

H.T. – Con su experiencia, ¿qué consejo daría a un joven que pensase trabajar en la ciencia de la atmósfera?

M.N. – En sus estudios de física el o la joven debería intentar comprender las causas y las consecuencias de los fenómenos, situar los problemas matemáticos en su contexto exacto y valorar las dificultades de las determinaciones experimentales. La meteorología debe ser una de las disciplinas más complejas, ya que todos sus parámetros están gobernados por factores astronómicos, astrofísicos, geofísicos y geográficos. Están las zonas de latitud con sus características diferentes y la distribución irregular de los continentes y los océanos. La aspiración de la persona debiera ser adquirir un conocimiento integrado de las propiedades y de la dinámica de la atmósfera en sus diversas capas y a varias escalas. Cualquiera que use mapas planos de grandes extensiones de la Tierra necesita tener mucha imaginación.

H.T. – ¿Cómo emplea la mayor parte de su tiempo actualmente?

M.N. – Aún trabajo en asuntos científicos, pero ya no estoy sujeto a las exigencias de la administración. Dimití de todos los comités de la Academia de Ciencias belga de que era miembro y trato de desarrollar temas de investigación en que estaba interesado desde 1970 con Ackerman (actual director del Instituto de Aeronomía del Espacio), Biaumé,

Brasseur, Cieslik, Peetermans, Vergison y otros. Muy recientemente se publicaron en *Planetary and Space Science* seis artículos que escribí con S. Cieslik y R. Kennes sobre problemas de la disociación del oxígeno molecular. Pero también releo viejas publicaciones. Por ejemplo, en una época tan lejana como 1963, Dobson había observado que “la estratosfera polar sur está aislada de la circulación general del Oeste por un intensísimo vórtice de vientos del Oeste que soplan alrededor del continente Antártico, encerrando aire muy frío que contiene poco ozono... este vórtice se rompe repentinamente en noviembre”. A propósito, comprobando las medidas de ozono total que realizamos en Arosa en 1938 y 1939 encontré que los mínimos no eran más que 330 unidades Dobson, prácticamente iguales que en 1980-1982. El mínimo en 1940 no era menor de 360 unidades. ¡Y sin embargo he leído en el *New Scientist* que 1938/39 correspondió a un máximo de ozono sobre Arosa!

H.T. – Profesor Nicolet, le doy las más sinceras gracias por el magnífico resumen de su larga e interesante carrera. Espero que disfrutará de muchos más años de salud y fortaleza para continuar en sus diversas y provechosas actividades.

OZONO ATMOSFERICO

UNA PUESTA AL DIA

Por Rumen D. BOJKOV*

Introducción

Hasta hace unos 20 años, los estudios del ozono atmosférico (O_3) tuvieron poco más que interés académico como simple investigación de uno de los componentes menores de la atmósfera terrestre que resultaba que tenía importantes propiedades de absorción, tanto en la banda del ultravioleta como del infrarrojo

del espectro. Esta absorción evita la penetración hasta la superficie de la Tierra de la radiación solar biológicamente dañina, de longitud de onda inferior a los 300 μm y es la causa principal de la inversión de temperatura troposférica. El Profesor Marcel Nicolet recopila brillantemente, en otra parte de este número, sus experiencias en las observaciones e investigación del ozono desde principios de los años 1930. Este artículo se dedica a contestar a algunas de las cuestiones que más a menudo se preguntan sobre los cambios en ozono

* Jefe de la división de Medio Ambiente de la Secretaría de la OMM.

mundial, el "agujero" de ozono en el Antártico, el papel de los clorofluorocarbonos (CFC) y las perspectivas futuras respecto a la capa de ozono estratosférico. Se basa en las dos evaluaciones internacionales más recientes publicadas como Informes de la OMM sobre el ozono nºs 18 y 20.

Adquisición de los datos de ozono

La OMM inicia la vigilancia e investigación del ozono

La OMM puede enorgullecerse del hecho de que las concienzudas medidas sistemáticas del ozono atmosférico daten de hace 35 años, habiendo sido coordinadas, normalizadas e intercambiadas a través del Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMOO₃) de la OMM el cual está estrechamente vinculado con la Red de Vigilancia de la Contaminación de fondo del

OJEADA DEL PROBLEMA DEL OZONO

- El sistema mundial de observación del ozono (SMOO₃) dirigido y mantenido por la OMM, con más de 140 estaciones operadas por unos 60 Miembros, confirma una progresiva reducción del ozono total sobre el hemisferio norte del orden del dos por ciento cada decenio. La pérdida del ozono estratosférico es considerablemente mayor puesto que el ozono troposférico ha aumentado del orden del uno por ciento por año en los últimos dos decenios.
- Los análisis de los datos de espectrofotómetros Dobson instalados sobre el suelo (corregidos y teniendo en cuenta la variabilidad conocida) indican que, desde 1970, la columna total de ozono en invierno, ha disminuido del orden del cuatro por ciento entre las latitudes 30° y 64°N. En verano la disminución es menor que el uno por ciento.
- La tendencia descendente de la columna de ozono sobre el hemisferio norte en invierno es mayor que la predicha. Los modelos ordinarios no incluyen los efectos de la heterogeneidad química, lo que puede explicar el subestimado impacto de los CFC.
- En el hemisferio norte, en la baja estratosfera, el intercambio frecuente del aire en sentido de los meridianos impide la formación de un vórtice circumpolar intenso con temperaturas estratosféricas extremadamente bajas, como ocurre en el hemisferio sur. Las observaciones disponibles no indican una disminución generalizada del ozono similar al "agujero del ozono" del Antártico observado desde finales del decenio de 1970, aunque se encontró una perturbación de la composición atmosférica análoga en 1989.
- La singular circulación estratosférica invernal sobre el Antártico genera las condiciones previas para una perturbación de la composición que implica aumento de cloro activo, que causa la reducción primaveral del ozono (hasta el 50 por ciento en octubre).
- Aunque este "agujero del ozono" Antártico en 1988 no fue tan profundo como el de 1987 ó 1985, sí fue comparable con los de 1984 y 1986. Lo que no resultó inesperado, porque fueron diferentes las condiciones meteorológicas (temperatura estratosférica e intensidad del vórtice polar). Este se confirmó cuando la reducción del ozono en la primavera de 1989 fue la segunda en magnitud desde 1987.
- Todas las pruebas científicas actuales (observaciones desde aviones, el suelo o el espacio y experimentos de laboratorio) señalan al cloro de los CFC como que es la causa primordial de la reducción del ozono, aunque se piensa que el bromo contribuye con un quinto aproximadamente.
- En el futuro, para eliminar los episodios de "agujero del ozono", debe reducirse la carga de cloro por debajo de 2 ppbv, lo que puede necesitar varios decenios. Por ello, es necesario eliminar cuanto antes los CFC, los halones y otras sustancias reductoras del ozono, y no más tarde del año 2000, como se acordó en la conferencia de Londres por los participantes en el Protocolo de Montreal (junio de 1990).
- Todos los CFC son gases de invernadero y se cree que sus efectos combinados son del orden del 15 por ciento al calentamiento calculado de la superficie de la Tierra con modelos climáticos. Por otra parte, el que haya menos ozono debería dar lugar a que las temperaturas de la estratosfera media fueran unos grados más bajas.
- Hay una evidente necesidad de hacer estudios completos de investigación y vigilancia. La OMM está preparada para continuar coordinando y vigilando dichas actividades y para gestionar, junto con el PNUMA y otros organismos internacionales, la evaluación científica regular como se ha estado haciendo desde 1970.

aire (BAPMoN), y que constituye ahora un componente de la Vigilancia de la atmósfera mundial (VAM).

Incluso desde principios de los años 1970, en que había preocupación de que el ozono estratosférico estuviera posiblemente reduciéndose, debido a los gases de escape de los aviones supersónicos de transporte que vuelan a gran altura y, más recientemente, la probabilidad de que el ozono está reduciéndose, debido a las reacciones cebadas por el cloro liberado de los CFC, lo que se manifiesta por la dramática pérdida primaveral del ozono estratosférico sobre la Antártida, la



Espectrofotómetro Dobson para el ozono en la estación argentina 'Vicecomodoro Marambio', fuera de la Península antártica.

Fotografía: Servicio Meteorológico Nacional.

información del SMOO₃ ha sido fundamental para la evaluación del estado de la capa de ozono.

El papel central de la OMM en la dirección de los estudios de ozono comenzó con los preparativos del Año Geofísico Internacional (1957/58). Fue entonces cuando la OMM asumió formalmente la responsabilidad de dar directrices y ayuda para el establecimiento de procedimientos internacionales normalizados, que aseguran la uniformidad y una alta calidad en las observaciones de ozono. Hoy, más de 140 estaciones terrestres de ozono, suplementadas con satélites, constituyen la columna vertebral del SMOO₃. Las estaciones son manejadas por casi 60 países Miembros de la OMM e involucran a cientos de científicos. Así, en un sentido muy real, los países que firmaron el Convenio de Viena en 1986, el

Protocolo de Montreal sobre sustancias que reducen la capa de ozono* en 1987 y su enmienda en junio de 1990, descansan sobre los hombros de los científicos de todo el mundo que han estado trabajando en el problema durante más de tres decenios.

Basándose en los logros científicos y en respuesta a la preocupación pública, la OMM tomó la iniciativa de preparar una declaración formal sobre el tema del ozono estratosférico y de las posibles consecuencias que sobre él tendrían las actividades humanas. La declaración se publicó en 1975**, en respuesta a la amenaza que se pensaba tenían para la capa de ozono los vuelos de aeronaves supersónicas. Sin embargo, las conclusiones científicas fueron que las amenazas venían más de las actividades humanas que de algunos aviones supersónicos que sólo ocasionalmente volaban en la estratosfera.

Al mismo tiempo, la OMM puso en marcha un proyecto internacional coordinado encaminado a mejorar las observaciones y aumentar nuestro conocimiento de las complejas interacciones en las que está implicado el ozono atmosférico. Dentro de este proyecto ya se habían publicado 20 informes fundamentales. Ellos proporcionan opiniones autorizadas sobre la gama completa de observaciones e investigaciones del ozono y ofrecen por lo menos cuatro importantes evaluaciones sobre el estado de la capa de ozono (en 1981, 1985, 1988 y 1989), preparadas con la participación de más de 100 científicos y en colaboración con la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los EE.UU. y algunos organismos nacionales así como con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

El sistema mundial de observación del ozono

Solamente mediante el paciente trabajo de muchos científicos a lo largo de los años, coordinado y dirigido por la OMM, podemos percibir ahora cual es (o era) el estado "normal" de la capa de ozono y calcular las tendencias del ozono desde los años 1950. La Conferencia de las partes firmantes del Convenio de Viena (Helsinki, abril de 1989) confirmó de nuevo la responsabilidad de la OMM para coordinar el

* *Boletín de la OMM* 37 (2) pp. 99-101

* *Boletín de la OMM* 25 (1) pp. 74-79

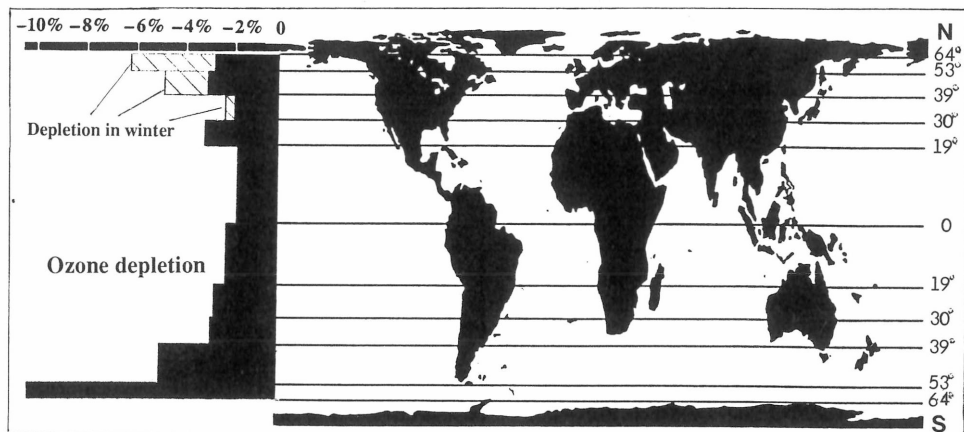


Figura 1—Debilitamiento del ozono en el período 1969-1988 en latitudes fuera de las regiones polares.

(Datos del Ozone Report No. 20; mapa trazado por Greenpeace International).

trabajo internacional en ciencias atmosféricas y las observaciones sistemáticas en apoyo del Convenio.

La prueba final de la teoría de la reducción del ozono, depende de la detección de cambios a largo plazo en el ozono total y en su distribución vertical. Esto requiere un continuo y completo flujo de datos fiables procedentes del SMOO₃. Las medidas realizadas con base terrestre forman el elemento más importante del sistema, tanto por lo que indican en sí mismas como por proporcionar la verificación desde tierra de los sistemas con base en los satélites. Tanto el SMOO₃ como la BAPMoN contribuyen a los estudios de dispersión, transporte, transformación química y depósito de los contaminantes atmosféricos en tierra y mar.

Las observaciones realizadas usando el espectrofotómetro Dobson son el puntal fundamental del SMOO₃. Durante los últimos 18 años, la OMM ha dispuesto que sean calibrados de nuevo y/o comparados mutuamente más de los dos tercios de los espectrofotómetros Dobson usados regularmente. La mayoría de los datos de ozono llegados al Centro mundial de datos de ozono de la OMM (que funciona con la cooperación de Servicio del Medio Ambiente Atmosférico de Canadá) se obtienen utilizando estos instrumentos y todas las evaluaciones del estado de la capa de ozono están basadas en sus valores. La necesidad de comparar regularmente los instrumentos Dobson se sustenta en los errores de calibración que se han revelado en ciertos casos. Aunque solamente se hallaron errores en algunos

instrumentos, las diferencias fueron tales que sugerían la existencia de estaciones que potencialmente generaban datos con grandes errores. Es extremadamente importante identificar dichas estaciones. Una red de instrumentos Dobson bien atendidos permite una precisión estimada en el + 1,5 por ciento para el cálculo de las medias anuales

La unidad Dobson

Se define el ozono total como el ozono contenido en una columna vertical con una base de 1 cm² a la presión y temperatura normales, y puede expresarse en unidades de presión, siendo su valor típico de 0,3 atmósfera centímetro. La unidad utilizada con mayor frecuencia es la miliatmósfera centímetro, también conocida como unidad Dobson. Una unidad Dobson corresponde a una concentración atmosférica media de, aproximadamente, una parte por billón en volumen (1 ppbv), si bien el ozono no está distribuido uniformemente a lo largo de la columna vertical. Los valores típicos van desde 230 a 500 unidades Dobson, con un valor medio mundial de unos 300. Casi el 90 por ciento del ozono atmosférico se encuentra en la estratosfera.

mundiales. Sin embargo, la exactitud de la red puede deteriorarse por, por ejemplo, la incertidumbre en los coeficientes de absorción o por la deriva de las lecturas con el tiempo para un instrumento dado. Así, debe resaltarse que son esenciales las comparaciones frecuentes (cada dos o tres años) y el hacer ajustes retroactivos en los registros de datos basándose en las calibraciones instrumentales.

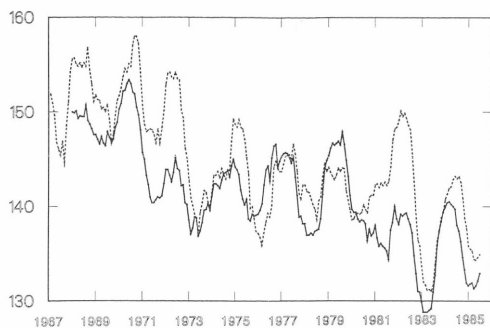


Figura 2- Presión parcial del ozono (en nbar) en la altitud del máximo de ozono (20-22 km) sobre Payerne (Suiza) (línea continua) y Hohenpeissenburg (República Federal de Alemania) (línea de trazos).

Las comparaciones de los espectrofotómetros Dobson en la red completa, durante los años 1980, mediante la lámpara normalizada portátil de la OMM y el Espectrofotómetro trazador de mapas de ozono total (TOMS), transportado por satélite, muestran que las observaciones, en más de los dos tercios de las estaciones, difieren en menos del 1,5 por ciento, un buen resultado de conjunto. Además de los instrumentos Dobson, hay 40 espectrómetros de filtro de banda ancha, cuyos datos han mejorado recientemente, aunque siguen siendo algo inferiores. Por otra parte, durante los últimos cuatro o cinco años se ha introducido en la red un espectrómetro de ozono Brewer, diseñado de nuevo, y se dispone desde 1989 de los datos de medidas sistemáticas.

Tendencias del ozono

Hemisferio norte

Año tras año, los datos del SMOO₃ cuidadosamente recalculados han revelado una importante reducción en el ozono total, la cual (admitiendo que se conoce la variabilidad natural y la oscilación cuasibienal) asciende ahora al tres por ciento respecto a los dos decenios últimos. La tendencia negativa es más fuerte en invierno que en verano. En los cinturones de latitud centrados en los 35°, 45° y 55° N, las tendencias de invierno (diciembre-marzo) son del orden del -1,2, del -2,1 y del -3,0 por ciento por decenio, respectivamente, aunque hay algunas

peculiaridades regionales. Las tendencias de verano son considerablemente menores al uno por ciento por decenio y en otoño no son significativas.

Esta disminución sería mayor si no fuera porque las concentraciones de ozono junto al suelo han aumentado en cerca de un uno por ciento por año en los últimos decenios, en especial en las latitudes medias.

El ozono troposférico constituye, en promedio, alrededor de un décimo de la columna total de ozono. Un análisis cuidadoso de los registros históricos de las medidas de las concentraciones de ozono en la superficie, realizadas entre 1876 y 1907, en el Observatorio Montsouris de París, muestran una cantidad media anual que ha estado por debajo de las 14 ppbv. Lo que es menor que la mitad del nivel actual en un medio ambiente comparable. El aumento del ozono a niveles bajos es altamente sorprendente, ya que se produce, principalmente, como resultado de procesos fotoquímicos que implican a los óxidos de nitrógeno, al monóxido de carbono, al metano y a los hidrocarburos no metálicos, y el contenido atmosférico de todas estas sustancias se sabe que ha aumentado rápidamente como resultado de las actividades humanas, que principalmente se manifiestan en el hemisferio norte.

La reducción prevista del ozono con un modelo, debida a los CFC en los niveles altos de la estratosfera (40-45 km), se ha calculado que es muchas veces mayor que la reducción prevista con un modelo para la columna total de ozono. El aumento del CO₂ producirá un enfriamiento de la estratosfera superior y podría aumentar el ozono en esa zona, aunque no lo suficiente como para compensar la pérdida prevista debida a los CFC. De este modo, los datos de los niveles altos de la estratosfera proporcionarían la información más sensible a las perturbaciones del ozono. Está claro por las observaciones, tanto mediante el *Umkehr** como mediante satélites, que las concentraciones del ozono estratosférico, por encima de los 35 km, están disminuyendo más rápidamente que en la columna total de ozono. Por ejemplo, un análisis completo de los datos Umkehr de diez estaciones del hemisferio norte para el período 1977-1987, teniendo en cuenta los efectos estacionales y del ciclo solar y corrigiéndolos para la interferencia debida a los aerosoles), revela una disminución estadísticamente significativa del ozono entre los 32 y 43 km, siendo la reducción, alrededor

* Un método óptico que usa el espectrofotómetro Dobson para deducir la distribución vertical del ozono sobre el observador.

de los 40 km, de un 4,8 ($\pm 3,1$) por ciento. Para una parte de este período, los datos de satélite del Experimento sobre los gases y aerosoles estratosféricos (SAGE) muestran a la misma altitud una diferencia del 3 (± 2) por ciento. Esto muestra concordancia con el

las encontradas en las latitudes medias y regiones subpolares del norte. El análisis de 11 años de medidas con el TOMS (1978-1989), tras ser corregidas para una deriva instrumental establecida, indica una reducción del ozono similar a la medida por las estaciones de tierra

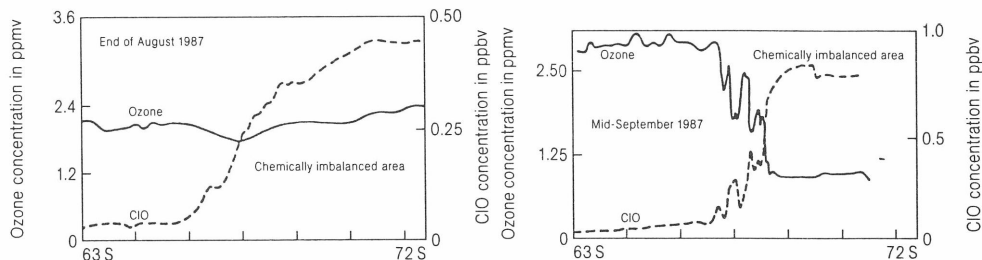


Figura 3— Medidas desde aviones de las concentraciones de compuestos de cloro activos de cloro y de ozono antes (a la izquierda) y después (a la derecha) de la aparición del agujero de ozono y del Antártico en 1987 (WMO Ozone Report N° 20)

análisis independiente del Umkehr, pero ambos son algo menores que las tendencias previstas por los cálculos de reducción del ozono inducidos por el cloro. Por otra parte, las temperaturas estratosféricas mundiales entre los 45 y los 55 km han bajado cerca de 1,7K, desde 1979, y esto muestra concordancia con una disminución del ozono, en la estratosfera superior, de menos del diez por ciento.

Basándose en los datos, muy fidedignos, de los ozonosondas para las latitudes medias, confirmados por los datos del SAGE y del Umkehr, se ha establecido recientemente que las concentraciones del ozono al nivel de ozono máximo de la baja estratosfera (19-21 km), disminuyeron a razón de un 0,5 por ciento por año. Los modelos mundiales, que se basan únicamente en los procesos fotoquímicos en fase gaseosa, no prevén cambios a este nivel, pero dichos cambios son cualitativamente concordantes con la disminución medida en la columna total del ozono.

Los trópicos y el hemisferio sur

Las observaciones de ozono están muy dispersas y tienen una calidad variable en la zona ecuatorial y en el hemisferio sur (aparte de la Antártida). No pueden bosquejarse conclusiones finales respecto a dichas regiones hasta que los datos se hayan recalculado utilizando las calibraciones anteriores de los instrumentos. Sin embargo, unas cuantas estaciones independientes que proporcionan buenos datos muestran reducciones similares a

en el hemisferio norte. Estos datos muestran que el efecto de disolución del "agujero de ozono" primaveral de la Antártida no es mayor del cinco por ciento y está restringido a latitudes más meridionales que 55°S, pero también confirman una reducción del dos al tres por ciento en el cinturón tropical.

El ozono en los polos

Durante el último decenio, ha habido allí una disminución transitoria grande, brusca e inesperada en la cantidad de ozono existente sobre la Antártida durante la primavera. Al comenzar los años finales de los 1970, se han observado las disminuciones de la columna total de ozono tanto por estaciones terrestres como por técnicas de satélites, las últimas mostraron que las disminuciones eran a escala continental. El lanzamiento de ozonosondas desde varias estaciones indicó que la disminución ocurría a niveles entre los 12 y 24 km, y posiblemente alcanzó hasta el 95 por ciento, en algunos días de octubre, entre los 15 y 20 km. El peso de la evidencia científica señala a los compuestos de cloro y bromo generados por el hombre como responsables primarios de esta disminución del ozono.

Muchas características de la disminución y recuperación del ozono en la primavera antártica están influidas decisivamente por las condiciones meteorológicas, de modo que es útil recordar las diferencias sustanciales entre la circulación atmosférica y los regímenes del ozono sobre el Ártico y la Antártica.

El vórtice único estratosférico de invierno en la Antártida predomina desde abril a finales de octubre. Ello lleva a temperaturas extremadamente bajas en la estratosfera (-80°C y más bajas), lo que a su vez favorece la formación de nubes estratosféricas polares (manifestación visible que se conoce como "nubes de madreperla"). Las nubes estratosféricas polares aumentan mucho la actividad de la cloro (debida principalmente a la descomposición de los CFC), que produce una amplia destrucción del ozono cuando reaparece la luz solar en la estación primaveral.

Sobre el polo norte hay un intercambio frecuente de aire en los niveles bajos de la estratosfera entre las latitudes medias y altas, lo que impide la formación de un fuerte vórtice circumpolar, haciendo que tenga unas características mucho menos regulares que en el sur. Cualquier vórtice que se forme se rompe en los dos primeros meses (a diferencia con el ciclo anual sobre la Antártida). En consecuencia, raramente se dan sobre el Artico las condiciones para que haya temperaturas estratosféricas muy bajas. Esto nos lleva de algún modo a la explicación de porqué los datos disponibles no indican una amplia reducción del ozono en la primavera ártica similar a la observada sobre la Antártida desde finales de los años 1970.

El ciclo del ozono sobre el Artico (y sobre las latitudes medias de ambos hemisferios) está caracterizado por un aumento anual coincidente aproximadamente con el solsticio de invierno y alcanzando el máximo del año en las cercanías del equinoccio vernal. Sobre la Antártida, el comienzo de la fase de crecimiento anual y la consecución del máximo muestran un retraso de unos dos meses en relación con el ciclo del hemisferio norte y los valores son notablemente más bajos. Por lo que respecta a la temperatura a los niveles de 100 hPa y 50 hPa, las curvas muestran un retraso similar y una amplitud en el sur doble que la del norte. La razón principal del retraso es el dominio de un fuerte vórtice circumpolar baroclínico que impide la penetración del aire de las latitudes más bajas hasta bien entrado octubre. La aislada región fría sobre el Polo Sur con poco ozono, está rodeada por un cinturón en las latitudes medias con cantidades de ozono relativamente altas. Este régimen persiste hasta que el vórtice se rompe, normalmente en octubre, pero con frecuencia, durante el decenio pasado, más cerca de mediados de noviembre.

Los estudios de laboratorio han demostrado que las nubes polares estratosféricas son capaces de convertir compuestos de cloro fotoquímicamente inactivos en compuestos activos que destruyen el ozono. Además, las reacciones pueden eliminar ciertos compuestos de nitrógeno y, por ello, retardar la regeneración de compuestos de cloro menos activos. Esta teoría está totalmente de acuerdo con los altos niveles de cloro activo encontrados dentro del vórtice polar del sur por las expediciones de 1986 y 1987. La fuerte anticorrelación encontrada entre el cloro activo y el ozono, revelada por las medidas realizadas por los aviones de la NASA en 1987, indican que estos compuestos de cloro, generados principalmente por la industria, son las principales responsables de la disminución observada del ozono dentro del vórtice estratosférico polar, con cerca de un dos por ciento diario durante septiembre y octubre. Por otra parte, se estima que los compuestos de bromo (tales como los halones) explican hasta un quinto de la pérdida de ozono observada.

La pérdida de ozono en la Antártida debería ser menos importante en años en que la temperatura estratosférica no desciende por debajo de los niveles mínimos de primavera, como es el caso de 1988. Se evita así la formación de nubes polares estratosféricas y el vórtice polar se rompe relativamente pronto, permitiendo un intercambio del aire con el de las latitudes medias. La variabilidad anual en la disminución del ozono parece estar también relacionada con la oscilación cuasibienal de la circulación estratosférica.

Sobre el Artico, las observaciones con aviones y, ocasionalmente, con globos que llevaban ozonosondas, durante el invierno 1988/89, indicaron un estado de composición perturbada en la baja estratosfera similar al que existe en la Antártida, es decir, un aumento de los compuestos de cloro que destruyen el ozono (en ocasiones con un factor de 50 ó 100 asociados a nubes estratosféricas polares. Sin embargo, no se ha confirmado una evidencia de la pérdida de ozono, para ese período, exenta de ambigüedades.

Puede esperarse una reducción del ozono fácilmente detectable a finales de enero y febrero, pero sólo si se mantuvieron durante bastante tiempo altas concentraciones de compuestos de cloro activos en aire frío iluminado por el sol. El grado de disminución del ozono en el Artico estará influido por la duración del calentamiento del vórtice polar por

la luz solar que llega, así como por la abundancia de cloro y bromo. En el Antártico, el calentamiento del vórtice polar siempre ocurre después de la llegada de la luz solar y, por consiguiente, la disminución del ozono. En el Artico, el calentamiento es generalmente previo a la llegada de la luz solar (como fue el caso de 1989).

Modelización del ozono

Los modelos teóricos pueden explicar muchas de las características generales del régimen del ozono, por ejemplo, la distribución total y vertical y su ciclo anual. Ellos predicen la mayor pérdida de ozono en las latitudes altas y en invierno más que en verano, aunque las velocidades de reducción previstas son menores que las realmente observadas. Se han identificado otros defectos tales como una subestimación de la concentración del ozono cerca del nivel de los 40 km, una incapacidad para representar adecuadamente el régimen del ozono polar y fallos en la predicción de la reducción observada alrededor del nivel de ozono máximo. Los modelos de evaluación no

Figura 4—Previsión de la futura concentración de cloro en la atmósfera en el año 2000, suponiendo la supresión total de los CFCs. (ver texto).

(Según Prather y Watson (1989) PNUMA/OZL Pro WGII (1) CRP 2)

incluyen los procesos heterogéneos (tales como las reacciones químicas en las nubes estratosféricas polares o sobre la superficie de los aerosoles sulfurosos) y esto es probable que conduzca a la subestimación en la pérdida de ozono, tanto directamente sobre las latitudes polares como indirectamente en las latitudes medias y en la disolución.

Hay una convergencia de opinión deducida de los estudios de observación y con modelos y es que, mientras se permita que continúen las emisiones importantes de halocarbonos, la carga atmosférica de cloro y bromo aumentará dando como resultado una gran probabilidad de que haya una disminución importante de ozono, incluso fuera de la Antártida. Las investigaciones recientes han demostrado que ya ha tenido lugar una pérdida real de ozono debida a los CFC.

El problema de los CFC

En la actualidad, la fuente más importante de cloro es el CFC-11 (CFCl_3) y el CFC-12 (CF_2Cl_2), los cuales tienen unos lapsos de permanencia

de 77 y 140 años, respectivamente. Junto con un cierto número de otros CFC, que se están acumulando con una velocidad de un cuatro por ciento anual. Antes de los años 1960, la producción de CFC era insignificante, pero la demanda creció rápidamente por su uso como refrigerantes, disolventes, impelentes, en la producción de gomaespuma artificial y otras aplicaciones. La actual producción anual combinada alcanza ahora un millón de toneladas.

Cuando se firmó el Protocolo de Montreal, en 1987, fijándose una reducción del 50 por ciento en la producción de 1999, ya se habían manufacturado casi 16 millones de toneladas de esos reductores del ozono. Desde ese momento, los nuevos hallazgos científicos en relación con el mecanismo de disminución primaveral del ozono en la Antártida, el descubrimiento de una composición atmosférica perturbada en el Artico y la confirmación de una reducción a largo plazo del ozono, detectable también en las latitudes medias, han impulsado una petición de que desaparezcan progresivamente por completo los CFC, los halones, el metil cloroformo (CH_3CCl_3) y el tetracloruro de carbono (CCl_4). Estos temas, junto con los medios para facilitar la transferencia de tecnología a los países en desarrollo en relación con la producción y uso de sustitutivos, fueron el centro de las discusiones en la segunda conferencia de las Partes firmantes del Protocolo de Montreal, celebrada en Londres, en junio de 1990.

El Informe de la OMM sobre el ozono n° 20 (*Evaluación científica del ozono estratosférico: 1989*) se publicó con antelación para que los delegados supieran que las reducciones del ozono a gran escala sobre la Antártida, que comenzaron a finales de los años 1970, se habían iniciado con concentraciones de cloro entre 1,5 y 2,0 ppbv, mientras que el nivel actual estaba alrededor de 3,0 ppbv. Como se señaló anteriormente, en la estratosfera antártica iluminada por la luz del sol en primavera, la destrucción del ozono tiene ahora un ritmo en torno a un dos por ciento diario. Cuando la carga de cloro alcance las 4,0 ppbv, a principios del próximo siglo, el ritmo de destrucción del ozono será cerca de dos veces mayor que hoy, y si las concentraciones llegaran a alcanzar las 6 ppbv, el ozono se destruiría cuatro veces más rápidamente que ahora, es decir, entre un ocho y un diez por ciento diario. Las consecuencias para el Artico de dichos aumentos en la carga de cloro están

menos claras, pero son bastante preocupantes. Parece probable que durante los inviernos muy fríos, en los que un vórtice polar se mantiene incluso unos pocos días en las proximidades del equinoccio vernal, importantes pérdidas de ozono pueden afectar no sólo al Artico sino también a las regiones adyacentes, debido a la tendencia serpenteante del vórtice, en dirección norte-sur.

Para que la capa de ozono volviera a algo parecido a su estado natural y, en consecuencia, se evitara el efecto de disolución que el "agujero de ozono" polar puede tener sobre el ozono de latitudes más bajas, la carga de cloro debería volver a estar por debajo de las 2,0 ppbv, como a principios de los años 1970, por otra parte es probable que el "agujero de ozono" permanezca, a menos que haya un cambio en el régimen meteorológico. Por lo que respecta a los pasos a dar, no hay muchas opciones. Una es la completa desaparición progresiva de los CFC totalmente halogenados, los halones, el CCl_4 y el CH_3CCl_3 , así como la consideración cuidadosa de los sustitutos de los CFC hidrogenados (HCFC).

La industria ya ha propuesto algunos sustitutos para los CFC. Algunos (los HCF) no contienen nada de cloro que sea desprendida en la estratosfera. En los HCFC, la adición de hidrógeno a la estructura de los CFC permite que sea eliminada de la troposfera una gran parte del cloro. Están desarrollándose los estudios sobre efectos potenciales en el medio ambiente de los sustitutos. Por ejemplo, los HCFC tienen un potencial de que el calentamiento mundial crezca unas diez veces menos que con los CFC. En los próximos 20 años, casi el 60 por ciento de la demanda futura de productos del tipo CFC puede haber encontrado mejores métodos de conservación y el uso de alternativas no fluorocarbonadas. El 40 por ciento restante puede hallarse en los HFC y los HCFC, si bien el objetivo debería ser su desaparición progresiva, a más tardar hacia el año 2030.

La evolución prevista de la carga de cloro estratosférico se muestra en la *Figura 4* (según Prather y Watson, 1989). Las hipótesis son que haya una desaparición progresiva hacia el año 2000 de todos los compuestos clorados antropogénicos, que tengan un lapso de permanencia mayor que un año y que se introduzcan una amplia gama de sustitutos HCFC en el año 2000 y de forma discontinua en el 2030. Un análisis sugiere que deben ser considerados ciertos factores importantes al

formular las políticas para proteger la capa de ozono:

- Los picos en las concentraciones de cloro están regidos en primer lugar por el ritmo de transición a partir de los CFC;
- La sustitución de los CFC por los HCFC llevará a reducciones en las concentraciones de cloro;
- El uso de HCFC no prolongará el lapso requerido para volver a las concentraciones de cloro que existían antes del "agujero de ozono" antártico, suponiéndose que no se extiende más allá del año 2030.

La conferencia de Londres acordó reforzar el Protocolo de Montreal, así como proteger mejor la capa de ozono. Se decidió que: (a) los CFC se redujeran en un 20 por ciento en el año 1993, en un 50 por ciento en el 1995, en un 85 por ciento en el 1997 y desaparecieran completamente en el 2000; (b) los halones se reducirían en un 50 por ciento en el 1995 y desaparecerían en el 2000 (excepto para usos esenciales); (c) los CCl_4 se reducirían en el 85 por ciento en 1995 y desaparecerían en el 2000; (d) la producción de CH_3CCl_3 será congelada en 1993, reducida en un 30 por ciento en 1995, en un 70 por ciento en el 2000 y desaparecerá en el 2005, y (e) utilizar solamente los HCFC donde no haya alternativas disponibles y llegar a su desaparición no más tarde del año 2040. La conferencia de Londres creó un fondo para ayudar a los países en desarrollo en su transición a la tecnología sin CFC.

Tras años de cuidadosa vigilancia e investigación, hoy existe la primera evidencia clara de que la humanidad ha alterado la atmósfera mundial de forma perceptible y nociva. Se espera con ansiedad que los Miembros de la OMM lleven a cabo y ayuden a la investigación científica y a la vigilancia del ozono y de los parámetros meteorológicos asociados, lo que colaborará posteriormente en la remodelación de la Vigilancia de la atmósfera mundial y del SMO_3 que han contribuido tanto a aclarar el complejo problema del ozono atmosférico.