

UNIVERSIDAD DE MENDOZA (UM)
INSTITUTO PARA EL ESTUDIO DEL MEDIO AMBIENTE (IEMA)

Resultados y prospectiva de las actuales mediciones climáticas

Prof. Dr. Ing. Salvador Enrique Puliafito, Prof. Dipl.-Ing. Carlos Mario Puliafito

"Seminario interdisciplinario: La Crisis Ecológica: Perspectivas Filosófica,
Científica, Ambiental y Jurídica"
Mendoza, 12 y 13 de Octubre de 1995

Introducción

Los cambios ambientales globales, se caracterizan, más que ningún otro problema por su inter-relación mundial. La circulación natural de los vientos, los ciclos ecológicos, la interacción entre la atmósfera, los océanos, las regiones polares y la masa continental se encuentran en permanente stress ambiental aún en los puntos más distantes del planeta. Esto nos indica claramente que vivimos en un solo mundo y por lo tanto sólo la investigación y la acción conjunta cooperativa, podrá proveer la ayuda buscada. Las investigaciones científicas claramente indican que la industrialización junto a la demanda creciente de energía y alimentos han llevado a un incremento en la atmósfera del contenido de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases invernaderos y a la reducción de la capa protectora de ozono en la estratosfera a través de los compuestos cloro-flour-carbonados (CFC) principales causantes de los cambios atmosféricos observados. El contenido de dióxido de carbono y la temperatura muestran una estrecha correlación. A través de muestras tomadas de hielos antárticos se han podido inferir datos de miles de años de antigüedad. Estos registros muestran que la temperatura en esta región y el contenido de CO₂ en la atmósfera fueron variando casi simultáneamente. La continua y creciente explotación destructiva de la selva tropical conduce también al aumento de la concentración del dióxido de carbono, además de la drástica reducción de la diversidad de la especies. Esta investigación científica actual cubre un amplio rango que va desde la

investigación básica hasta estudios concretos sobre posibles medidas preventivas o curativas. La investigación de Cambio Global debe concentrarse particularmente en tópicos que envuelvan los cambios globales en el medio ambiente causados y sufridos por el hombre. Las siguientes áreas requieren especial atención (Ver Ref. [BMFT91],[BMFT92]):

- Clima y efecto invernadero.
- Ozono estratosférico.
- Ecosistemas sensibles.
- Océanos.
- Selva tropical.

Dada la diversidad y complejidad de los procesos globales, se ha elegido en particular el análisis del problema del ozono, por ser uno de los más estudiados y comprendidos, y fundamentalmente por su interacción con el clima y la vida sobre la superficie terrestre. En este trabajo se da un balance actualizado de las mediciones y resultados científicos más recientes. Finalmente se hace un análisis del impacto de estas conclusiones científicas en la toma de decisiones políticas globales.

I. El doble problema del ozono

El ozono es una de las sustancias raras en nuestra atmósfera, sólo se encuentra en una proporción promedio de 3 moléculas de ozono por cada diez millones de moléculas en el aire. Sin embargo, el ozono atmosférico juega un rol muy importante que no se puede apreciar simplemente por su pequeña cantidad.

El ozono se encuentra especialmente en dos regiones de la atmósfera de la Tierra. La mayoría del ozono (cerca del 90%) reside en una capa aproximada entre los 10 y 50 kilómetros de altura. A esta capa se la denomina "*estratosfera*". Al ozono estratosférico también se lo denomina "*capa de ozono*". El ozono restante está en la parte inferior de la atmósfera llamada "*troposfera*", que se extiende entre la superficie y los 10 km de altura. (ver Ref. [Fabián 90], [Brasseur 86], [Graedel 92]).

Mientras que el ozono en estas dos regiones es químicamente idéntico (ambos consisten en tres átomos de oxígeno e identificado con la fórmula " O_3 "), estas moléculas tienen efectos muy distintos sobre las personas y seres vivos, dependiendo de su ubicación.

El ozono estratosférico tiene un papel benéfico al absorber la mayor parte de la radiación ultravioleta del sol que darla la vida biológica (UV-B), llegando a la superficie sólo una pequeña parte. La absorción de la radiación UV por parte del ozono crea una fuente de calor, que da formación a la estratosfera misma. Este calor eleva la temperatura de la estratosfera; la temperatura aumenta a medida que subimos en esta capa. Es decir, el ozono es un elemento importante en la estructura de la temperatura de la atmósfera. Es más, sin la acción filtrante del ozono, llegaría a la superficie más radiación UV-B. Estudios actuales demuestran la acción dañina de esta radiación sobre plantas, animales y seres humanos.

En la superficie del planeta, el ozono allí presente, entra en contacto directo sobre los seres vivos y muestra una faceta destructiva. Ya que el ozono reacciona fuertemente con otras moléculas, la presencia de éste en altas concentraciones, es tóxico a los sistemas vivos y puede dañar severamente los tejidos de plantas y animales. Por ejemplo daños en la producción de granos, en el crecimiento de árboles y sobre la salud humana. Los efectos negativos sustanciales del ozono superficial contrastan con los beneficios del filtrado de la radiación ultravioleta.

Teniendo en cuenta estos dos aspectos del ozono, surgen dos problemas ambientales totalmente distintos. En la troposfera, hay preocupación por el *aumento* de ozono. El ozono superficial es uno de los componentes del smog, habituales en muchas ciudades del mundo. Las concentraciones de ozono medidas en las ciudades más contaminadas es todavía muy inferior a la concentración del ozono estratosférico.

Por otra parte existe muchísima preocupación, a nivel mundial, por la pérdida del ozono estratosférico. Instrumentos ubicados en numerosos sitios así como en satélites han registrado disminuciones considerables en la cantidad de ozono estratosférico. En la Antártida se ha llegado a medir una pérdida de hasta el 60% de la columna total de ozono en los meses de Setiembre y Octubre. A este fenómeno se lo conoce como el "*agujero de ozono*". También se han medido reducciones menores de ozono sobre partes más pobladas del planeta con un aumento asociado de la radiación UV-B medida en la superficie de estos sitios.

La evidencia científica acumulada por más de veinte años, ha demostrado que productos químicos de producción humana son responsables de las disminuciones de la capa de ozono observadas sobre la Antártida y muy posiblemente, estos compuestos también son activos participantes de la reducción global del ozono. Estos compuestos reductores del ozono contienen combinaciones diversas de elementos químicos como el cloro,

flúor, bromo, carbono e hidrógeno, también se lo denominan compuestos *carbono-halogenados* (halocarbons). Los compuestos que contienen sólo carbón, cloro y flúor se los llama compuestos *cloro-fluor-carbonados* (chlorfluorocarbons), generalmente abreviados como *CFC*. Algunos CFC destructores del ozono, producto de la industria, como el tetracloruro de carbono y el metil cloroformo se han usado en numerosas aplicaciones como por ejemplo en refrigeración, aire acondicionado, inflado de tergopoles, solventes, etc. Otro grupo importante de carbonos halogenados de producción humana son los *halones* (halons) que contienen carbono, bromo, flúor (y en algunos casos cloro) se han usado principalmente en los extinguidores de fuego. Actualmente muchos gobiernos han decidido la suspensión en la fabricación de los halones, tetracloruro de carbono y metil cloroformo, y la industria ha desarrollado algunos sustitutos menos dañinos para el ozono.

Si se ha identificado el problema, por ejemplo, el de la destrucción del ozono estratosférico, lo natural es preguntarse: ¿Puede repararse el daño producido? y ¿Cómo prevenir mayor destrucción? Las soluciones sugeridas varían desde (i) remover los CFC de la atmósfera, (ii) interceptar los cloro antes que ocurra la destrucción del ozono y (iii) reemplazar el ozono perdido en la estratosfera, ya sea llevándolo de las ciudades contaminadas o creando ozono. Ya que el ozono es una molécula muy reactiva, es muy inestable para transportarse. Si se tiene en cuenta las inmensas cantidades de ozono perdido, los problemas prácticos de producción de ozono se vuelven imprácticos, muy caros y dañinos para el medio ambiente. Por lo tanto, debe descartarse la cura del problema, para optar por la prevención. Esta prevención es el núcleo de los tratados internacionales como el Protocolo de Montreal, sus Ajustes y Enmiendas. En estos se ha acordado la eliminación de la producción y uso de los CFC y otros compuestos destructores del ozono. Como resultado de estos tratados se espera que el ozono recupere los niveles anteriores dentro de los próximos cincuenta años a medida que las concentraciones atmosféricas de los CFC, decaiga lentamente.

II. Algunas preguntas más comunes sobre el ozono

Este capítulo ha sido adaptado del Informe de Evaluación Científica sobre la Disminución de Ozono, de la Organización Meteorológica Mundial. (Ver [WMO 94])

1. *¿Cómo pueden ascender los CFC hasta la estratosfera si son más pesados que el aire?*

Si bien las moléculas de CFC son varias veces más pesadas que las del aire, miles de mediciones han sido realizadas desde globo, avión y satélites, demostrando que efectivamente los CFC están presentes en la estratosfera. Los vientos mezclan la atmósfera, a alturas muy por encima de la estratosfera, mucho más rápido de lo que las moléculas puedan asentarse de acuerdo a su peso. Los gases como los CFC, que son insoluble en agua y poco reactivos por debajo de los 10 km de altura, se mezclan rápidamente, y por lo tanto alcanzan la estratosfera sin importar su peso. Esta información se desprende observando los perfiles de concentración versus altura. Por ejemplo, los gases tetrafluoruro de carbono (CF₄, subproducto de la industria del aluminio) y el CFC-11 (CCl₃F, usado en muchas actividades humanas) son mucho más pesados que el aire. El perfil vertical de CF₄ es completamente no reactivo en el 99% de la atmósfera. El CFC-11 es no reactivo en la atmósfera baja (por debajo de 15 km) y se mezcla uniformemente en esta región. Las moléculas de cloro que se liberan al quebrarse los CFCs permanecen en la estratosfera por varios años, donde destruye miles de moléculas de ozono.

2. *¿Cuál es la evidencia que demuestre que el bromo y el cloro destruyen el ozono estratosférico?*

Los estudios de laboratorio muestran que el cloro (Cl) reacciona rápidamente con el ozono. Estos también explican el proceso por el cual el reactivo químico llamado monóxido de cloro (ClO) formado en esta reacción, puede sufrir un efecto en cadena y liberar el cloro original, permitiendo que este proceso se repita muchas veces. Reacciones similares ocurren entre el bromo y el ozono.

Si bien estas reacciones ocurren en el laboratorio, podría preguntarse si existen realmente en la atmósfera. Toda la experiencia científica acumulada demuestra que si las condiciones de temperatura y presión son similares a las probadas en el laboratorio, estas mismas reacciones químicas deben ocurrir en la naturaleza. Sin embargo, en la estratosfera no solo ocurren las reacciones previstas en el laboratorio, sino que aparecen simultáneamente muchos otros procesos con otras sustancias químicas, haciendo que los nexos entre estas reacciones sean difíciles de abarcar. De todos modos, siempre que

ozono, cloro y bromo este juntos en la estratosfera, tienen lugar los procesos que destruyen ozono.

Existen un número pequeño de reacciones que ocurren casi similarmente como en el laboratorio. Esta situación ocurre en la estratosfera por encima de la Antártida durante la formación del "agujero de ozono" en la primavera austral. Durante una campaña realizada entre agosto y setiembre de 1987 -final del invierno austral y comienzo de la primavera- aviones equipados con numerosos y diversos instrumentos midieron diferentes especies químicas sobre la Antártida. Entre ellos se midió ozono y monóxido de cloro, miembros de la cadena de destrucción del ozono. Durante los vuelos realizados en agosto, valores relativamente alto de ozono se midieron desde el cono sur de Sudamérica y en toda la Antártida. A mediados de setiembre, se midieron concentraciones bajas de ozono simultáneamente con concentraciones altas de monóxido de cloro y viceversa. En vuelos posteriores hacia fines de setiembre demostraron que las concentraciones de ozono eran menores y las de monóxido de cloro eran mayores. Otras mediciones realizadas independientemente han demostrado la interrelación de estos procesos químicos. En regiones donde aparecen altas concentraciones de cloro activo, la temperatura de la estratosfera llega a valores cercanos a los -80°C , formando un tipo especial de nubes (nubes polares estratosféricas: PSC). Las PSC favorecen reacciones químicas más eficientes (procesos heterogéneos en la superficie de las partículas heladas), que permiten la liberación de cloro en presencia de luz solar. Actualmente se estudia la posibilidad de ocurrencia de estos procesos en otras latitudes asociados además a la presencia de partículas sulfúricas provenientes de volcanes.

3. ¿Proviene el cloro presente en la estratosfera de fuentes humanas o naturales?

La mayor parte del cloro de la naturaleza proviene de actividades humanas. Muchos compuestos conteniendo cloro se liberan desde el suelo, pero muchos de ellos se disuelven en el agua y no pueden alcanzar las alturas estratosféricas. Grandes cantidades de cloro se emiten por la evaporación de la espuma de mar de los océanos en forma aerosol de sal marina (cloruro de sodio). Sin embargo, como la sal marina se disuelve en agua, este cloruro es transportado por las nubes en forma de gotas de agua o nieve; finalmente se

precipita y no alcanzan la estratosfera. Otra fuente de cloro es el usado en los hogares en forma de lavandina, esta se disuelve rápidamente en agua y por tanto se remueve de la baja atmósfera. Otra emisión proviene del cloruro de hidrógeno emitido por los volcanes, pero este gas se convierte rápidamente en ácido hidroclorídico en la lluvia, hielo o nieve y nunca alcanza la estratosfera.

En contrapartida, los carbonos halogenados, tales como los CFC, el tetracloruro de carbono (CCl_4) y el metil cloroformo (CH_3CCl_3) no son solubles en agua, no reaccionan con la nieve u otras superficies naturales y por lo tanto no se quiebran químicamente en la atmósfera baja. Algunas evidencias confirman la presencia de cloro de origen industrial en la estratosfera.

- (i) A partir de mediciones, se desprende que los compuestos clorinados que llegan a la estratosfera son principalmente las sustancias manufacturadas (principalmente los CFC, metil cloroformo y los HCFC sustitutos de los CFC) junto a una pequeña fracción de ácido hidroclorídico (HCl) y cloruro de metilo (CH_3Cl) que son de origen natural. La contribución natural es mucho menor que la proveniente de las actividades humanas.
- (ii) Entre 1985 y 1992 se midieron, en la estratosfera, prácticamente todos los gases conocidos que contenían cloro. La emisión de los carbonos halogenados más una pequeña parte de origen natural podría abarcar toda la fuente de cloro en la estratosfera.
- (iii) El aumento medido entre 1985 y 1992 de los compuestos clorados se corresponde al aumento conocido en la producción de los compuestos provenientes de la actividad humana durante ese período.

4. ¿Pueden los cambios en la radiación solar ser responsables en los cambios observados en la concentración de ozono?

El ozono estratosférico se forma principalmente a partir de la radiación ultravioleta proveniente de la luz solar, por lo tanto los cambios en la radiación solar afecta proporcionalmente la formación de ozono. La energía solar, que arriba a la atmósfera terrestre en forma de radiación ultravioleta y partículas cargadas tales como electrones y protones, varía en el tiempo; especialmente durante el ciclo de once años de las manchas solares. Mediciones del ozono total global, realizadas durante varios ciclos solares, desde 1960, muestran una disminución del ozono total, por variación del sol,

de 1 a 2% desde el máximo al mínimo de un ciclo solar típico. Los cambios en la radiación solar no pueden ser los responsables por los cambios de largo plazo que se registran en el ozono, ya que la disminución total de ozono es mayor que el 1 o 2%. Más aún, desde 1979 la energía solar ha pasado de un máximo a un mínimo en 1985 y vuelta a un máximo en 1991, pero el ozono ha disminuido durante todo ese período. Cuando se presentan las variaciones de ozono de largo plazo ya se tienen en cuenta estas variaciones de la radiación solar.

5. ¿Cuándo apareció el agujero de ozono en la Antártida por primera vez?

El agujero de ozono es un fenómeno nuevo y se observó por primera vez en el Observatorio Antártico Británico en Halley Bay. A partir de 1980 comienza a notarse una disminución apreciable comparada con la de 1957. El agujero de ozono se forma cada año durante la primavera austral (setiembre y octubre) con una fuerte caída (de más del 60%) sobre casi toda la Antártida. Estas mediciones se correlacionan con otras realizadas en otras estaciones antárticas. Esta disminución de ozono resulta por la destrucción en la estratosfera debido a la reacción del ozono con sustancias que contienen cloro y bromo, cuya fuentes provienen de la actividad humana (gases carbono halogenados).

Antes que la estratosfera fuera afectada por los gases productos de la industria humana, los niveles de ozono en la primavera antártica disminuía naturalmente de un 30 a un 40%, comparados con los niveles de ozono ártico. Estas diferencias naturales entre el Ártico y la Antártida ya fueron observadas por Dobson hacia fines de 1950. Esto surge de las temperaturas extremadamente frías y los vientos típicos de la estratosfera antártica en comparación con las del Ártico. Esta diferencia natural no es el fenómeno del agujero de ozono.

Los cambios en la meteorología no son suficientes para explicar el agujero de ozono. Las temperaturas en la estratosfera sobre la Antártida, en las últimas décadas, no han cambiado sustancialmente antes de cada setiembre. Mediciones realizadas desde el suelo, avión y satélites demuestran claramente la importancia de la química del cloro y del bromo en la destrucción del ozono registrado los últimos años.

6. *¿Por qué se observa el agujero de ozono sobre la Antártida, cuando los CFC se emiten principalmente sobre el hemisferio norte?*

Un 90% de las emisiones humanas de CFC ocurren principalmente en el hemisferio norte en las latitudes correspondientes a Europa, Rusia, Japón y Norte América. Los gases como los CFC son insoluble en agua y no reactivos, por lo que se mezclan en un período de uno a dos años en la atmósfera baja (primeros 10 km). Los gases CFC bien mezclados en el aire suben de la atmósfera baja a la estratosfera especialmente en las latitudes tropicales. Los vientos luego mueven este aire en dirección a ambos polos desde los trópicos, por lo que el aire estratosférico contiene aproximadamente la misma proporción de cloro. Sin embargo, la meteorología de ambos polos es muy distinta, especialmente por la distribución de las masas continentales. La Antártida es parte de una masa continental grande rodeada completamente por océanos. Estas condiciones producen una temperatura estratosférica muy baja, que contribuyen a la formación de las nubes estratosféricas polares. Estas nubes contribuyen a cambios rápidos de ozono durante setiembre y octubre de cada año, que conducen a la formación del agujero de ozono.

Por el contrario, en el Ártico no existe esta distribución simétrica de masas continentales como en la Antártida. Como consecuencia, el aire estratosférico sobre el Ártico es más cálido que el antártico formándose menor cantidad de nubes estratosféricas polares. Por lo tanto la reducción de ozono en el polo norte es menor que en el polo sur.

7. *¿Contribuye la reducción de la capa de ozono a un aumento de la radiación ultravioleta superficial?*

El sol emite luz sobre un rango amplio de energías; el 2% de esta energía está en la forma de ultravioleta (UV) de alta energía. Una parte de esta radiación UV, la UV-B, es muy efectiva en causar daños en los seres vivos, incluyendo las quemaduras, cáncer de piel, daños a la vista para los humanos. La cantidad de radiación solar UV recibida en una localidad cualquiera de la superficie terrestre depende de la posición del Sol sobre el horizonte, nubosidad y contaminación local. Para condiciones iguales de nubosidad y contaminación, la disminución de ozono conlleva un aumento de la radiación UV medida en la superficie.

Las mediciones más drásticas de ozono se observan durante setiembre y octubre en la Antártida cuando ocurre el "agujero de ozono". Durante estas condiciones se midió simultáneamente, en diversas localidades antárticas, ozono y la intensidad de las radiaciones UV-B. Así se observa que cuando disminuye la concentración de ozono, aumenta la radiación UV-B. La detección de una tendencia de incremento de radiación UV-B, se hace muy dificultosa por la variabilidad de la nubosidad o contaminación local o mantener la calibración de los instrumentos durante muchos años. Cuando se usaron instrumentos de alta sensibilidad, por ejemplo en la Antártida, se pudo establecer la correlación entre disminución de ozono y aumento de UV-B. Lamentablemente estos instrumentos no están disponibles para conformar una red de mediciones globales.

8. *¿Qué tan severa es la disminución de ozono actual y si se espera que empeore en el futuro?*

La evidencia científica disponible demuestra que la disminución de ozono, debido a la reacción con compuestos químicos -productos de la industria humana-, continuará mientras persistan los niveles de cloro y bromo. La red de monitoreo global de ozono muestran que la reducción de ozono promedio es del 5% desde los años 60, con un acumulado de 10% para invierno y primavera y del 5% para el verano y el otoño.

Las disminuciones durante el período de agujero de ozono llegan al 60% o más. A partir de 1992 se registraron disminuciones máximas de ozono aún sobre regiones más pobladas, alcanzando el 20% durante la primavera local. Estas disminuciones extremas de los años 1992 y 1993 pudo haberse relacionado, en parte a las erupciones del volcán Pinatubo en las Filipinas en 1991. Esta erupción produjo una gran cantidad de aerosoles sulfatados en la estratosfera que incrementó la reducción de ozono. Las mediciones más recientes han mostrado que, a medida que estos aerosoles van desapareciendo de la atmósfera, los valores de disminución de ozono han vuelto a los índices medidos pre-Pinatubo.

En 1987 se celebró un acuerdo internacional (Protocolo de Montreal sobre sustancias que destruyen la capa de ozono) que reconoce el potencial destructivo de los cloros y bromos en la reducción del ozono estratosférico. A partir de ese año y a la luz de nuevas mediciones se firmaron nuevas Enmiendas que fortalecieron el Protocolo. La Enmienda de Copenhague de 1992 llama a la suspensión de la producción para 1996 de la mayoría de los compuestos químicos dañinos.

Sin la firma del Protocolo de Montreal y sus Enmiendas posteriores, y la continua producción de los CFC, se hubiera triplicado, para el 2050, la concentración de estos gases dañinos para el ozono en la estratosfera. Estos valores hubieran conducido a una mayor destrucción del ozono que lo observado actualmente. Por el contrario, bajo las perspectivas de estos tratados, se espera que la concentración de los compuestos clorados alcancen su máximo en los próximos años para luego iniciar su lenta reducción. De mantenerse el resto de las condiciones constantes, se espera que para mediados del próximo siglo, los niveles de ozono retornen a los niveles de los años 1950.

En conclusión, se ha medido valores récords mínimos de ozono y se espera que esto continúe en los próximos años. Estas reducciones serían aún más dramáticas de no cumplirse con los tratados mencionados. Sin embargo, a medida que estas nuevas disposiciones se van cumpliendo, es decir, se va reduciendo la concentración de los CFC y otros gases en la atmósfera, el ozono irá lentamente recuperando los niveles en las próximas décadas. La recuperación del ozono es lenta porque se requiere mucho tiempo para remover los CFC de la atmósfera.

III. Observaciones y descubrimientos científicos recientes más importantes.

Las investigaciones de laboratorio, las observaciones atmosféricas, y los estudios teóricos y modelos desarrollados en los últimos años han permitido un entendimiento más profundo de los cambios químicos en la atmósfera y su relación con la capa de ozono estratosféricos y el balance de radiación en el sistema climático. A continuación se expondrá algunos de los elementos claves en el impacto sobre el ozono, observaciones y conclusiones [WMO 94].

1. *La pendiente de crecimiento de varias sustancias reductoras del ozono ha disminuido, demostrando el impacto esperado del Protocolo de Montreal, sus Enmiendas y Ajustes.* Desde 1987 se ha monitoreado la concentración atmosférica de los cloro-fluor-carbonados (CFC), tetracloruro de carbono, metil cloroformo y los halones. Durante la mayor parte de este período el crecimiento anual de estos gases ha sido positivo. Sin embargo las mediciones más recientes muestran que el crecimiento de los CFC-11, CFC-12, halón-1301 y halón-1211 ha disminuido. El total de los cloros orgánicos

troposféricos aumentaron en 1992 sólo 60 ppt/año (1,6%), comparado con 100 ppt/año (2.9%) para 1989. Más aún los bromos troposféricos presente en los halones aumentaron aproximadamente 0,25 ppt/año en 1992, comparado con 0,85 ppt/año para 1989. La concentración del tetracloruro de carbono también está disminuyendo (Tabla 1). Estos datos se correlacionan con los registros de producción (ver Ref. [CMDL93], [CMDL94]) lo que sugiere una emisión por debajo del máximo permitido por el Protocolo de Montreal, sus Enmiendas y Ajustes. Se estima que el pico de carga en la troposfera de estos gases haya ocurrido en 1994, esperándose que este máximo alcance la estratosfera 3 ó 4 años más tarde. Esto significa que la reducción de ozono continuará por algunos años, mientras que a partir del siglo 21 comenzará a recuperarse el ozono estratosférico.

2. *Tal como se esperaba, la concentración de varios sustitutos de los CFC ha aumentado.* Frente a la prohibición de producción de los CFC a partir de 1996, se han producido algunos compuestos hidrofluorclorocarbonados (HCFC) e hidrofluorcarbonados (HFC) como sustitutos de los CFC. Desde hace algunos años se viene midiendo las concentraciones de algunos de estos sustitutos, por ejemplo los HCFC-22, HCFC-142b y HCFC-141a. El cloro troposférico presente en los HCFC aumentó unas 5 ppt/año en 1989 y 10 ppt/año en 1992 (ver [CMDL93] y Tabla 1).

3. *Valores récords mínimos de ozono se registran desde 1992.* Las disminuciones de ozono en las latitudes medias fue importante en ambos hemisferios, con mayor incidencia en el hemisferio norte. Los valores globales de ozono fueron 1 a 2% menores que los esperados por el análisis de tendencias, incluyendo los efectos naturales como la radiación solar y la oscilación quasi bienal.

4. *Una erupción volcánica mayor perturbó la estratosfera.* La erupción del volcán Pinatubo en 1991 (Filipinas) produjo una inyección de grandes cantidades de aerosoles en la estratosfera baja, principalmente sulfatos, que se dispersó por todo el globo. Las reacciones químicas producidas sobre los aerosoles de sulfatos aceleró temporariamente los procesos químicos que afectan el ozono, particularmente los que envuelven el hidrógeno reactivo (HOx) cloro y bromo, resultando una pérdida adicional de ozono. Los aerosoles de la erupción del Pinatubo, produjo además una absorción de radiación solar y terrestre provocando un aumento promedio global de 1°C en la temperatura de la estratosfera baja, que implicó un cambio en la

circulación global. A medida que estos aerosoles fueron precipitando, los valores de ozono retornaron a sus valores previsibles.

5. *Se continuó observando tendencias negativas en la columna total de ozono, en la mayor parte del globo. Los modelos de predicción aún no pueden estimar convenientemente estas tendencias.* A través de mediciones globales de ozono, tanto desde la superficie como desde satélites, se ha observado un reducción de la concentración total global de ozono de aproximadamente 4 a 5% por década. En las latitudes medias, las pérdidas de ozono son mayores en el invierno y primavera que durante el verano y otoño para ambos hemisferios. Esta pérdida aumenta con latitudes crecientes, sin embargo entre las latitudes 20°N y 20°S se ha detectado poca disminución. Mientras que los modelos bidimensionales simulan adecuadamente las tendencias medidas para algunas estaciones y latitudes, estos modelos subestiman las tendencias para las latitudes media y altas. Algunas reacciones químicas conocidas del cloro y bromo no son sencillas de modelar por lo que los modelos requieren aún mayor elaboración.

6. *Se ha demostrado, a través de observaciones, que la química halogenada de destrucción del ozono juega un papel más importante que el esperado, frente a la química de fase gaseosa, en la estratosfera baja a latitudes medias.* Se ha demostrado cuantitativamente, a través de mediciones directas in-situ de especies radicales y modelos matemáticos, que la pérdida fotoquímica in-situ de ozono debido a nitrógeno reactivo (NO_x) (mayoritariamente de origen natural) es menor que el estimado a partir de la química gaseosa. Mientras que los efectos sobre el ozono de los compuestos como el HO_x (principalmente de origen natural) y los compuestos conteniendo cloro y bromo (de origen antrópico), son mayores que los estimados a partir de la química gaseosa. Esto confirma el rol importante que cumplen los aerosoles (especialmente sulfatados) en el balance químico de la estratosfera baja, a través de la química heterogénea. Este fenómeno confirma las conclusiones anteriores: los compuestos del bromo y cloro (antrópico) son responsables de la pérdida del ozono estratosférico.

7. *Se ha fortalecido la conclusión que los compuestos provenientes de la actividad humana, conteniendo cloro y bromo, asociado a la química que se desarrolla sobre las partículas estratosféricas polares, son la causa de la disminución de ozono polar.* Recientes estudios de laboratorio han permitido entender más profundamente que la química sobre superficies de partículas

tales como, hielo, nitratos, sulfatos, pueden aumentar la abundancia de los compuestos clorados en la estratosfera polar. Esto se ha afianzado a través de la observación por métodos in-situ y por satélites de la concentración de nitrógeno y cloro activado.

8. *Los agujeros de ozono de los años 1992, 1993 y 1995 fueron los más severos.* El fenómeno de disminución del ozono estratosférico sobre la Antártida ocurre todas las primaveras desde finales de la década del 70, siendo la de los últimos años las más pronunciadas. Por medio de mediciones satelitales, aéreas o desde la superficie, se ha comprobado que el agujero de ozono de los años 1992, 1993 y 1995 ha sido superior en extensión (km cuadrados) y magnitud (concentración) de la depleción (entre 14 y 20 km de altura llegó a desaparecer el 99% de ozono, ver [CMDL94]). La magnitud de los valores para el año 92 y 93 se incrementaron por la inyección de partículas sulfatadas del volcán Pinatubo; sin embargo, la depleción actual (1995), sin influencia del Pinatubo es inclusive mayor.

9. *Se ha detectado pérdidas de ozono en el Ártico por efecto de la química halogenada.* Estudios y mediciones sobre la capa de ozono de la estratosfera baja en el Ártico, indican la presencia de importantes pérdidas. Sin embargo debido a las condiciones climáticas del polo norte (vórtice polar Ártico) estas pérdidas no son tan pronunciadas ni extensas como sobre la Antártida.

10. *Se han determinado con mayor precisión los tiempos de vida media de las sustancias reductoras de ozono y algunos gases de invernadero.* Algunos valores son: 50 años para CFC-11; 5,4 años para el metil cloroformo y 12 a 17 años para el metano (Véase Tabla 1).

IV. Tendencia actual de los gases fuentes relacionados con los cambios de ozono

1. *Los compuestos CFC, tetracloruro de carbono, el metil cloroformo y los halones son los principales gases fuentes de bromo y cloro en la estratosfera, y por lo tanto de la destrucción del ozono estratosférico.* Las mediciones observadas en distintos puntos de la red mundial de monitoreo, muestran una reducción en la velocidad de crecimiento de estos gases, (con excepción del tetracloruro de carbono), lo que es consistente con la expectativas de

reducción de la emisión. Asimismo se ha apreciado un crecimiento acelerado de los compuestos sustitutos de los CFC, entre ellos el HCFC-22, HCFC-141b y HCFC-142b por su incremento en el uso.

2. *Los niveles de metano en la atmósfera afectan los niveles de ozono troposféricos y estratosféricos.* El nivel global de metano ha aumentado en un 7% en la última década. En la década el crecimiento de metano bajó de 20 ppb por año a 10 ppb por año, sin embargo las últimas mediciones indican un crecimiento de 20 ppb/año. Estas variaciones no están aún bien entendidas, pero se lo relaciona con la variación de la fuente de emisión y no por el aumento en los sumideros.

3. *A pesar del aumento del metano, los niveles de monóxido de carbono en la atmósfera actual es menor que en los años 80.* Los niveles de CO troposférico creció de 1980 hasta finales de esa década y luego volvió a declinar. Las causas de este proceso aun no está entendido completamente.

4. *Se han identificado tres fuentes y 2 sumideros para el bromuro de metilo.* Las fuentes son: (i) fumigación del suelo de 20 a 60 kton/año; se estima que el 50% del bromuro de metilo usado en fumigaciones se libera a la atmósfera, (ii) Quema de la biomasa: de 10 a 50 kton/año. (iii) Escapes de automóviles usando naftas con plomo: unas 10 kton por año. La fuente natural conocida es el océano, que emite 60 a 160 kton por año. Se conocen sólo dos sumideros del bromuro de metilo: (i) la atmósfera con un tiempo de vida de 2 años, y (ii) el océano, con un tiempo de vida medio estimado de 4 años. El bromuro de metilo libera bromo en la estratosfera, que es 50 veces más eficiente que el cloro en la destrucción del ozono.

V. Conclusiones: consecuencias para la formulación de políticas y estrategias globales.

Las investigaciones científicas de los últimos años es una herramienta de asesoramiento para la formulación de decisiones y políticas, en lo que respecta a la emisión de sustancias que conducen a la destrucción de la capa de ozono y los cambios en las fuerzas radiactivas del sistema climático.

1. *El Protocolo de Montreal con sus Enmiendas y Ajustes está reduciendo el impacto de los halones antrópicos sobre la capa de ozono y debería eliminar*

este problema de reducción del ozono. Si todas las naciones cumplieren con lo establecido por la Enmienda al Protocolo (Copenhagen, 1992), la concentración de cloro estratosférico seguirá creciendo de 3,6 ppb hasta un máximo de 3,8 ppb hacia el final del siglo. La carga de bromo en la atmósfera dependerá de las alternativas futuras de producción y de la concentración de bromuro de metilo. A partir de principios del siglo próximo se espera que las concentraciones de cloro y bromo comiencen a disminuir. Esto no será de inmediato, debido a los tiempos largos de vida media y los efectos de acumulación, en especial de los CFC, halones y tetracloruro de carbono. La disminución del ozono antártico se detectó por primera vez hacia finales de la década del 70 y se espera que vuelva alcanzar ese nivel para el 2045, de mantenerse el resto de la situación tal cual es actualmente.

2. La máxima destrucción del ozono global ocurrirá en los próximos años.

La capa de ozono será mayormente afectada por las emisiones provenientes de la actividad humana y susceptible a las variaciones naturales alrededor del año 1998, cuando se espera que alcance el pico de concentración del cloro y del bromo. Basado en las tendencias actuales, y referido a la concentración de la década del 60, las pérdidas estimadas serán del:

- (i) 12 al 13% en las latitudes medias en el hemisferio norte para invierno/primavera (2,5% por encima del actual).
- (ii) 6 al 7% en las latitudes media en el hemisferio norte para el período verano/otoño (1,5% por encima del actual).
- (iii) 11% en las latitudes media en el hemisferio sur para todo el año (2,5% por encima del actual).

Estos cambios producirían un incremento del 15%, 8% y 13% respectivamente, en la radiación superficial eritémica (radiación ultravioleta), de mantenerse la mismas condiciones de nubosidad. De aparecer fenómenos naturales tales como una erupción mayor volcánica o temperaturas extremadamente frías en los polos, las pérdidas de ozono o el incremento de la radiación ultravioleta podrían ser mayores para algún año en particular.

3. Las posibilidades de controlar las concentraciones de cloro y bromo en la estratosfera son limitadas. No se espera que la aplicación de controles adicionales sobre las sustancias que afectan el ozono global, puedan modificar

sustancialmente los tiempos ni las magnitudes de estas sustancias halocarbonadas. Sin embargo existen cuatro elementos que pueden aumentar la pendiente de descenso de estas sustancias a principios del próximo siglo.

- (i) Si eliminaren antes del año 2001 las emisiones de bromuro de metilo de las actividades industriales y agrícolas, entonces la carga futura (medida como niveles equivalentes de cloro y por tanto de destrucción de ozono) sería del 13% inferior en los próximos 50 años, con respecto a lo predicho en el Protocolo de Montreal sus Enmiendas y Ajustes.
- (ii) Si eliminaren totalmente, antes del año 2004, las emisiones de los HCFC, entonces la carga futura (medida como niveles equivalentes de cloro y por tanto de destrucción de ozono) sería del 5% inferior en los próximos 50 años, con respecto a lo predicho en el Protocolo de Montreal sus Enmiendas y Ajustes.
- (iii) Si la carga de halones actualmente presente en diversidad de equipos, nunca se liberasen a la atmósfera, entonces la carga futura (medida como niveles equivalentes de cloro y por tanto de destrucción de ozono) sería del 10% inferior en los próximos 50 años, con respecto a lo predicho en el Protocolo de Montreal sus Enmiendas y Ajustes.
- (iv) Si los CFC actualmente presente en diversidad de equipos, nunca se liberasen a la atmósfera, entonces la carga futura (medida como niveles equivalentes de cloro y por tanto de destrucción de ozono) sería del 3% inferior en los próximos 50 años, con respecto a lo predicho en el Protocolo de Montreal sus Enmiendas y Ajustes

4. *El fracaso en la adhesión de los acuerdos internacionales provocará una demora en la recuperación de la capa de ozono.* Si hubiese una producción adicional de CFC del 20% respecto del nivel de 1992, por cada año hasta el 2002 y luego se disminuyese a cero en el 2005 linealmente, entonces la carga futura (medida como niveles equivalentes de cloro y por tanto de destrucción de ozono) sería del 9% mayor en los próximos 50 años, con respecto a lo predicho en el Protocolo de Montreal sus Enmiendas y Ajustes.

5. *La mayoría de los sustitutos de los halones y CFC son gases que incrementan el efecto invernadero.* Muchos gases sustitutos no están contemplados en el Protocolo de Montreal ya que no son sustancias reductoras de ozono. Sin embargo son gases invernaderos y caen bajo la

óptica del Convenio Marco sobre Cambio Global. Por ejemplo los HCFC tienen valores de Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential o GWP) que varían de 150 a 10000 (el dióxido de carbono CO₂ tiene valor 1) otros sustitutos rondan en valores de GWP de 5000 a 10000. Si bien la emisión actual de estos es relativamente baja, su producción va en aumento y podría incrementarse en el futuro.

6. Los cambios de ozono serán un ingrediente necesario para entender los cambios climáticos. La habilidad de asociar los cambios climáticos con causas específicas continuará siendo una importante tarea de los científicos. Además será un asesoramiento fundamental en la toma de decisiones referidas a actividades que afectan el sistema climático. Los cambios producidos sobre el ozono por la actividad humana, han modificado el balance radiactivo de la atmósfera, y se estima que esta influencia continúe en el futuro.

Agradecimiento

Se agradece a la Universidad de Mendoza, en la figura de su Rector Prof. Dr. Juan Carlos Menghini, por su apoyo a las tareas de investigación en esta Universidad, en particular en el área de medio ambiente, a través del Instituto para el Estudio del medio Ambiente (IEMA).

Al Prof. Dr. Gerd Hartmann, Director Científico Externo del IEMA e Investigador Principal del Instituto Max-Planck für Aeronomie (MPAE).

Al Dipl. Ing. Helmut Bianchi, ex-Coordinador alemán para el Área de Medio Ambiente de la Cooperación Bilateral Científico Tecnológico Germano Argentina, por su constante estímulo a las tareas de investigación cooperativa entre Argentina y Alemania.

A los colegas del IEMA, del MPAE y del Umweltforschungszentrum (UFZ) en Leipzig, Alemania, por su incasable e inestimable labor cotidiana de investigación.

Referencias

1. [Brasseur 86]: Guy Brasseur y Susan Salomon: "**Aeronomie of the Middle Atmosphere**", segunda edición, Ed. Reidel Publishing Company, 1986.

2. [WMO 89]: World Meteorological Organization: "**Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989**", Vol. I, Report N° 20, 1989.
3. [Fabián 90]: Peter Fabián: "**Atmósfera y Medio Ambiente**", Ed. Universidad de Mendoza, EDIUM UM-02-06-0638-1190, Mendoza, 1990.
4. [WMO 91]: World Meteorological Organization: "**Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991**", Report N° 25, 1991.
5. [UNEP 91]: United Nations Environment Programme: "**Multilateral Treaties in the Field of Environment**", Vol. 2, Edited by I. Bulska y S. Osafo, Ed Grotius.
6. [BMFT 91]: The Federal Minister for Research and Technology: "**Global Change. Our World in Transition. 1992-1995**". R.F. Alemania, Bonn marzo 1991.
7. [BMFT 92]: The Federal Minister for Research and Technology: "**Conceptual Framework for Research on Global Change. 1992-1995**". R.F. Alemania, Bonn abril 1992.
8. [Graedel 92]: T. Graedel y P. Crutzen: "**Atmospheric Change. An Earth system perspective**", Ed. Feeman, 1992.
9. [CMDL 93]: Climate Monitoring and Diagnostic Laboratory: "**Summary Report 1993**". N°22. NOAA, 1993.
10. [Pulíafito 94a]: E. Pulíafito, A. Moyano, J. Pulíafito: "**Una visión regional sobre el cambio global climático**", Revista 10/13 de la Universidad de Mendoza, EDIUM UM-01-01-03-0666-0394, Mendoza, 1994.
11. [Pulíafito 94b]: E. Pulíafito, A. Moyano, J. Pulíafito: "**La misiones Atlas de la Nasa**", Revista 10/13 de la Universidad de Mendoza, EDIUM UM-01-01-03-0666-0394, Mendoza, 1994.
12. [WMO 94]: World Meteorological Organization: "**Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994**", Report N° 37.

Tabla 1 (a): Concentración de algunos compuestos atmosféricos. (Adaptado de [WMO 94], pag.2.5).

Especie	Fórmula Química	relación de mezcla (1992) [ppbv]	crecimiento (1992-1990) [ppbv]	Carga [Tg]	Tiempo de vida [años]
CFC-11	CCl ₃ F	0,268	0,005	6,2	50 (±5)
CFC-12	CCl ₂ F ₂	0,503	0,026	10,3	102
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	0,082	0,005	2,6	85
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	0,020	0,001		300
CCl ₄		0,132	-0,002	3,4	42
CH ₃ CCl ₃		0,160	0,007	3,5	5,4 (±0,4)
CH ₃ Cl		0,600		5,0	1,5
HCFC-22	CHClF ₂	0,102	0,014	1,5	13,3
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	0,0003			9,4
HCFC-142b	CH ₃ CClF ₂	0,0035			19,5
H-1211	CBrClF ₂	0,0025	0,0001	0,08	20
H-1301	CBrF ₃	0,0020	0,0003	0,05	65
CF ₄		0,070		0,9	50000
C ₂ F ₆		0,004			10000
SF ₆		0,002			3200
N ₂ O		310	1,4	1480	120
CH ₄		1714	14	4850	10
CO ₂		356000	2000	760000	50-200

Tabla 1 (b): Tendencia actual de los compuestos halocarbonados. [WMO 94], pag.2.5.

Compuesto	Periodo	[WMO 94]		[WMO 91]	
		pptv/año	%/año	pptv/año	%/año
CFC-11	90-92	2,5	0,9	9,3- 10,1	3,7-3,8
CFC-12	90-92	13	2,6	16,9-18,2	3,7-4,0
CFC-113	90-92	2,5	3,1	5,4-6,2	9,1
CC14	90-92	-1	-0,8	1 -1,5	1,2
CH3CC13	90-92	3,5	2,2	4,8-5,1	3,7
HCFC-22	92	7,0	6,9	5-6	6-7
CHFC-142b	92	1	30		
CHFC-141b	93	0,75	200		
Total Cl		60		110	
Total Br		0,2-0,3		0,6-1,1	