe haber aprendido ya una importante lección sobre el problema del ozono. No hay nada permanente en la Tierra, mucho menos en los sistemas individuales que constituyen la biosfera. Además ahora se sabe que la actividad humana, durante mucho tiempo considerada como insignificante frente a la grandiosidad de estos sistemas, tiene un efecto considerable y dañino sobre ellos.
  - Como resultado del progreso industrial, podría resultar un mundo totalmente distinto en los próximos cien años, un mundo con una estratosfera más fría, una troposfera más caliente, y mucha más radiación ultravioleta peligrosa alcanzando la Tierra. Podrían ocurrir cambios climáticos catastróficos y millones de nuevos casos de cáncer de piel. Si estos

cambios se producen, afectarán a la Tierra en los siglos XXI y XXII, cuando los niños de hoy serán abuelos y cuando sus nietos serán abuelos. La única forma de prevenir o al menos mitigar estas consecuencias es actuar ahora.

- Más allá de la entrada en vigor y la puesta en práctica efectiva de todos los acuerdos internacionales queda mucho por hacer. En primer lugar, todavía dentro de la esfera política o gubernamental directa hay que establecer, con el consenso de los ciudadanos, los instrumentos prácticos más operativos para alcanzar estos objetivos de mitigación. La evidencia demuestra que este debate acaba de empezar y que tardará un tiempo en concretarse en amplios acuerdos a favor de medidas de mercado (subvenciones a los productos sustitutivos no contaminantes o bolsa de bonos ambientales) o administrativas (autorizaciones previas o sanciones a posteriori)
- También existen otros frentes de acción: la potenciación de la investigación ambiental, la información y la educación a escala masiva, la ayuda al desarrollo de los países en vías de esto a todos los niveles y, algo bastante importante, el dejar de pensar en que los objetivos medioambientales van en contra de otros intereses vitales para nuestra sociedad. Así, la protección del medio ambiente a menudo se ve en conflicto con el crecimiento económico, las necesidades energéticas, las producciones agrícolas, etc. Ha llegado el momento de que las consideraciones se integren plenamente con las prioridades de cada nación.
- El alcance del problema es de tal magnitud, que es preciso no sólo obligar, sino convencer. Convencer a las empresas, las instituciones y los ciudadanos. Convencerles de que es oportuno un desarrollo diferente. Que es apropiado cambiar el modo de producción y de consumo sin esperar a la amenaza gubernamental. Afortunadamente, existen en la actualidad grupos de ciudadanos, instituciones e incluso grupos de empresas que empiezan a pensar de este modo. A medida

que se exploran los distintos parámetros de los acuciantes retos del medio ambiente es posible identificar ciertas áreas donde se han realizado algunos progresos. Durante las dos últimas décadas se han tomado medidas significativas para controlar la contaminación. Lo que es particularmente alentador es la creciente conciencia medioambiental y el activismo de la juventud.

- No es un reto fácil, supone pasar de pensar a corto plazo a valorar lo que puede suceder a largo plazo, de considerar únicamente el entorno inmediato a pensar en las generaciones futuras de ciudadanos del mundo. Supone reconocer que la tecnología ya no nos garantiza un crecimiento continuado sin riesgos graves. Supone sacrificios individuales y colectivos en las formas de vida y trabajo. Y el entender que todo lo que hagamos o dejemos de hacer, afectará irreversiblemente a nuestros hijos y nuestros nietos y más allá todavía.

**NO ES FÁCIL, ES UN CAMINO LARGO, QUEBRADIZO, LLENO DE INCERTIDUMBRES Y CON MÁS PENURIAS QUE ALEGRÍAS; SIN EMBARGO, ES EL ÚNICO CAMINO PARA ASEGURAR UNA VIDA DIGNA DEL HOMBRE SOBRE LA TIERRA.**

## REFERENCIAS BIBLIOHEMEROGRAFICAS

ANDREWS, D.G., HOLTON, J.R. & LEOVY, C.B. (1987). *Middle Atmosphere Dynamics*. London: Academic.

BJORN L. AND T. CALLAGHAN, (1998). "The problem of ozone depletion in Northern Europe". En: *Ambio*, vol. 27, Nº 4, pp. 275-279.

CALLIS, L.B. & NATARAJAN, M. (1986). «Geochemical mass balance among lithosphere, hydrosphere and atmosphere». En: *Journal of Geophysical Research*, 9, pp. 10.771-10.780.

CHAPMAN, S., (1930). «A theory of upper atmospheric layer». En: *Memory Royal Society*, 3, pp. 103-109.

Fausto POSSO. EL AGUJERO EN LA CAPA DE OZONO: ORIGEN, EVOLUCION ... p. 157-189.  
GEOENSEÑANZA. Vol.4-1999(1). Semestral. Déposito Legal pp.97-0009. ISSN 1316-6077.

CESS, R.D. (1998) «Ozone layer could recover by 2050». En: *Chemistry & Industry*, 6 July, p. 508.

CICERONE, R.J. (1994). "Fires, Atmospheric Chemistry, and the ozone layer". En: *Science*, vol. 263, Iss. 5151, pp. 1243-1244.

CRUTZEN, P.J., (1971). "Ozone production rates in an oxygen-hydrogen-nitrogen oxide atmospheric." En: *Journal Geophysical Research*, 76, pp. 7311-7327

FAHEY, D.W. *et. Al.* (1989). «Photochemical partitioning of the reactive nitrogen and chlorine reservoirs in the high-altitude stratosphere». En: *Journal Geophysical Research*, 94, pp. 16.665-16.687

FARMAN, J.C., GARDINER, B.G. & SHANKLIN, J.D., (1985). "Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction". En: *Nature*, 315, pp. 207-210

FISCHER, M. (1993). *La capa de ozono*, McGraw-Hill, Madrid, 89

GARCÍA, R.R. & SOLOMON, S. (1987). «A numerical method of the zonally averaged dynamical and chemical structure of the middle atmosphere». En: *Geophysical Research Letters*, 14, pp. 848-851

GRIBBIN, J. (1992). *El agujero del cielo. La amenaza humana a la capa de ozono*. Madrid: Alianza Editorial.

JOHANSON, U., GEHRKE, C., *et al.* (1995). "The effects of enhanced UV-B radiation on a subarctic heath ecosystem". En: *Ambio*, 24, pp. 106-111.

JOKELA, K., *et.al.*, (1993.) "Effects of arctic ozone depletion and snow on UV exposure in Finland, Photochem". En: *Photochemistry and Photobiology*, 58, pp. 559-566.

KERR, R., (1998) "Ozone loss, greenhouse gases linked". En: *Science*, vol. 280, pp. 202-203.

Fausto POSSO. EL AGUJERO EN LA CAPA DE OZONO: ORIGEN, EVOLUCION ... p. 157-189  
GEOENSEÑANZA. Vol.4-1999(1). Semestral. Déposito Legal pp.97-0009. ISSN 1316-6077.

LEAN, G., HINRICHSSEN, D., MARKLAM, A., (1991) *Atlas del Medi Ambient*.  
World Wide Fund for Nature. Barcelona: Enciclopedia Catalana.

MAHLMAN, J.D. & FELLS, S.B., (1986). «*Ballon-borne observations of the development and vertical structure of the antarctic ozone hole*». En: *Geophysical Research Letters*, 13, pp.1316-1319.

MCELROY, M.B., SALAWITCH, R.J., WOFSEY, S.C. & LOGAN, J.A. (1986).  
"Reduction of antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine". En: *Nature*, 321, pp. 759-62.

MOLINA, J.M. & ROWLAND, F.S., (1974). "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalysed destruction of ozone". En: *Nature*, 249, pp. 810-812.

MOLINA, M.J. & MOLINA L.T. (1987). "Antarctic stratospheric chemistry of chlorine nitrate, hydrogen chloride, and ice: release of active chlorine". En: *Science*, 238, pp. 1253-7.

MOLINA, L.T. & MOLINA, M.J. (1987). "Production of  $\text{Cl}_2\text{O}_2$  from the self-reaction of the ClO radical". En: *Journal Physical Chemistry*, 91, pp. 433-6.

MONATERSKY, R., (1988). "Decline of the CFC Empire". En: *Science News*, 133

MONASTERSKY R., (1997). "Antarctic ozone hole expands in altitude". En: *Science News*, vol. 152, Nº 17, pp. 262-263.

MONASTERSKY R., (1998). "Antarctic ozone hole reaches record size". Vol. 154, Nº 16, pp. 246-247.

NEWMAN, P.A. (1986). «*Strosteferic meterological conditions in the Artic Polar Vortex*». En: *Geophysical Research Letters*, 13, pp. 1228-1231.

REINSEL, G. AND GEORGE TAO, (1987). "Impact of CFC on stratospheric ozone". En: *Journal of The American Statistical Association*, vol 82, Nº 397, pp. 20-30.

Fausto POSSO. EL AGUJERO EN LA CAPA DE OZONO: ORIGEN, EVOLUCION ... p. 157-189.  
**GEOENSEÑANZA**. Vol.4-1999(1). Semestral. **Déposito Legal** pp.97-0009. **ISSN** 1316-6077.

PETER, T. (1994). "The stratospheric ozone layer-an overview". En: *Environmental Pollution*, 83, pp. 69-79.

SOLOMON, S., GARCÍA R.R., ROWLAND F.S. & WUEBBLES D.J. (1986). "On the depletion of antartic ozone". En: *Nature*, 321, pp. 755-8.

TUCK, A.F. (1989). «Synoptic and Chemical evolution of the Antartic vortex in late winter and early spring». En: *Journal Geophysical Research*, 94, pp. 11.687-11737.

TUNG, K.K. AND KO. M.K. (1986). «The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletion». En: *Nature*, 338, pp. 811-814.

VANDENDORPE, L. (1998). "Sea water linked to artic ozone depletion" En: *Research & Development*, vol 40, Nº 6, pp. 94-97.

ZEREFOS, C.S., K. TOURPALI AND A.F. BAIS, (1994). «Further studies on possible volcanic signal to the ozone laye»r. En: *Journal of Geophysical research*. Vol. 99, Nº D12, pp. 25.741-25.746.

Fecha Recibido: 1999/09/08

Fecha Aprobado: 1999/11/26