

Referencias

- BEDRITSKY, A. I., 1999: El impacto del tiempo y del clima en el desarrollo económico sostenido, *Boletín de la OMM*, 48 (2), págs. 214-221.
- BEYSSON, J. P., 1997: Valor económico de la meteorología, *Boletín de la OMM*, 46 (3), págs. 273-277.
- BNJST (Bangladesh-Nepal Joint Study Team); 1989: *Report on Flood Mitigation Measures and Multipurpose Use of Water Resources*, Government of the People's Republic of Bangladesh and His Majesty's Government of Nepal, 89 páginas.
- CORNFORD, S. G., 1996: Consecuencias humanas y económicas de los fenómenos meteorológicos durante 1995, *Boletín de la OMM*, 45 (4), págs. 365-382.
- CORNFORD, S. G., 1997: Impactos humanos y económicos de los fenómenos meteorológicos en 1996, *Boletín de la OMM*, 46 (4), págs. 407-427.
- CORNFORD, S. G., 1998: Consecuencias humanas y económicas de los fenómenos meteorológicos en 1997, *Boletín de la OMM*, 47 (4), págs. 431-448.
- DE, U. S., 1996: Tropical Cyclone and Storm Surge hazard assessment. Comunicación presentada en la 23.^a sesión del Seminario del Grupo OMM/CESAP sobre Ciclones Tropicales: Evaluación de riesgos meteorológicos e hidrológicos. OMM PCT-40, TD Núm. 761.
- DE, U. S. y K. S. JOSHI 1998: Las catástrofes naturales y sus impactos en los países en desarrollo, *Boletín de la OMM*, 47 (4), págs. 392-399.
- DE, U. S., 1999 (a): Economic benefits of meteorology. Comunicación presentada en el Simposio nacional sobre meteorología tropical — La meteorología más allá de 2000, en Chennai, India, 16-19 de febrero.
- DE, U. S., 1999 (b): Climate Change Impact: Regional Scenario. En preparación.
- DE, U. S., 2000: A survey of climate related matters with special reference to climate impact assessment. Grupo de Trabajo de la AR II de la OMM sobre asuntos relacionados con el clima.
- JAYANTHI, N. y A. K. SEN SARMA, 1986: A catalogue of storm surges in India, Informe Científico Prepublicado Núm. 86/1, Departamento Meteorológico de la India.
- LIMBERT, D. W. S., 1995: Consecuencias humanas y económicas de los fenómenos meteorológicos durante 1994, *Boletín de la OMM*, 44 (4), págs. 364-375.
- MARTSON, R., J. KLEINMAN y M. MILLER, 1996: Geomorphic and forest cover controls on monsoon flooding, central Nepal. *Himalaya Mountain Research and Development*, 16, págs. 257-264.
- MAUNDER, W. J., 1970: *The value of weather*. Methuen and Co. Ltd., Londres.
- NICHOLLS, R. J., N. MIMURA y J. C. TOPPING, 1995: Climate change in south and south-east Asia: some implications for coastal areas. *Journal of Global Environmental Engineering*, 1, págs. 137-154.
- SIVAKUMAR, M. V. K., 1998: Meeting User Requirements — Recent Developments and Future Challenges. *Proceedings of User Requirements for Agrometeorological Services*, págs. 36-52.
- UNGAR, S., 1999: Is strange weather in air? A study of US national network news coverage of extreme weather events, *Climate Change*, 41, 2, págs. 133-150.
- ZILLMAN, J. W., 1999: El Servicio Meteorológico Nacional, *Boletín de la OMM*, 48 (2), págs. 158-194.

Ozono estratosférico y sus consecuencias sobre el cambio climático

Por Marie-Lise CHANIN *

Introducción

El problema de la destrucción del ozono estratosférico fue planteado hace tres décadas por Paul Crutzen, que señaló la destrucción catalítica de ozono por óxidos de nitrógeno, mientras que Sherry Rowland y Mario Molina postularon consecuencias similares originadas por los compuestos de cloro. Los acontecimientos demostraron que tenían razón y su trabajo se aplaudió justamente. Sin embargo, tenían lugar procesos químicos que resultaban imposibles de imaginar. El importante descubrimiento del agujero de ozono antártico en 1985 no había sido previsto y su explicación implicaba que hubiera un tipo de química diferente, llamada química heterogénea, que tampoco había sido prevista y que actúa sobre las partículas. Susan Solomon **, que jugó un importante papel en la explicación del agujero de ozono antártico, recibió hace

poco la Medalla Nacional de la Ciencia de Estados Unidos por su trabajo.

Durante mucho tiempo, se pensaba que la estratosfera estaba más allá del campo de la meteorología y que era irrelevante para los temas relacionados con el clima. No obstante, el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) lleva ya ocho años estudiando la posible influencia de la estratosfera sobre el clima y el Proyecto SPARC (Procesos Estratosféricos y su Función en el Clima) es uno de sus componentes. La autora co-preside este proyecto con Marvin Geller desde 1992.

* Copresidenta del Proyecto SPARC, Directora de Investigación del CNRS, Servicio de Aeronomía, Verrières-le-Buisson, Francia.

** Véase la entrevista del Boletín de este número, que empieza en la página 7 (Ed.).

La comunidad meteorológica ha seguido sin duda los acontecimientos de interés para los científicos estratosféricos durante las últimas décadas. Por ello, este artículo sólo apunta brevemente los hechos históricos, a la vez que describe el estado actual del ozono estratosférico identificando las razones de los cambios en la estratosfera. Se presta especial atención a las consecuencias que tienen las perturbaciones que se han producido en la estratosfera, y su importancia para los intereses actuales de nuestra sociedad. La conclusión contiene predicciones para el próximo medio siglo. Tiene en cuenta el

hecho de que se han tomado medidas para detener la producción de clorofluorocarbonos (CFC), que son la principal causa de la destrucción, de que el ozono no es el único elemento que cambia en la atmósfera y de que no se pueden obviar las perturbaciones ya observadas en cuanto a la temperatura y al vapor de agua al evaluar el futuro del ozono estratosférico.

Estado actual de la capa de ozono

Lo primero de todo, debería tenerse en cuenta que el 90 por ciento del ozono atmosférico está en la estratosfera y que el incremento actual de ozono troposférico, que es de vital importancia debido a su contribución al efecto invernadero, no compensará en conjunto las pérdidas observadas a altitudes más altas.

La Figura 1 resume las tendencias observadas en tres regiones críticas del mundo, mostrando la cantidad de ozono integrado en una columna vertical conocida como ozono total y medido en unidades Dobson:

- En el Antártico, donde ha sido mayor la reducción de ozono, se observó, entre finales de los años 70 y estos últimos años, una clara disminución del ozono total de más del doble en octubre.
- La menor reducción primaveral del ozono (del 25 por ciento) sobre el Ártico sólo se manifestó desde 1980, y los valores del ozono en esta región muestran una variabilidad interanual mayor debido a la inestabilidad del vórtice polar. Las medidas tomadas en abril de 2000 confirman que este fenómeno sigue presente.
- Las observaciones en latitudes medias del hemisferio norte son las más numerosas y en Europa se remontan a 1920. Después de una estabilidad relativa durante cuatro décadas, se ha observado desde los años 70 una disminución del ozono total de alrededor del 5 por ciento por década, de acuerdo con los promedios anuales.

Es importante saber a qué altitudes se está destruyendo el ozono. La última valoración de la distribu-

ción vertical de esta disminución procede del trabajo combinado llevado a cabo por el Proyecto SPARC y por la VAG (Vigilancia de la Atmósfera Global). La disminución de la concentración de ozono se encuentra principalmente alrededor de altitudes de 15 km y 40 km (Informe SPARC N.º 1, Harris y otros, 1999).

Las causas de la destrucción de ozono

Actualmente se han identificado con suficiente claridad las causas de la destrucción del ozono. La primera y más importante corresponde a los compuestos de cloro derivados de los CFC. Medidas *in situ* a bordo de aeronaves confirman la perfecta coincidencia espacio-tiempo entre la presencia de cloro en forma de monóxido de cloro y la reducción de ozono tanto sobre el Antártico como sobre el Ártico.

De todas formas, incluso aunque el cloro siga siendo la causa principal de la destrucción del ozono polar, las reacciones que explican de forma simultánea cambios a distintas latitudes y altitudes ponen en juego dos tipos de fenómenos. Las reacciones químicas en fase gaseosa con óxidos de nitrógeno y de cloro, como predijeron Crutzen, Rowland y Molina, son en gran parte responsables de la destrucción de ozono a altitudes altas (40 km) y a latitudes medias. Se muestran de forma simplificada en la Figura 2. Sin embargo, hay un factor que hace más lento los efectos destrutivos de los óxidos de nitrógeno o de bromo y que

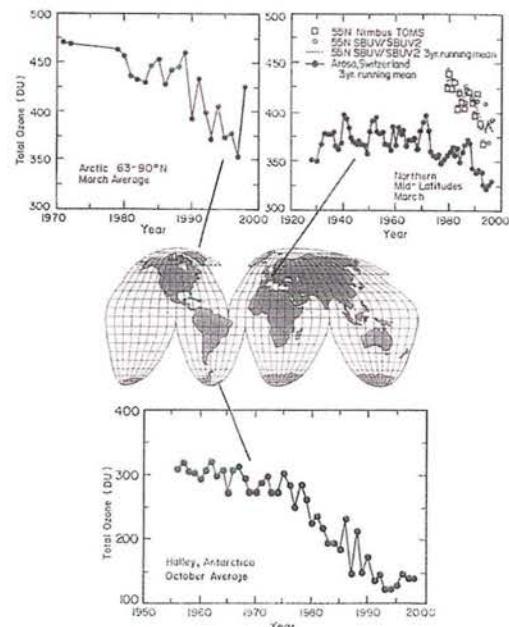


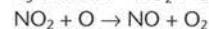
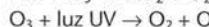
Figura 1 — Tendencias observadas del ozono total (en unidades Dobson) para el Ártico, para latitudes medias y para el Antártico (Solomon, 1999).

tiene lugar cuando cualquiera de ellos está presente por sí solo en la atmósfera. Este factor es la presencia simultánea de compuestos de nitrógeno, de cloro, hidrogenados o de bromo que favorece la formación de compuestos "de reserva", ClONO, HO₂NO₂, BrONO₂, que limitan la destrucción del ozono por medio de las reacciones catalíticas anteriores.

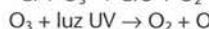
No obstante, la destrucción de ozono, que a veces es total alrededor de 15-20 km, como se ha observado en las regiones polares, se debe a reacciones químicas heterogéneas que se producen en presencia de las nubes estratosféricas polares (NEP). En los últimos años ha crecido el conocimiento sobre la naturaleza de estas NEP. Se han identificado ahora tres tipos distintos de NEP: sulfatadas, nitrogenadas o acuosas, que se forman a temperaturas que varían entre 188 K y 195 K. Para que tengan lugar estas reacciones se necesita una temperatura muy baja y la presencia de flujo solar ultravioleta (UV). Lo último implica que dichas reacciones no pueden producirse sin radiación solar. La Figura 3 resume las distintas etapas de la destrucción de ozono: la formación de las NEP, la activación de los compuestos de cloro y la formación de monóxido de cloro (ClO), que origina la destrucción catalítica del ozono. El hecho de que se necesiten temperaturas muy bajas para que se formen las NEP explica que la destrucción de ozono se produzca principalmente sobre los casquetes de hielo polar y la diferencia entre el Ártico y el Antártico. La estabilidad del vórtice sobre el Antártico mantiene la temperatura lo suficientemente fría durante meses, permitiendo la presencia casi constante de las NEP. Esto produce la destrucción completa del ozono en la zona en la que están situadas las NEP, entre 15 y 20 km, al final del invierno.

La gran variabilidad del vórtice sobre el Ártico hace que la temperatura sea más inestable y la destrucción de ozono es, por lo tanto, difícil de predecir durante el invierno y de un año para el siguiente. Durante algunos años, como 1999, no se observó una destrucción importante del ozono sobre el Ártico. De todas formas, durante algunos inviernos, como el de 1997, apareció en el Ártico un verdadero agujero de ozono, pero su tamaño todavía no era comparable con el del Antártico. La Figura 4 muestra seis ejemplos de reducción de ozono, tres sobre el Ártico y tres sobre el Antártico durante sus primaveras respectivas. Mues-

Ciclo catalítico con NO₂:



Ciclo catalítico con Cl:



Pero con el ClO y con otros compuestos halógenos, el NO_x produce la formación de compuestos de reserva que hacen más lento el proceso de destrucción:

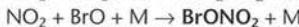


Figura 2 — Reacciones en fase gaseosa de la destrucción del ozono estratosférico

tra claramente que la destrucción del ozono, que alcanzó un máximo sobre el Ártico en marzo de 1997, corresponde a un valor total de ozono de alrededor del doble del que se produce todos los años sobre el Antártico durante septiembre. La Figura 5, que sólo se refiere al Ártico, confirma la gran variabilidad de la cantidad de ozono y muestra altos niveles de destrucción durante la primavera, cuando la temperatura dentro del vórtice ha sido especialmente fría durante el invierno, como sucedió en 1997.

Las consecuencias de la reducción del ozono estratosférico para el clima y para la sociedad

La consecuencia más evidente es el aumento de la radiación UV que llega a la superficie terrestre. De todas formas, a pesar de las observaciones del flujo de UV que alcanza la superficie, en particular las provenientes de la red creada por la VAG, es difícil interpretar los resultados, ya que otros parámetros interrumpen la transmisión de los rayos UV a través de la atmósfera, como la polución, la cubierta de nubes y la abundancia de aerosoles. Estas perturbaciones también pueden variar con el tiempo, y hay que hacer correcciones a los datos de UV para obtener las tendencias de UV. De todas formas, las medidas tomadas en el Antártico y en otras latitudes muestran claramente la relación existente entre el aumento de los UV y la reducción del ozono. Los efectos de la reducción del ozono sobre el flujo de UV que puede afectar a la salud de las personas, o a la vegetación, dependen de la estación y de la latitud. Varias regiones del mundo, en especial en el hemisferio sur, están en estado de alerta cuando el vórtice polar se rompe (Australia, América del Sur y Sudáfrica). De todas formas, no es raro que se produzcan situaciones de alarma al final de la primavera en el hemisferio norte, en especial en altitudes altas.

Otra consecuencia de la reducción del ozono se debe al papel de éste en el balance calorífico de la at-

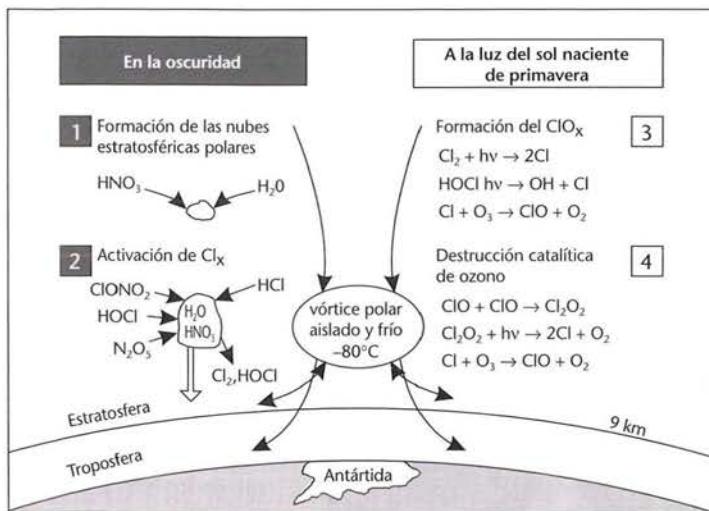


Figura 3.—Distribución esquemática de los procesos meteorológicos y químicos que conducen a la formación del agujero de ozono sobre el continente antártico

mósfera. Al absorber la radiación solar UV, el ozono contribuye al calentamiento estratosférico, y al absorber los rayos infrarrojos de la superficie terrestre, también atrapa calor en la troposfera. Las consecuencias sobre el forzamiento radiativo superficial son inmensas, ya que el cambio en la concentración de ozono se produce cerca de la tropopausa. La reducción del ozono estratosférico contribuye a un forzamiento radiativo superficial negativo en la región de $0,1 \text{ W m}^{-2}$, que se reconoce que es bajo comparado con el forzamiento radiativo originado por el incremento de los gases de efecto invernadero ((GEI), $2,5 \text{ W m}^{-2}$). Sin embargo, podríamos predecir, por lo tanto, que una vuelta a la situación anterior al agujero de ozono provocaría una aceleración del aumento de la temperatura superficial debido a los GEI durante las próximas décadas.

El Protocolo de Montreal y sus enmiendas sucesivas

La decisión tomada en 1985 para limitar y después detener la producción de CFC y, consiguientemente, sus emisiones, se podría tomar como un modelo para muchos problemas vinculados con el medio ambiente provocados por actividades humanas. Aunque la situación del ozono es más sencilla que la de otros muchos problemas existentes, demuestra de forma clara las ventajas de aplicar el principio de precaución. De hecho, los esfuerzos colectivos realizados durante los últimos 15 años ya han empezado a provocar una disminución de la cantidad de cloro en la estratosfera, y podrían restablecer la situación que reinaba sobre el Ártico antes de que apareciera el agujero de ozono. De todas formas, se tardaría medio siglo en volver a la concentración de cloro anterior a la formación del agujero de ozono. En primer lugar,

esto se debe al tiempo de vida de los CFC que, dependiendo de los tipos de compuesto, es de entre 50 y 100 años y, además, les cuesta años alcanzar la estratosfera y cubrir toda la Tierra. De todas formas, se producen simultáneamente otros cambios en la composición de la atmósfera que aumentan más este lapso de tiempo, como se explica abajo.

Predicciones futuras

Las predicciones futuras deben tener en cuenta otros cambios que se producen en la atmósfera, en especial en la troposfera superior y en la estratosfera. Además de la destrucción de ozono, los mayores

cambios son el aumento de los gases de efecto invernadero y, de forma más específica, el aumento de vapor de agua y el enfriamiento resultante. De hecho, todos estos cambios se combinan para producir enfriamiento estratosférico. El aumento de los gases de efecto invernadero tiene efectos opuestos sobre la estratosfera y sobre la troposfera. El aumento de vapor de agua en la estratosfera se valoró hace poco bajo el Proyecto SPARC y se encontró que estaba entre un 1 por ciento y un 2 por ciento anual (SPARC N.º 2; Kley y otros, 2000; Oltmans y otros, 2000). Este aumento se debe en parte a la oxidación del metano, que se sabe que aumenta en la troposfera como consecuencia de las actividades humanas. De acuerdo con estudios recientes, parece que la reducción de ozono, el aumento de los gases de efecto invernadero y el aumento del vapor de agua son tres fenómenos que se han combinado para dar lugar a un enfriamiento de la estratosfera (Forster y Shine, 1999; Shindell y otros, 1998 (a) y (b)).

Se ha observado el enfriamiento estratosférico a todas las altitudes entre la tropopausa y 70 km. Esto se demostró en el trabajo llevado a cabo en el SPARC y publicado en la Valoración Científica de la OMM y del PNUMA sobre la Reducción de Ozono (Chanin y Ramaswamy, 1998) más reciente.

El enfriamiento originará un aumento de la abundancia y de la persistencia de las NEP y una intensificación de las reacciones químicas heterogéneas que destruyen el ozono, incrementando, de esta forma, el tiempo necesario para que la capa de ozono vuelva a la normalidad. Los modelos actuales de predicción muestran que, en 2015, tanto en el Ártico como en el Ártico, los agujeros de ozono serán mayores que los actuales y sólo se volverá a la situación an-

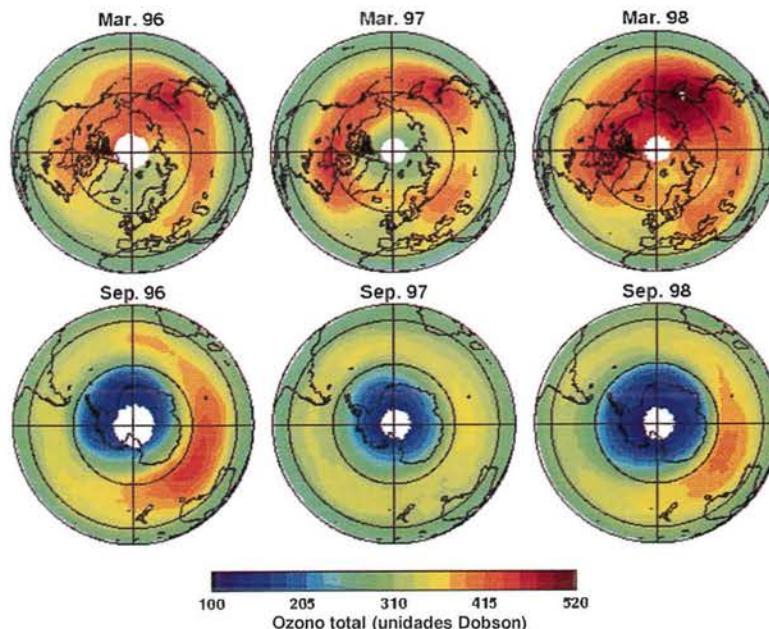


Figura 4 — Mapas obtenidos usando TOMS, que representan la cantidad de ozono total desde la primavera de 1996 hasta 1998, que aumentó sobre el Ártico y disminuyó sobre el Antártico (documento de la NASA, por cortesía de Phil DeCola)

terior a finales de siglo (Capítulo 12 del Informe de la OMM y del PNUMA, 1999).

Necesidades de observación y de control

Hay que vigilar la capa de ozono para observar los resultados de esta compleja interacción entre los cambios que se producen en la atmósfera y para identificar el momento en que se dará la vuelta a la situación actual. La vigilancia debe abarcar tanto el contenido total para la evaluación de las consecuencias sobre el UV en la superficie terrestre, como el perfil vertical de la concentración para identificar el mecanismo implicado.

Para esto se necesitan observaciones superficiales continuadas, como las medidas tomadas usando la red VAG y la red NDSC (Red para la Detección del Cambio Estratosférico), creada más recientemente. Hay que ha-

cer notar que hasta ahora, las medidas de superficie han ofrecido información fidedigna con respecto a las variaciones a largo plazo. Sin embargo, el control por satélite es irreemplazable para obtener una visión global de los distintos fenómenos. Se dará un gran paso, en especial para la asimilación de estos datos por los modelos, con el uso de instrumentos más precisos en los ENVISAT y en los EOS, que también ofrecen la distribución vertical del ozono y de los componentes que juegan algún papel en el equilibrio de la composición atmosférica.

Conclusión

En la actualidad, la estratosfera reviste un interés para los expertos en meteorología y en climatología. Actualmente, los modelos de predicción climatológica representan a la estratosfera con una resolución mejor y son cada vez más informativos. En este informe he demostrado lo difícil que es hoy permanecer ajeno

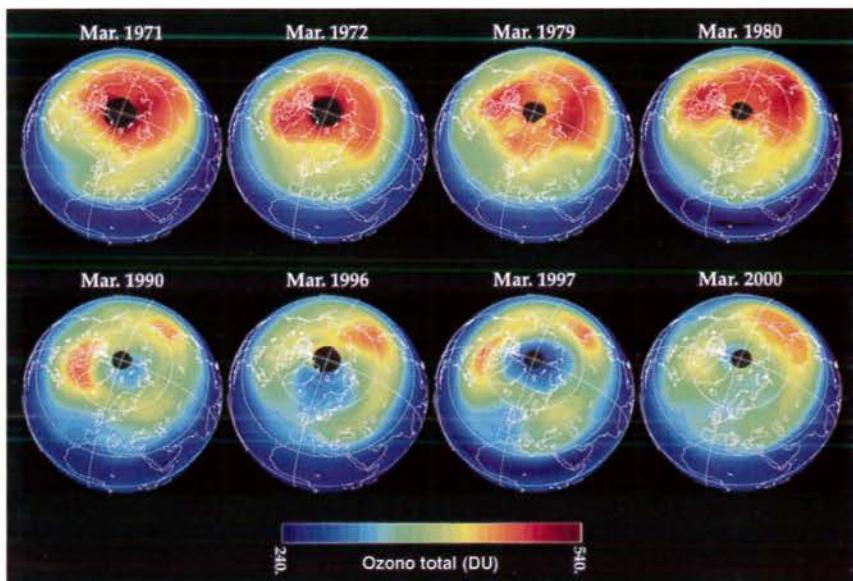


Figura 5 — Mapas del ozono total sobre el Ártico desde 1971 hasta marzo de 2000, cuando la reducción de ozono es más frecuente. Desde 1980, se ha observado la disminución del ozono y su variación interanual (documento de la NASA, por cortesía de Phil DeCola)

a las influencias mutuas que puede tener la estratosfera sobre el clima, de un lado, y a la forma en que los cambios de la troposfera influyen en las variaciones del ozono estratosférico, por otro. Para concluir, me gustaría mencionar las nuevas ideas relacionadas con la posible conexión entre la dinámica estratosférica y las oscilaciones observadas en los fenómenos climáticos (me refiero a la posible relación entre la Oscilación Ártica y la Oscilación del Atlántico Norte). Si se confirman estas ideas, la relación entre estas dos regiones de la atmósfera sería mucho más fuerte de lo que nos imaginábamos en el pasado. De todas formas, esto es todavía sólo una hipótesis que hay que confirmar.

Referencias

- CHANIN, M.-L. y V. RAMASWAMY, 1999: Trends in stratospheric temperatures. WMO/UNEP Scientific Assessment of Ozone Depletion, WMO Report N.º 44, capítulo 5.
- FORSTER P. M. de F. y K. P. SHINE, 1999: Stratospheric water vapour changes as a possible contributor to the observed stratospheric cooling. *Geophys. Res. Let.* 26, 3309-3312.
- HARRIS, N., R. HUDSON y C. PHILLIPS, 1998: SPARC/IOC/GAW Assessment of Trends in the Vertical Distribution of Ozone. Informe SPARC N.º 1.
- KLEY, D., J. M. RUSSELL y C. PHILLIPS, 2000: SPARC Assessment of Upper Tropospheric and Stratospheric Water Vapour". Informe SPARC N.º 2 (en prensa).
- OLTMANS, S., H. VOMEL, D. J. HOFMANN, K. H. ROSENLOF y D. KLEY, 2000: The Increase in Stratospheric Water Vapour from Balloon-borne, Frotspoint Hygrometer Measurements at Washington D. C. and Boulder, Colorado. *Geophys. Res. Let.* (en prensa).
- SHINDELL, D. T., D. RIND y P. LONERGAN, 1998 (a): Climate Change in the middle atmosphere. Part IV. Ozone response to doubled CO₂. *J. Climate*, 11, 895-918.
- SHINDELL, D. T., D. RIND y P. LONERGAN, 1998 (b): Increased polar stratospheric ozone losses and delayed eventual recovery owing to increasing greenhouse gas concentrations, *Nature*, 392, 589-592.
- SOLOMON, S., 1999: Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History, *Rev. Geophys.* 37, 3, 275-316.
- WMO/UNEP, 1994: Scientific Assessment of Ozone Depletion, WMO Report N.º 37.
- WMO/UNEP, 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion, WMO Report N.º 44.

Integración de medidas de ozono por satélite e *in situ*

Por C. J. READINGS¹, J. A. KAYE², E. HILSENRATH³ y V. A. MOHNEN⁴

Antecedentes

Desde 1995, las Agencias Miembros del Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) están trabajando con la OMM, con el Consejo Internacional para la Ciencia (CIUC) y con varios organismos más para crear un proyecto que integre las medidas de ozono por satélite y *in situ* como contribución a la Estrategia Integrada de Observación Mundial (IGOS).

Esta estrategia busca integrar las capacidades de los principales sistemas de satélite, de aviones y superficies en una entidad coordinada que garantice el suministro de observaciones medioambientales claves (atmósfera, océanos, criósfera y tierra).

Es un proceso de planificación estratégica que pretende determinar las necesidades de los usuarios, identificar los recursos disponibles en la actualidad para satisfacer las necesidades de observación y listar dónde faltan observaciones. La IGOS busca satisfacer las necesidades de observación de la forma más rentable posible y, al hacerlo, ofrece la base para un proceso de planificación estratégico que unifica investigación, observaciones a largo plazo y explotaciones. Ello supone hacer coincidir las necesidades con las capacidades existentes y planeadas e implica la existencia de un foro en el que las agencias nacionales e internacionales coordinan y adaptan sus mandatos para satisfacer un objetivo global.

La IGOS abarca todas las formas de recogida de datos y se basa en la necesidad reconocida de que los requisitos de observación los fije el usuario. Representa la convergencia de los intereses de varios socios: el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), el Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO), el Sistema Mundial de Observación Terrestre

¹ ESA, Centro Europeo de Investigación y de Tecnología Espaciales, Noordwijk, Holanda.

² NASA, Sede central, Washington, D. C. 20546, EE.UU.

³ NASA, Centro Goddard de Vuelos Espaciales, Greenbelt, MD 20771, EE.UU.

⁴ Centro OMM-VAG de Garantía de Calidad y Actividad Científica (CGCAC).