

CAMBIOS EN EL OZONO POLAR

Por Rumen D. Bojkov*

Introducción

La idea de que los clorofluorocarbonos (CFC) podrían dañar la capa de ozono se adelantó ya en 1974 y la primera Declaración de la OMM sobre la modificación de la Capa de Ozono por las Actividades Humanas data de 1975. Sin embargo, no fue hasta 1984 y 1985 cuando los científicos japoneses de la base de Syowa y los británicos de la estación de Halley Bay señalaron una notable disminución primaveral del ozono antártico. Este fenómeno, conocido popularmente muy pronto como "el agujero del ozono" (véase el cuadro de la página 179), atrajo la atención del mundo sobre las regiones polares. En los años siguientes, se reunieron numerosos datos de campo y de laboratorio, tanto del Ártico como del Antártico. La evaluación más reciente del ozono (Informe de la OMM sobre el Ozono, núm. 25, 1991), muestra que el ozono está disminuyendo en todas partes, fuera de las zonas tropicales, si bien en menores cantidades que las enormes reducciones de la primavera austral.

Estudios profundos de la estratosfera antártica han mostrado que el vórtice estratosférico circumpolar extremadamente frío que se da en la noche polar, es un fenómeno único que crea condiciones favorables para que se produzcan una serie de reacciones químicas heterogéneas al aparecer el sol de la primavera austral. Estas reacciones tienen como ingredientes al cloro y al bromo liberados, respectivamente, por los clorofluorocarbonos y los hidrocarburos bromados y son la causa de la destrucción masiva de ozono.

Aunque la reducción del ozono en el Ártico es mucho menor que en el Antártico, las medidas hechas *in situ* por aeronaves durante el invierno 1988-89 mostraron que la composición química de la estratosfera ártica estaba perturbada de forma similar a la antártica, y en 1991-92 se midieron sobre el Ártico cantidades excesivas de monóxido de cloro (ClO). La conclusión es que la estratosfera

ártica reúne todas las condiciones para una destrucción masiva de ozono cuando aparezcan las masas de aire frío siguiendo la trayectoria sinuosa del vórtice y reciban la luz solar, por ejemplo, en las latitudes medias y altas, con zonas densamente pobladas en Europa, América del Norte y Asia.

La OMM, como organismo de las NU responsable de ser la voz científica autorizada que juzgue el estado y el comportamiento de la atmósfera y el clima terrestres mediante su proyecto mundial de investigación y vigilancia del ozono, que ahora forma parte de la Vigilancia Atmosférica Mundial (VAM), suministra regularmente datos del ozono y evaluaciones científicas del estado de la capa de ozono. Estas evaluaciones de la OMM, preparadas en colaboración con los organismos nacionales e internacionales interesados, tales como la NASA y el PNUMA, constituyen la base científica de acuerdos internacionales como el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono y su Protocolo de Montreal. Gracias al aliento continuo de los Miembros de la OMM, a su coordinación del Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMOO₃), con sus 140 estaciones completadas en el último decenio con satélites, y gracias también al paciente trabajo de numerosos científicos durante años, hemos sabido lo que es una capa normal de ozono y cuáles han sido las tendencias del ozono desde mediados de los años 50. Este artículo ofrece información sobre las medidas del ozono, su comportamiento y sus variaciones en las regiones polares.

El SMOO₃ en las regiones polares

Las primeras observaciones del ozono en las latitudes polares boreales se hicieron durante los veranos de 1926 y 1927 en Abisko (68°N) y Lerwick (60° N) y durante 1929 en Spitzbergen (78° N), como parte de un estudio de la distribución mundial del ozono iniciado por el profesor Dobson, de la Universidad de Oxford. Durante los años siguientes, incluido el Segundo Año Polar Internacional (véanse otros artículos en este número del Boletín), se hicieron medidas en Abisko y Tromsø (70° N).

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

Es en Tromsø donde se hicieron, en julio de 1935, las primeras observaciones sistemáticas del ozono polar que se hayan continuado hasta la fecha, si bien con algunas interrupciones, y durante bastantes años las supervisó el doctor Kaare Zanglo, que más tarde sería Secretario General Adjunto de la OMM. Les siguieron las aperturas de las estaciones de Dombås (62° N), en 1940, y Uppsala (60° N), en 1951. Al mismo tiempo, se iniciaron observaciones sistemáticas en Reykjavik (64° N) y Lerwick (60° N). Para preparar el Año Geofísico Internacional (AGI) 1956-57, y ya formando parte de la red de ozono de la OMM, aparecieron media docena de estaciones en las latitudes polares del territorio soviético hasta la isla de Heis (81° N); también se instalaron dos estaciones más en el ártico canadiense, en Alert* (82° N) y Resolute (75° N), en esta última continúan sin interrupción las observaciones del ozono vertical y total. En 1991, la estación de Alert ha vuelto a instalarse como estación de importancia mundial de la Vigilancia Atmosférica Mundial (VAM).

En el Antártico, las observaciones del ozono comenzaron con el AGI, en 1957. Desde entonces, se han recopilado datos de ozono en 14 lugares y diversos períodos. Sólo las dos estaciones de Halley Bay (75° S) y de Faraday, en isla Argentina (65° S), que están a cargo de la British Antarctic Survey, realizan observaciones sin interrupción desde aquella época. En 1961, la NOAA comenzó observaciones del ozono en el Polo Sur y la Unión Soviética en Mirny (67° S), así como el Japón en 1966 en Syowa (69° S).** Conviene citar dos nuevas estaciones que envían sus datos regularmente: Arrival Heights (78° S) y Marombio (64° S); ésta hace también sondeos del ozono con globo, al igual que las estaciones del Polo Sur y Syowa.

Se debería recalcar que el escaso sol que hay en los meses anterior y siguiente al solsticio de invierno perjudica a las medidas realizadas en las pocas estaciones del SMOO₃ ubicadas en las latitudes polares. En esta época del año, se depende principalmente de las observaciones lunares y de sondeos ocasionales del ozono. Aún hay que aumentar

las observaciones del ozono desde el suelo, así como de sus gases precursores, especialmente en lugares como las zonas árticas de Canadá, Groenlandia, Finlandia y Rusia. Para crear un registro homogéneo, imprescindible para cualquier estudio científico riguroso, son esenciales los datos del ozono depositados en el CMDO₃ y la información sobre las calibraciones de los instrumentos, comparadas con la evolución de las temperaturas estratosféricas a 100 y a 50 hPa. Sería preferible que esta reevaluación retroactiva de los datos la hicieran los científicos que supervisan las estaciones, como solicitó el Consejo Ejecutivo de la OMM.

Régimen del ozono polar

Las medias móviles de cinco días para Tromsø desde julio de 1957 a junio de 1958, como se ve en la figura 1, son un ejemplo típico de la evolución anual del ozono total en la zona ártica. Es de señalar que de mediados de mayo a mediados de septiembre la disminución del ozono no presenta variaciones demasiado frecuentes. De octubre a diciembre, cuando se alcanzan los menores valores anuales, las perturbaciones son importantes (superiores a 100 m atm cm en el registro diario);

Continúa en página 180 ➤

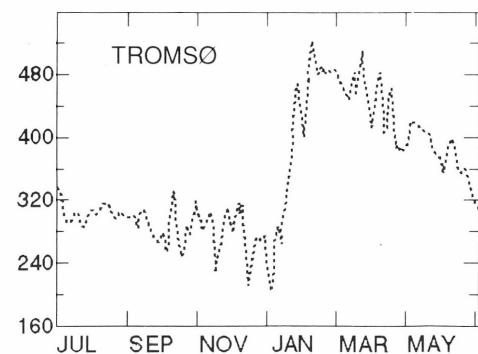


Figura 1 — Medias móviles de cinco días del ozono total en Tromsø en 1957-1958: obsérvese el fuerte aumento a partir de enero de 1958.

* Véase la nota al pie de la página 160 (Nota del editor).

** Otras muchas estaciones han hecho observaciones durante períodos cortos; se puede obtener la lista completa en el Centro Mundial de Datos del Ozono (CMDO₃), regido en nombre de la OMM por el Servicio del Medio Ambiente Atmosférico de Canadá.

El ozono: antecedentes científicos

- El ozono es una forma triatómica del oxígeno que existe principalmente en la estratosfera (el 90% del ozono total se encuentra entre 12 y 45 km), formando una capa delgada (=0,300 cm a presión normal) que protege a la superficie de la Tierra de la radiación ultravioleta, perjudicial biológicamente, y es una contribución radiativa importante a la estructura térmica de la atmósfera.
- Los CFC son compuestos químicos no reactivos creados por el hombre que, una vez liberados, pueden permanecer en la atmósfera más de 100 años. Cuando son transportados hacia arriba en la estratosfera, se fraccionan bajo el efecto de la luz ultravioleta produciendo compuestos de cloro *activos* (Cl y ClO), capaces de destruir muchas moléculas de ozono.
- Hay otros compuestos de cloro que no reaccionan con el ozono y, por tanto, son *inactivos*. El equilibrio entre las formas del cloro activas e inactivas en la estratosfera determina cuánto ozono se destruye.
- Los hidrocarburos bromados son compuestos químicos que contienen bromo, que se usan como ignífugos y que tienen un efecto destructor del ozono de la estratosfera similar a los CFC.

¿Qué ha ocurrido con el ozono total?

- En 1985, se informó por primera vez de la rápida destrucción del ozono durante la primavera antártica y se la llamó "el agujero del ozono": el 30-40% de las pérdidas del ozono total se habían producido durante el mes de octubre de cada año desde finales de los años 70. El ozono se recupera sólo después de que el vórtice estratosférico circumpolar se rompa y se restablezca un intercambio amplio de aire con las latitudes medias.
- Las medidas desde aviones de la NASA realizadas en la primavera antártica de 1987 mostraron niveles elevados de ClO, coincidiendo con poco ozono. Estas medidas, junto con otros datos de superficie, probaron que el agujero del ozono de la primavera antártica se debía al cloro y al bromo implicados en una serie de reacciones heterogéneas.
- Las medidas realizadas en la estratosfera ártica en enero y febrero de 1987 mostraron concentraciones de ClO tan altas como en la Antártida, mientras que en el período diciembre-marzo de 1992, las concentraciones de ClO medidas eran tres veces las de la Antártida. Se llegó a la conclusión de que, en ciertas condiciones, el aire estaba preparado para una destrucción importante.
- En 1988, el Panel de las Tendencias del Ozono de la NASA publicó los análisis de las medidas realizadas de 1957 a 1986 por las estaciones del SMOO3 y llegó a la conclusión de que, en el hemisferio norte, había disminuido el ozono más del 5 por ciento en el período invierno-primavera desde 40°N hacia el polo, entre 1969 y 1986.
- Las medidas desde satélite muestran pérdidas similares de ozono en todas partes fuera de los trópicos. La evaluación de 1991 muestra que estas pérdidas son mayores y más extensas en las estaciones de crecimiento de ambos hemisferios.

Causas de la pérdida de ozono en las latitudes polares

- Las temperaturas extremadamente bajas (-80°C y menores) que se dan en la estratosfera polar en invierno permiten que se formen nubes estratosféricas polares. Las reacciones químicas que tienen lugar en las gotículas de las nubes y en otras superficies de aerosoles, convierten formas inactivas de cloro en formas activas y fijan algunos compuestos de nitrógeno que normalmente sirven de amortiguadores.
- El cloro activo emitido en una estratosfera desnitrificada destruye rápidamente el ozono en presencia de la luz solar.
- Existen diferencias fundamentales entre las configuraciones de la temperatura y la circulación en el Ártico y en el Antártico, que se reflejan en pérdidas diferentes de ozono. Mientras que la situación es relativamente clara en la Antártida, muchos aspectos de lo que ocurre en el Ártico son menos ciertos, aunque se puede esperar una futura y más rápida disminución del ozono en las latitudes subpolares boreales como resultado de las concentraciones crecientes de compuestos clorados y bromados.

corresponden al desarrollo y a la trayectoria sinuosa del vórtice de la noche polar y alternan con depresiones frías internas en la estratosfera, por encima de la región en que se halla la estación. El rápido aumento del ozono en enero está relacionado con los cambios dinámicos que acompañan a los calentamientos bruscos de la estratosfera que producen una inversión temporal de la circulación estratosférica. Realmente, las variaciones térmicas anuales en la baja estratosfera, como veremos más adelante, están estrechamente relacionadas con las variaciones del ozono polar. Después de alcanzar un máximo anual, en este caso algo más temprano que en el período habitual de mayo-abril, el ozono total comienza su disminución anual, acompañada de una serie de pequeñas perturbaciones, hasta el mínimo de verano y otoño.

Aunque las variaciones anuales del ozono en la Antártida, en los años anteriores a la aparición del agujero del ozono que se produce en primavera, han tenido una evolución bastante similar, hay un desfase de unos dos meses y no se alcanzan nunca los grandes valores del Ártico. La figura 2 muestra la media mensual (antes de 1975) del ozono total en los cinturones zonales de $75 \pm 4^\circ$ norte y sur, y demuestra claramente lo dicho.

Es un hecho claro y bien sentado que en el Ártico, como en las latitudes medias de los dos hemisferios, el aumento anual del ozono suele comenzar con el solsticio de invierno o antes, y alcanza su máximo anual en los alrededores del equinoccio de primavera. Sin embargo, en el Antártico este máximo se retrasa casi dos meses; las temperaturas estratosféricas tienen una amplitud anual dos veces mayor y su aumento primaveral se desfasa también

respecto de la del Ártico. La razón principal del desfase es el predominio de un fuerte vórtice circumpolar barocílico sobre el Antártico durante el invierno y la primavera australes, lo que dificulta el intercambio de aire meridiano sistemático. Esto crea una distribución climatológica del ozono específica: una depresión aislada de ozono (no confundir con el agujero del ozono!) centrada sobre la Antártida y rodeada por una banda de bastante ozono en las latitudes medias, que persiste hasta la ruptura del vórtice en octubre o noviembre.

La mayor amplitud anual de la media mensual del ozono total se da en las proximidades de los 75° N y decrece hacia las latitudes subpolares. Es mayor sobre los sectores canadiense y siberiano que sobre los sectores escandinavos. En Spitzbergen es de unos 185 m atm cm y en Tromsø y Murmansk es de unos 165 m atm cm; en los sectores de Resolute y de Siberia es superior, al menos, en un 10 % y un 15 %, respectivamente. Antes de que apareciera el agujero del ozono, la amplitud anual sobre la Antártida era de cercade 75 m atm cm, pero durante el decenio pasado ha saltado ja unos 200 m atm cm!

La diferencia entre las circulaciones medias de las masas de aire en los dos hemisferios explica en parte las diferencias de comportamiento del ozono total entre las regiones polares de los dos hemisferios. La mayor actividad ondulatoria en el hemisferio norte, determinada por variaciones este-oeste más marcadas de la continenteabilidad y de la orografía, conduce a una inversión de masa más acusada y, por tanto, a un transporte descendente mayor del ozono a las latitudes altas. A estos efectos hay que añadir la mezcla lateral asociada a la propagación ascendente de las ondas planetarias cuando alcanzan la estratosfera.

A mitad del invierno, en el hemisferio norte, es frecuente que el vórtice polar se rompa completamente por la acción de la propagación ascendente de las ondas planetarias. Cuando ocurre esto, las partículas de aire de la baja estratosfera sufren desplazamientos a gran distancia en latitud, que son, en distinta medida, irreversibles y que pueden llevar a redistribuciones importantes de los componentes químicos, entre otros, del ozono. Las diferencias notables entre las distribuciones del ozono total, según las latitudes y las estaciones en los dos hemisferios, están

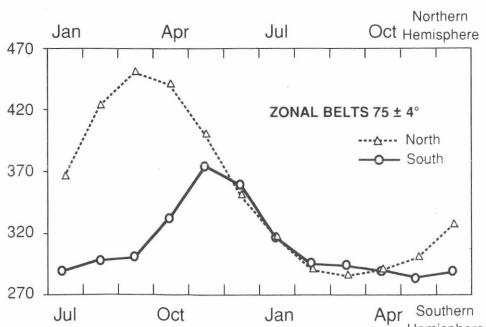


Figura 2 — Promedio del ozono total antes de 1975 sobre las dos regiones polares.

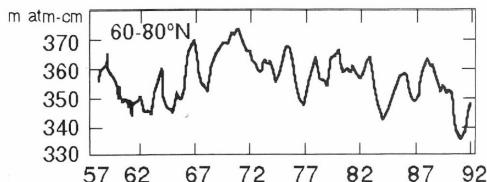


Figura 3 — Curva del ozono total en la zona comprendida entre 60° y 80° N, suavizada por las medias móviles de 12 meses para filtrar la evolución anual y resaltar las fluctuaciones de período más largo, algunas de las cuales están relacionadas con la oscilación cuasibienal (QBO). Obsérvese la tendencia decreciente del ozono desde finales de los años 60.

asociadas estrechamente al hecho de que las ondas planetarias son más intensas y extensas en el hemisferio norte y que los calentamientos son allí más importantes.

La evolución a largo plazo del ozono total sobre el cinturón comprendido entre 60° N y 80° N, determinada a partir de todas las observaciones realizadas de 1957 a 1991, se muestra en la figura 3. Un operador aplicado a las medias móviles de doce meses filtra la evolución anual y deja aparecer solamente las fluctuaciones de período más largo. Es evidente que en los últimos treinta años ha experimentado desviaciones hacia arriba y hacia abajo. A veces se intenta explicar el ozono relativamente escaso de finales de los años 50 y principios de los 60 por el gran número de pruebas con bombas nucleares que se realizaron en la atmósfera en las latitudes polares boreales. Sin embargo, la característica predominante es la disminución constante del ozono desde finales de los años 60; la tendencia real entre 1969 y 1991 es de alrededor del 8 %.

La aparición de fluctuaciones del ozono con un período casi bienal, como se puede ver en la figura 3, se ha estudiado recientemente con detalle y se las relaciona con el fenómeno de la oscilación circulatoria cuasibienal. Como promedio, cinco o seis meses después de la época en que el viento del este pasa por un máximo bien definido en la estratosfera ecuatorial, el ozono total en las latitudes polares septentrionales presenta una tendencia a una deficiencia clara. Si se comparan las desviaciones del ozono durante el invierno ártico con la fase de oscilación cuasibienal, se ve una relación muy marcada: si los vientos estratosféricos del este dominan en el ecuador, la cantidad de ozono durante el invierno ártico

es de promedio un 8 % mayor de la normal; si dominan los vientos del oeste, la cantidad presenta un déficit de alrededor del 7 %. La amplitud de las desviaciones del ozono está influida por la intensidad de la oscilación cuasibienal, la estación del ozono en el momento del cambio de fase de la oscilación cuasibienal y la interacción con las anomalías de la circulación atmosférica producidas por El Niño/Oscilación del sur (ENSO).

Finalmente, se debería mencionar que en las latitudes polares boreales el promedio de ozono en el "cinturón zonal" no tiene simetría longitudinal, especialmente en invierno y primavera. Hay regiones fácilmente identificables por encima de la Siberia oriental y de Canadá con un 20 % más de ozono, mientras que bajo el sector escandinavo es un 15 % menor. Esta asimetría longitudinal aparece también en los cálculos de las tendencias a largo plazo (véase la figura 8). En el Antártico no existe esa asimetría.

El ozono polar y las temperaturas de la estratosfera inferior.

La existencia de una fuerte correlación positiva entre el ozono total y las temperaturas de la estratosfera inferior ha sido demostrada taxativamente para las regiones polares. La conexión es la compleja relación física entre la circulación estratosférica, la temperatura y los cambios del ozono. En promedio, la advección de aire cálido en la estratosfera media se debería asociar a una advección positiva de ozono, mientras que la advección de aire frío acompañaría a una advección negativa de ozono. Además, un movimiento ascendente produce una disminución del ozono y de la temperatura, mientras que una subsidencia aumentaría ambos. Esto nos proporciona una trama útil, si bien muy simplificada. Por ejemplo, los cambios estacionales no están en fase, lo que se debe en parte a las distintas respuestas de la temperatura y del ozono al balance radiativo. Pero sus respuestas al transporte por la circulación general son bastante similares. El origen principal del aumento del ozono en primavera es el movimiento migratorio del cinturón de aire cálido de la estratosfera inferior subpolar.

La circulación meridiana media es una respuesta a la distribución desigual del calentamiento solar según la latitud y la modulación zonal debida al movimiento ondulatorio. Si la modulación ondulatoria es

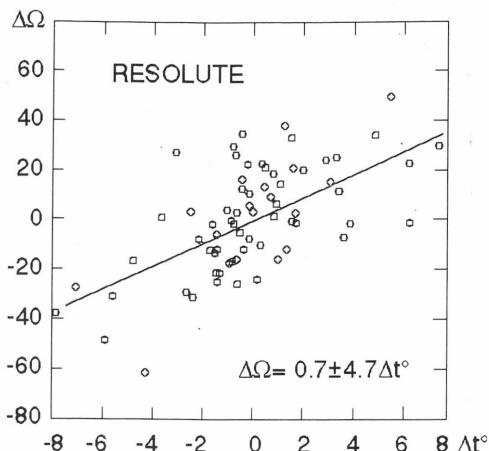


Figura 4 — Diagrama de dispersión del ozono total frente a las correspondientes desviaciones mensuales de la temperatura a 100 hPa, con relación a sus medias a largo plazo para el período septiembre-mayo. La ecuación de regresión se muestra en el lado inferior derecho. El error cuadrático medio, que proporciona una expresión numérica de la dispersión de los puntos en torno a la línea de regresión es de 17 m atm cm.

fuerte, como ocurre en el hemisferio norte durante el invierno, las temperaturas estarán relativamente alejadas de los valores determinados radiativamente. En este caso, en las latitudes altas habrá enfriamientos radiativos importantes, un movimiento descendente y un transporte de trazadores hacia abajo. Si la modulación ondulatoria es débil, en las latitudes altas las temperaturas invernales descenderán y se acercarán a los valores radiativos, la pérdida de calor radiativo será menor y el movimiento descendente será relativamente débil. Este último caso describe la situación en la baja atmósfera de la región antártica, donde

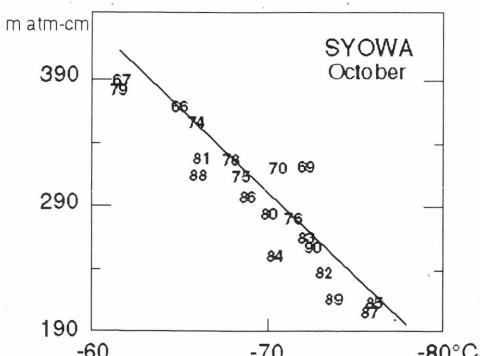


Figura 5 — Correlación positiva muy fuerte entre la media mensual del ozono total en octubre y las temperaturas a 100hPa medidas sobre Syowa (69°S).

se ha observado una reducción del ozono. En la estratosfera, se reúnen las condiciones mediante una interacción compleja entre el calentamiento radiativo, el movimiento ondulatorio en la troposfera y los procesos dinámicos dentro de la estratosfera. Los calentamientos fuertes ocasionales que se observan en el centro del invierno boreal son una prueba clara de la posibilidad de interacciones acusadas entre la propagación ascendente de las ondas planetarias y el estado medio zonal en la estratosfera.

Todas las estaciones polares, como las de las latitudes medias, muestran, en especial durante el período frío del año, un cambio bien definido del ozono total de unos 5-6 m atm cm (1,5 % a 2 %) respecto de los valores normales por cada 1 °C de desviación de la temperatura a 100 hPa respecto de la normal. El diagrama de dispersión de la figura 4 ofrece un ejemplo para el sector de Resolute durante el período septiembre-mayo.

El análisis de las temperaturas estratosféricas y de las alturas geopotenciales confirma que las variaciones del ozono de una primavera a la siguiente siguen de cerca los cambios del campo termobárico y que el aumento rápido del ozono (y de la temperatura estratosférica) en primavera depende del momento de ruptura del vórtice polar, cuando se restablecen los intercambios favorables de grandes masas de aire con las latitudes medias. Sin embargo, la aparición del agujero del ozono está causada por reacciones muy específicas de destrucción catalítica del ozono en las que intervienen el cloro y el bromo.

La figura 5 es una demostración excelente de las relaciones que existen entre las temperaturas estratosféricas muy bajas y la cantidad mensual de ozono, muy pequeña mientras dura el agujero del ozono en octubre sobre la Antártida. Los años en que la baja estratosfera está muy fría, se favorece la aparición de más nubes estratosféricas polares y son dinámicamente menos activos y el vórtice es más estable, lo que facilita una disminución del ozono más pronunciada y más persistente.

Las tendencias del ozono a largo plazo

Las diferencias en la dinámica atmosférica de los dos hemisferios producen una abundancia menor de ozono a principios de la primavera antártica que en el Ártico, lo que no debería confundirse con el fenómeno del agujero del ozono antártico. Las ondas planetarias son

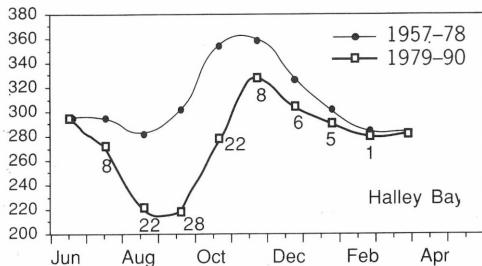


Figura 6 — La disminución del ozono, como porcentaje de las medias mensuales del período 1979-1990, en promedio para el período 1957-1958 que precedió a la aparición del agujero del ozono, en Halley Bay (75°S). Obsérvese que la evolución anual ha cambiado debido a las importantes disminuciones en septiembre, octubre y noviembre, así como las variaciones insignificantes durante los meses del verano austral.

generalmente más débiles en el hemisferio sur que en el norte. Durante el invierno polar austral, la estratosfera está más fría y el vórtice del oeste, casi simétrico, es más fuerte y más persistente que en el hemisferio norte. Estos factores influyen fuertemente en las variaciones estacionales y latitudinales del ozono en los dos hemisferios. El agujero del ozono se identifica por una disminución de la cantidad de ozono que ocurre cada año en septiembre y octubre desde hace diez años.

Las observaciones realizadas desde finales de los años 70 muestran que, de principios de septiembre a mediados de noviembre (primavera austral), el valor estacional del ozono total en la zona antártica disminuye hasta un 30 % respecto al promedio de ozono en el período 1957-1978. Esta disminución no es uniforme ni en el tiempo ni en el espacio. Durante la primera o las dos primeras semanas de octubre de los últimos años, la pérdida de ozono fue de más del 60 %. De enero a agosto, la disminución del ozono es relativamente débil: del 5 % al 7 %, comparable a las fluctuaciones de un año a otro.

La figura 6 muestra claramente que la evolución anual del ozono sobre Halley Bay, calculada para los veintidós años anteriores al agujero del ozono (1957-1978), sufre una disminución drástica durante la primavera antártica en los doce últimos años (1979-1990). Las diferencias de porcentaje entre las medias mensuales correspondientes se indican en la curva inferior e indican que las mayores pérdidas de ozono ocurren en octubre (28 %), así como en septiembre y noviembre (22 %), y que el período que va de enero a julio está

mucho menos afectado o no lo está directamente.

Durante la disminución primaveral, más del 90 % del déficit total de ozono se da entre 12 y 24 km de altura. Las observaciones por satélite indican que la mayor parte de la destrucción del ozono no se extiende apenas más allá del continente antártico; es decir, coincide con el vórtice circumpolar estratosférico del invierno antártico. Además, la disminución es más acusada en dirección hacia los polos, donde, en el mes de octubre de los últimos años, se han observado vastas regiones en las que el ozono se había reducido hasta 120 m atm cm.

La figura 7 muestra el cambio del ozono total sobre la Antártida durante el mes de octubre de los últimos treinta y cinco años, expresado por la desviación de cada año respecto de la media a largo plazo para el período 1957-1978, anterior al agujero del ozono. Dicha media a largo plazo se determina usando los datos de las cuatro estaciones en tierra del SMOO₃, que tienen registros ininterrumpidos (Halley Bay, Isla Argentina, Polo Sur y Syowa), así como los valores ponderados de las estaciones que hicieron observaciones durante algunos años a finales de los 50 y principios de los 60. La característica más marcada es la disminución drástica del ozono desde finales de los años 70, que ha llegado a ser del 40 % en cuatro de los cinco últimos años. Algunas fluctuaciones interanuales que ondulan la curva son atribuibles a las fluctuaciones de la circulación relacionadas con la oscilación cuasibienal y posiblemente afectan al momento de la ruptura del vórtice circumpolar. La fecha media de esa ruptura parece haberse desplazado desde la segunda mitad de octubre, antes del fin de los años 70, a la mitad de noviembre en el último decenio; esto prolonga el período en que las condiciones

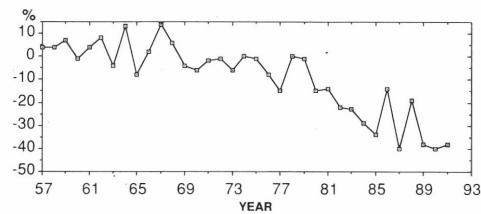


Figura 7 — Desviaciones mensuales del ozono total en octubre con relación a la media a largo plazo (1957-1958) de los datos combinados de las estaciones antárticas del SMOO3. Obsérvese la disminución drástica desde finales de los años 70, que llega a ser de -40 % en cuatro de los cinco últimos años.

meteorológicas son favorables al proceso de destrucción del ozono. En 1990, la ruptura del vórtice no se produjo hasta mediados de diciembre, y fue el año, hasta el momento, en que el período de poco ozono fue más largo.

Los sondeos del ozono en el Antártico indican una desaparición del 95 % del ozono entre 15 y 20 km de altitud durante un período corto (habitualmente la primera semana de octubre). Esos días los valores son de 120, mientras que la normal es de 320 m atm cm. El valor más bajo de ozono total registrado hasta ahora fue de 108 m atm cm en octubre de 1991. En las condiciones actuales de destrucción casi total del ozono en la estratosfera inferior, no parece que se puedan esperar valores mucho más bajos. Sin embargo, con la acumulación de cloro y bromo, es posible que los valores más bajos de ozono aparezcan más pronto y duren más de los actuales siete a quince días.

En la región ártica, también hay una disminución del ozono, importante estadísticamente, durante todas las estaciones. Sin embargo, por las razones mencionadas, ha sido mucho menor que en la Antártida: una reducción media anual del orden del 3 % durante los años 70 y de alrededor del 5 % durante los años 80. En la página 186 puede verse una tabla con cálculos precisos de las tendencias, en los que se tiene en cuenta el posible efecto de la circulación cuasibienal, el ciclo solar, las pruebas nucleares en la atmósfera, la autocorrelación dentro de las series de datos y en los que aplica un ajuste lineal al período que va de diciembre de 1969 a marzo de 1991 para algunas estaciones situadas en los alrededores de 60° N. Las tendencias se expresan en porcentaje y se

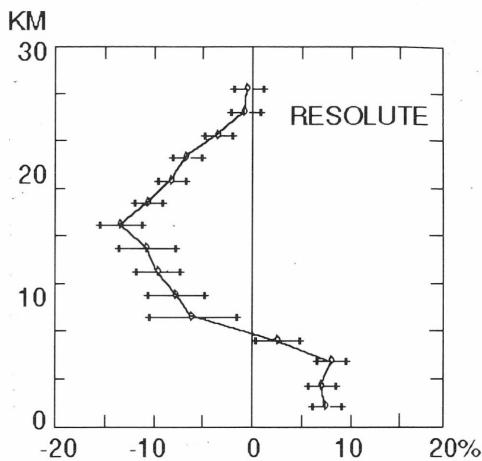


Figura 9 — Tendencias del ozono en Resolute (76°N) a partir de globos sonda de ozono (1966-1990) en % por decenio. Las barras horizontales indican un error standard 2σ respecto de los valores estimados. La disminución del ozono en la estratosfera inferior es más drástica entre 15 y 18 km y un aumento global del ozono troposférico, como vemos aquí, es típico de las latitudes medias y polares del hemisferio norte.

indica una desviación típica de 2σ respecto del valor estimado.

En los doce últimos años, en los que se dispone de datos de satélite (por ejemplo, los datos bien analizados del espectrómetro gráfico del ozono total, TOMS), las tendencias calculadas para el conjunto del territorio muestran una disminución del ozono más acusada que la media de los dos decenios pasados. Concuerdan perfectamente las tendencias calculadas a partir de las estaciones en tierra y los valores obtenidos por los TOMS a bordo de satélites. Por ejemplo, para los doce años que van de noviembre de 1979 a marzo de 1991, los porcentajes de disminución del ozono en verano, expresados TOMS/estaciones mencionadas, dan los siguientes pares de valores: Churchill, -6,7/-6,4; San Petersburgo, -4,0/-4,7, y Nagaev, -3,0/-3,9. Estas semejanzas confirman la fiabilidad de las disminuciones calculadas mediante los dos sistemas independientes de observación.

En la figura 8 se muestran, en porcentaje por decenio, las tendencias del ozono en latitudes mayores de 65° N calculadas para cada huso de 10° de longitud para las dos temporadas principales: invierno-primavera (diciembre, enero, febrero, marzo) y verano (mayo, junio, julio, agosto). Aunque la tendencia media zonal es del 5 % al 6 % en el último

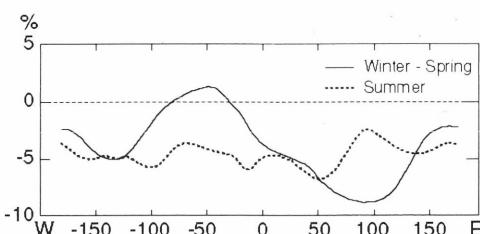


Figura 8 — Tendencias del ozono total (en % por decenio) deducidas de las observaciones TOMS (1978-1990) sobre los 65°N y para cada 10° de longitud para el período invierno-primavera (DEFM) y el verano (MJJA). Se observa una asimetría longitudinal muy pronunciada en el período invierno-primavera (Fuente: Xufeng Niu y otros, 1992).

decenio, los satélites han revelado, especialmente en la temporada invierno-primavera, la existencia de una fuerte asimetría zonal que probablemente está relacionada con las particularidades de la circulación polar, como ya se dijo. Esta asimetría zonal está confirmada también por las estaciones en tierra situadas en longitudes próximas, como Reykjavik (64° N, 22° W), cuya tendencia invierno-primavera es insignificante ($-0,2 \pm 1,4$), y lo mismo indican los TOMS.

Finalmente, en el sector canadiense de la región polar y subpolar hay dos estaciones, Resolute y Churchill, que han hecho sondeos ininterrumpidos de ozono con globos y que proporcionan así un conocimiento inestimable de las variaciones del ozono en el plano vertical. En la figura 9 se muestran, en porcentaje por decenio, las tendencias del ozono a diversos niveles, desde las proximidades del suelo hasta unos 28 km de altitud, calculadas a partir de los sondeos de ozono efectuados entre 1966 y 1990. Se ha tenido cuidado de calibrar y ajustar los instrumentos de medida del ozono total para que sean homogéneos los registros, que se componen de datos procedentes de los dos tipos de sondas. Las barras horizontales indican el error típico 2σ respecto de los valores estimados. La división en dos regímenes diferentes de variación del ozono, un aumento en la troposfera de $8,0 \pm 2,5$ % por decenio y una disminución más acusada en la baja estratosfera, es también característica de todas las otras estaciones de sondeo de ozono situadas en las latitudes medias y altas del hemisferio norte. La troposfera sólo contiene alrededor del 10 % de la cantidad total de ozono; por tanto, un aumento del ozono troposférico, aunque fuese importante para producir un calentamiento en superficie, sólo podría compensar algo menos del 1 % de la pérdida del ozono total que ha habido al disminuir el ozono de la estratosfera. Esta disminución del ozono estratosférico es más significativa entre los 10 y los 19 km de altitud; las mayores disminuciones, de alrededor del 12 y del 14% por decenio, se han observado, respectivamente, en Resolute y Churchill entre los 15 y los 18 km de altitud.

Química de la estratosfera polar

Para comprender bien la disminución del ozono, se deberían revisar brevemente los aspectos pertinentes de la química de la estratosfera

polar. Para explicar el agujero del ozono se propusieron, a mediados de los años 80, algunas hipótesis, incluyendo la química de los hidrocarburos halogenados, la química del nitrógeno asociada al ciclo solar y los efectos dinámicos. Mientras tanto, las observaciones han llevado a excluir la hipótesis de ciclo solar del nitrógeno y a aceptar los efectos dinámicos sólo como un factor que limita la intensidad y la duración del vórtice polar, mientras que un amplio abanico de medidas y estudios de laboratorio son consecuentes con los conceptos generales de la teoría de los hidrocarburos halogenados. Esta teoría se basa en las observaciones de concentraciones elevadas de cloro activo paralelamente a la aparición general de nubes estratosféricas polares en la estratosfera inferior, extremadamente fría, de la Antártida. Estas proporcionan superficies sobre las que pueden producirse reacciones químicas heterogéneas que lleven a la destrucción del ozono.

La frecuencia de las nubes estratosféricas polares en el Antártico es de 10 a 100 veces mayor que en el Ártico. Aparecen cuando hay una variación clara de la oscilación cuasibienal, con un máximo durante septiembre-octubre en los años de fase oeste de dicha oscilación. Las nubes estratosféricas polares pueden influir también en el balance radiativo de la estratosfera polar inferior, y por tanto, afectar a la circulación media y a las distribuciones del ozono.

Los estudios de laboratorio sugieren que algunas nubes estratosféricas polares están formadas por ácido nítrico y agua y que se condensan a temperaturas considerablemente mayores que el punto de congelación. Cuando se enfrié la estratosfera, las nubes de este tipo serán las primeras en formarse, mientras que las nubes de hielo sólo se formarán a temperaturas inferiores. Los estudios de campo han demostrado que las primeras contienen cantidades importantes de nitratos.

Los estudios de laboratorio también han puesto de manifiesto que las reacciones en las que intervienen óxidos de nitrógeno y compuestos de cloro de vida relativamente larga (tales como el ClONO_2 y el HCl) pueden tener lugar en las superficies de las nubes. Estas reacciones convierten los depósitos de cloro relativamente inerte en substancias reactivas que bajo la acción de la luz se descomponen rápidamente, liberando radicales libres de cloro que pueden destruir el ozono.

Cálculos de las tendencias

	<i>anual</i>	<i>diciembre-marzo</i>	<i>mayo-agosto</i>	<i>sept-noviembre</i>
Churchill	$-3,4 \pm 0,5$	$-4,3 \pm 0,8$	$-3,2 \pm 0,6$	$-2,4 \pm 0,8$
San Petersburgo	$-3,1 \pm 0,5$	$-4,5 \pm 1,1$	$-1,8 \pm 0,6$	$-2,5 \pm 0,8$
Nagaevó	$-3,4 \pm 1,0$	$-2,5 \pm 1,1$	$-4,6 \pm 1,2$	$-1,8 \pm 2,0$

Estas reacciones fijan también óxidos de nitrógeno en las sustancias de larga vida, HNO_3 , y por lo tanto retardan la formación de depósitos de cloro tales como el ClONO_2 . Esto hace que se mantengan grandes cantidades de radicales libres del cloro y la consiguiente destrucción rápida del ozono durante períodos notablemente más largos que si las reacciones heterogéneas hubieran afectado solamente a la composición de las sustancias cloradas. Tanto la luz solar como las temperaturas extremadamente bajas son necesarias para acelerar la pérdida de ozono.

Una vez liberado, el cloro forma rápidamente monóxido de cloro, que a continuación puede formar parte de varios ciclos catalíticos de destrucción del ozono donde cada átomo de cloro podría potencialmente destruir miles de moléculas de ozono. Esto supone la formación del dímero del monóxido de cloro, así como reacciones del ClO con el monóxido de bromo (BrO), radicales hidroperoxilos y oxígeno atómico.

Ya en la evaluación del ozono de 1989 (Informe del Ozono de la OMM nº 20, 1989) se destacó el mayor potencial del bromo que del cloro para destruir el ozono estratosférico. Esto se debe a que, aproximadamente, el 50 por ciento del bromo disponible está en fórmulas reactivas (Br y BrO) mientras que el cloro sólo está en la forma reactiva ClO en un porcentaje pequeño. Sin embargo, el BrO reacciona principalmente por sinergía con el ClO en el ciclo catalítico rápido ya mencionado, que destruye el ozono, aún en ausencia de átomos de oxígeno. Finalmente, la catálisis por el bromo es más eficaz en la estratosfera inferior, en donde la concentración de ozono es la mayor.

Las observaciones del ClO y del BrO en la Antártida han proporcionado una prueba crítica de la teoría de la intervención de los hidrocarburos halogenados en la destrucción del ozono. Las medidas *in situ* y a distancia efectuadas usando técnicas independientes, han demostrado que la cantidad de ClO cerca

de los 20 km de altitud es del orden de 1 ppbv en el vórtice antártico durante septiembre, juntas 100 veces más que las predicciones teóricas que no incluyen la química heterogénea! Sin embargo, estas elevadas cantidades de ClO están de acuerdo, en general, con los resultados de los modelos que tienen en cuenta la química, la frecuencia y la duración probable de las nubes estratosféricas polares. Aunque existen diferencias de detalle entre estos estudios, todos señalan que la mayor parte de la pérdida de ozono observada (60 a 100%) se puede explicar por las cantidades de ClO y BrO observadas utilizando las medidas actuales de velocidad de reacción. Durante los años en que fue menor la disminución del ozono en el Ártico y en el Antártico (como 1988), se calculó que la química del bromo había sido más importante.

Se debería mencionar que existen pruebas firmes de que las erupciones volcánicas desempeñan un papel indirecto en el proceso de destrucción del ozono, cuando las escorias y los gases alcanzan la estratosfera: las erupciones de El Chinchón (1982) y del monte Pinatubo (1991) enriquecieron el contenido de aerosoles estratosféricos y así, probablemente, facilitaron la mayor destrucción del ozono por las reacciones heterogéneas del cloro y del bromo durante uno o dos años después.

Una amplia gama de medidas subsidiarias en ambas regiones polares apoyan y amplían nuestra confianza en conocer los cambios en la composición de la fase gaseosa causados por las nubes estratosféricas polares. En el Antártico, la desnitrificación es especialmente importante ya que controla la cantidad de óxidos de nitrógeno que permanecen después de la desaparición de las nubes estratosféricas polares y, por lo tanto, como se mencionó anteriormente, afecta a la velocidad con que vuelven a formarse depósitos de cloro.

En la estratosfera ártica se han obtenido medidas químicas similares. La disminución observada de NO_2 se relaciona cualitativamente

con los aumentos de las cantidades de HNO_3 , lo que indica mecanismos de supresión del óxido de nitrógeno sin desnitrificación (diferente de lo que se observó en el Antártico). Un aumento como éste podría ocurrir, por ejemplo, mediante reacciones heterogéneas y la posterior evaporación de las nubes. En los inviernos de 1989 y 1991/1992 se observaron dentro del vórtice polar ártico concentraciones de ClO tan elevadas como 1,0 y 1,5 ppbv, respectivamente. Las cantidades de ClONO_2 en aumento y las cantidades de HCl y NO_2 en disminución en la columna atmosférica indicaron que la importancia de la química heterogénea era similar a la de la Antártida.

No hay aún una prueba concreta de que haya pérdidas importantes de ozono en el Ártico. Se podría esperar que ocurrieran disminuciones del ozono fácilmente detectables si se mantuvieran las altas concentraciones de ClO tan sólo tres o cuatro días con aire frío y soleado. La dinámica del vórtice durante los inviernos de 1989 y 1991/1992 limitó probablemente estas condiciones, y es posible que sea así la mayor parte de los períodos invierno/primavera del hemisferio norte; pero, no obstante, las regiones polares boreales están expuestas a una destrucción importante del ozono.

El futuro del ozono polar

Basándose en las observaciones y en la simulación de los modelos, se aceptó que el primer agujero del ozono de la primavera antártica apareció cuando las cantidades de cloro total excedieron aproximadamente 1,5 a 2 ppbv. Actualmente superan las 3,6 ppbv y el Informe nº 25 de la OMM sobre el ozono prevé que a mediados de los años 90 excederá de 4,1 ppbv y, probablemente, continuará aumentando durante otro decenio.

Suponiendo que no hay cambios en la temperatura, ni en la dinámica atmosférica ni en los procesos fotoquímicos, este umbral de 2 ppbv proporciona una indicación de la cantidad de cloro total que no se debe sobrepasar si se pretende que los niveles del ozono total de la Antártida vuelvan a aproximarse a su estado

natural en el siglo próximo. Aun haciendo más estricto el Protocolo de Montreal, esto no se podría lograr antes de mediados del siglo próximo.

Por lo tanto, la disminución del ozono polar depende en gran parte del uso que la humanidad haga de los hidrocarburos halogenados, aunque también pueden contribuir otros factores. Frente a este efecto de calentamiento del suelo, el aumento de las concentraciones del dióxido de carbono pueden enfriar la estratosfera, afectando quizás a la duración y a la extensión geográfica de las nubes estratosféricas polares en ambos hemisferios. Los posibles cambios de la concentración del metano y el óxido nitroso atmosféricos pueden también afectar a los procesos relacionados con la disminución del ozono en general y al agujero del ozono de la Antártida, en particular.

La cantidad actual de cloro en la estratosfera procede de los clorofluorocarbonos que tienen una permanencia en la atmósfera de unos 50 a 100 años, y de aquí que el agujero del ozono y los procesos de destrucción del ozono en las latitudes medias persistan probablemente durante muchos decenios, aun cuando se interrumpiese toda la producción inmediatamente. Peor aún, aumentará más la cantidad de cloro, incluso después de una disminución progresiva de los CFC de aquí al año 2000 (como está ya estipulado en la Enmienda de Londres al Protocolo de Montreal). Como consecuencia, se espera que la duración de los episodios de disminución del ozono en las latitudes polares y su intensidad sobre las latitudes medias sean mayores que hasta ahora. Hay gran preocupación en la mayoría de los científicos acerca de que, si el Protocolo de Montreal no se hace más estricto, por ejemplo, disminuyendo progresivamente los CFC para el año 1995/1996 a fin de moderar el aumento de la cantidad de cloro, seguirán siendo muchos más los decenios en los que no sólo aparezca el agujero del ozono sino que también se produzcan destrucciones más importantes del ozono en las latitudes medias de ambos hemisferios, norte y sur.
