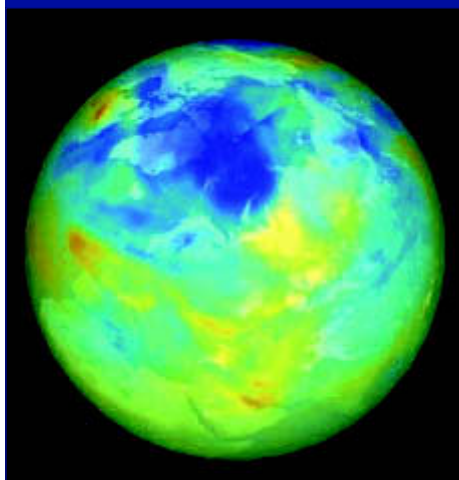


# Del agujero de ozono a la predicción química del clima



Por N. McFarlane (Oficina Internacional de Proyecto del SPARC), A. Ravishankara (Laboratorio de Aeronomía de la NOAA, Boulder, EE.UU.) y A. O'Neill (Universidad de Reading, Reino Unido)

## El Proyecto sobre los procesos estratosféricos y su función en el Clima (SPARC): breve historia

El proyecto SPARC se fue creando a lo largo de un período de años mediante los esfuerzos de un colectivo de científicos, primero para formular sus objetivos centrales y después para ser aceptado por las principales organizaciones científicas internacionales. Numerosos científicos se implicaron en el largo proceso que llevó al

reconocimiento del SPARC como un proyecto del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). Los importantes esfuerzos de M. Geller y de M.-L. Chanin, los primeros Copresidentes del Proyecto SPARC, fueron fundamentales para el éxito final.

Aunque la reducción de ozono en la estratosfera había sido un tema de interés para la investigación durante más de una década, el descubrimiento del agujero de ozono antártico en 1985 dio un gran empuje a este campo de investigación. Se puso de relieve que el conocimiento de la química y de la dinámica del agujero de ozono, y del ozono estratosférico de manera más general, era un tema que suponía un desafío científico, además de una gran preocupación para la salud humana. En su respuesta del Banquete de Honor por el Premio Nobel de Química (véase el Boletín Informativo del SPARC N.º 6 en el sitio Web del SPARC: <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/>), el Profesor F. Sherwood Rowland llamó la atención sobre la firma del Protocolo de Montreal en 1989, como el reconocimiento de la gran importancia que había que otorgar a la vigilancia y al control de las emisiones gaseosas a la atmósfera. Como respuesta a esto se crearon muchos programas nacionales importantes.

Aunque al principio se consideraba que la disminución del ozono estratosférico era un tanto diferente a los temas del cambio climático, se va haciendo más patente que la evolución futura de la capa de ozono y su recuperación final eran parte de una historia más amplia de cambio climático asociado a las concentraciones cada vez mayores de sustancias activas radiativa y químicamente en la atmósfera como resultado de las actividades humanas. El papel crítico de dichas sustancias en la química del ozono en el vórtice polar invernal estratosférico de la Antártida, muy alejadas de sus regiones de origen, es en sí mismo un indicador de



Oficina del SPARC, Toronto, Ontario, Canadá  
Correo electrónico: [sparc@atmosp.physics.utoronto.ca](mailto:sparc@atmosp.physics.utoronto.ca)  
Web: <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/>

la importancia del transporte y el intercambio entre la troposfera y la estratosfera a escalas temporales que van de semanas hasta años. Sin embargo, se hizo evidente que este acoplamiento dinámico podía influir también en la troposfera. Además, el reconocimiento de que la señal del cambio climático era sensible a la composición y a la estructura de la región de la troposfera superior y de la estratosfera

***Ahora sabemos que el ozono está sujeto a transformación por parte de los compuestos químicos de larga vida, tanto naturales como producidos por el hombre, emitidos en la superficie de la Tierra, y que si se reduce su concentración de manera importante podría tener un efecto muy nocivo para la humanidad y para el resto de la biosfera. (F. Sherwood Rowland, Ganador del Premio Nobel de Química de 1995)***

## Principales puntos de interés del primer programa del SPARC

### Los indicadores estratosféricos del cambio climático

Objetivo: detectar las tendencias de los componentes estratosféricos, las propiedades y los procesos físicos, e incluía una atención especial a los siguientes temas:

- La detección de las tendencias de la temperatura estratosférica.
- La detección de las tendencias en la distribución vertical del ozono.
- La recopilación de una climatología del vapor de agua y la detección de los cambios a largo plazo.
- La climatología de los aerosoles estratosféricos y su tendencia.

### Los procesos estratosféricos y su relación con el clima

Esta iniciativa se ocupaba de los procesos físicos, químicos y dinámicos fundamentales e importantes para comprender y modelizar el papel de la estratosfera en el sistema climático. Se abordaban dentro de los siguientes temas:

- El intercambio entre la estratosfera y la troposfera y la dinámica y el transporte en la estratosfera inferior y la troposfera superior.
- La Oscilación Cuasibienal y su posible papel en el acoplamiento entre la estratosfera y la troposfera.
- Los procesos de ondas de gravedad y su parametrización.
- La química y la microfísica en la estratosfera inferior y la troposfera superior.

### La modelización de las tendencias y de los procesos estratosféricos y sus efectos sobre el clima

Esta iniciativa pone de manifiesto la modelización a gran escala y la comparación de los modelos con las observaciones. Dos componentes de esta iniciativa que han producido logros fundamentales y actividades continuadas son el proyecto GRIPS (Proyecto de intercomparación de la realidad de los modelos de circulación general para el SPARC) y una Recopilación de una Climatología Estratosférica de Referencia.

inferior subrayó la necesidad de un programa de investigación dirigido a comprender el papel de la estratosfera en el sistema climático. También se hizo evidente que, para tener éxito, este programa tendría que combinar una amplia serie de disciplinas y de conocimientos técnicos y reconocer completamente el papel clave de la química atmosférica en el cambio

climático. A principios de la década de los noventa ya había recibido el pleno reconocimiento dentro del Proyecto Internacional de la Química de la Atmósfera Global (IGAC), del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (PIGB). Sin embargo, los temas que abarcaba el IGAC se ocupaban exclusivamente de la troposfera y no incluían las interacciones complejas de la química, la

radiación y la dinámica, que caracterizan a la región de la tropopausa y a la estratosfera.

Dos organizaciones importantes prepararon el camino para reconocer el papel de la estratosfera en el clima. El Comité Científico sobre Física Helioestratosférica (SCOSTEP) incluía en su programa un tema titulado "La respuesta de la atmósfera media de arriba a abajo". El importante Grupo de Trabajo dirigido por M. Geller y M.-L. Chanin ejerció una gran influencia en el contenido científico del SPARC. Incluía el tema de "Los efectos de la variabilidad solar sobre el medio ambiente", bajo el liderazgo de K. Labitzke. El SPARC reanudó este tema y ha continuado siendo de interés compartido para el SCOSTEP y el SPARC.

Durante el mismo período se estaba examinando el papel de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG) en el PIGB. Como miembro del primer CDC del PIGB, M.-L. Chanin asumió la tarea de encontrar una manera de incluir a la estratosfera en el Programa del PIGB. Aunque estos esfuerzos no tuvieron el éxito previsto, fueron finalmente recompensados con la aceptación del proyecto SPARC como parte del PMIC, en marzo de 1992.

La primera reunión importante del Proyecto SPARC tuvo lugar en septiembre de 1992 en Carqueiranne, en Francia, como un Instituto de Estudio Avanzado de la OTAN. La organizó M.-L. Chanin e incluyó un grupo de conferenciantes que jugaron un papel importante en la definición de las prioridades del SPARC (Examen Inicial de Objetivos y de Temas Científicos, 1993).

### Logros

El proyecto SPARC ha jugado un papel importante al destacar la importancia

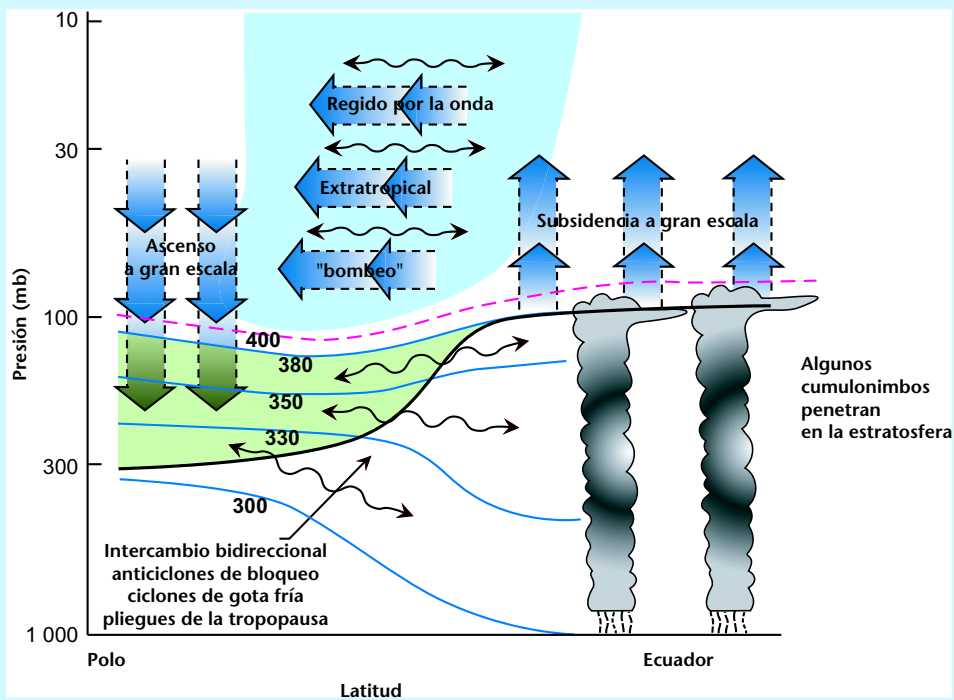


Figura 1 — El “diagrama de Holton” que muestra los procesos implicados en el intercambio entre la estratosfera y la troposfera

La figura 1, tomada del ampliamente citado artículo de Holton y otros (1995), es una elaboración de otra anterior del informe de P. Haynes acerca del Seminario de la OTAN de Investigación Avanzada sobre el intercambio entre la Estratosfera y la Troposfera (Cambridge, 6-9 de septiembre de 1993) publicada en el Boletín Informativo (Newsletter) del SPARC N° 2. En esta figura, la tropopausa está representada por la línea gruesa. Las líneas delgadas son superficies isentrópicas o de temperatura potencial constante (numeradas en grados Kelvin). La región muy sombreada es la “estratosfera más baja”, donde las superficies isentrópicas abarcan la tropopausa y se produce el intercambio isentrópico a través de los pliegues de la tropopausa. La región por encima de la superficie de 380 K es la “parte superior del mundo”, en la que las superficies isentrópicas quedan totalmente dentro de la estratosfera. La región ligeramente sombreada en la parte superior del mundo denota el forzamiento inducido por las ondas (el “bombeo” extratropical). Las flechas onduladas de dos puntas denotan el transporte meridional debido a los movimientos turbulentos, que incluyen las vaguadas tropicales de la troposfera superior y sus ciclones de gota fría, al igual que sus equivalentes en latitudes medias incluyen pliegues. No se muestran todos los transportes turbulentos; y las flechas onduladas no tienen por qué significar ninguna simetría bidireccional. Las flechas anchas muestran el transporte debido a la circulación a escala mundial, que está regido por el bombeo extratropical. Esta circulación a escala global supone la principal contribución al intercambio a través de las superficies isentrópicas (p. ej., la superficie de ~380 K) que están por completo en la parte superior del mundo.

de los procesos estratosféricos en el sistema climático. Esto se ha logrado mediante un enfoque que: en primer lugar, ha dado respuesta a la necesidad de aportaciones científicas a las evaluaciones científicas internacionales; en segundo lugar, ha identificado proyectos que se pudieran realizar en los que la coordinación en el ámbito internacional puede marcar la diferencia; y, en tercer lugar, ha tenido resultados claros para cada proyecto, tales como exámenes científicos que resumen el estado del conocimiento

y facilitan y estimulan nuevas direcciones de investigación.

### El primer programa del SPARC

El primer programa del SPARC se organizó alrededor de tres puntos principales de interés: los indicadores estratosféricos del cambio climático; los procesos estratosféricos y su relación con el clima; y la modelización de las tendencias y de los procesos estratosféricos y

sus efectos sobre el clima (véase el recuadro).

El espacio disponible no permite una discusión detallada, pero ha habido logros muy notables dentro de cada uno de estos puntos de interés y merece la pena llamar la atención sobre algunos que han influido enormemente en el pensamiento y la investigación relacionados con los procesos estratosféricos y, potencialmente, también con la concienciación pública y política de manera importante.

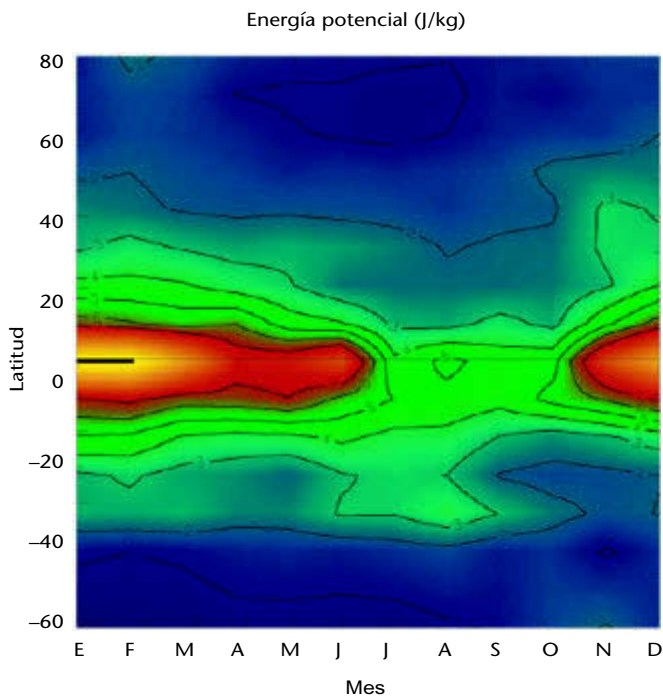


Figura 2 — Características de la climatología de las ondas de gravedad de la estratosfera inferior

El ya famoso diagrama de Holton (Figura 1), resume muchas de las ideas que han inspirado las actividades del SPARC y las investigaciones afines durante la última década. Ilustra de manera esquemática como la propagación y la disipación hacia arriba de un amplio espectro de ondas juegan un papel importante en el acoplamiento dinámico de la estratosfera y de la troposfera. La Oscilación Cuasibienal y las características fundamentales de los procesos de transporte y de intercambio en la estratosfera y en la troposfera superior y la circulación meridional media están estrechamente ligadas a la propagación hacia arriba y la disipación de ondas. Las ondas de gravedad internas, que los modelos numéricos a gran escala no suelen resolver, son una componente importante del campo de ondas. Ahora se admite que la parametrización de los efectos de la disipación de las ondas de gravedad constituye un ingrediente clave para modelizar con éxito la circu-

lación a gran escala de la estratosfera.

Esta estimulante tarea motivó la iniciativa del SPARC sobre los Procesos y la Parametrización de las Ondas de Gravedad (GWPP). Bajo los auspicios de esta iniciativa se han organizado numerosas e importantes actividades. Entre ellas se incluyen campañas (p. ej., la campaña DAWEX; Hamilton, 2003), seminarios (p. ej., la Conferencia de Chapman sobre los Procesos y la Parametrización de las Ondas de Gravedad, Hamilton, 2004) y la acumulación y el análisis de datos de radiosondas

de alta resolución de los Servicios Meteorológicos de varios países, bajo los auspicios de la OMM. El análisis de estos datos ha permitido la caracterización de rasgos esenciales de la climatología de las ondas de gravedad en la estratosfera inferior. La Figura 2 muestra la dependencia meridional y estacional de la energía potencial asociada a las ondas de gravedad en la estratosfera inferior determinada a partir de los datos de alta resolución adquiridos y analizados por los científicos de la iniciativa GWPP del SPARC. Los valores de contorno están en J/kg.

En la Figura 3 se ilustran los hallazgos fundamentales relacionados con las tendencias de la temperatura. El primer dibujo (Figura 3(a)) muestra los cambios de temperatura decenal media zonal en tres niveles de la estratosfera inferior, mientras que la Figura 3(b) ilustra el perfil vertical y la incertidumbre (las líneas de rayas encierran el intervalo entre dos desviaciones estándar) en

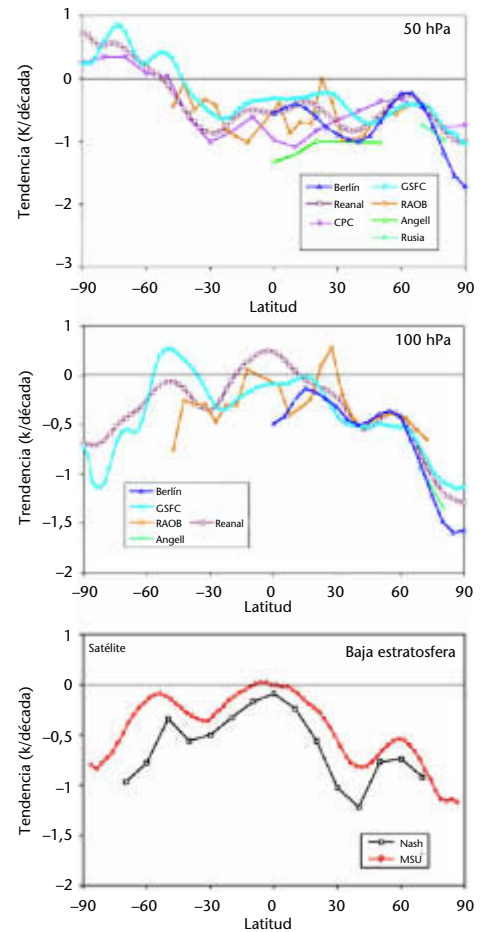


Figura 3(a) — Tendencias de la temperatura decenal zonal media y anual, 1974-1994

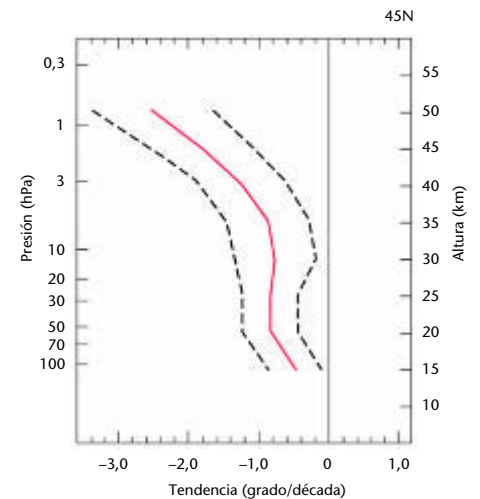


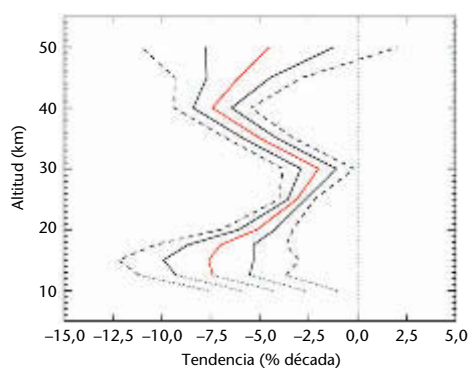
Figura 3(b) — Perfil vertical medio e incertidumbre de la tendencia de temperatura, 1979-1994

latitudes medias del hemisferio norte. Esta figura se ha tomado del artículo "Stratospheric temperature trends: observations and model simulations" ("Tendencias de la temperatura estratosférica: observaciones y simulaciones de modelos") (Ramaswamy y otros, 2001). Resultado de una colaboración del SPARC, este artículo fue galardonado con el Premio Internacional Norbert Gerbier-MUMM de 2003.

El aumento de enfriamiento con la altura que muestra la figura concuerda con las simulaciones de modelos, lo que sugiere que los cambios en las concentraciones de gases traza radiativamente activos contribuyen de forma importante al enfriamiento observado.

Además de los cambios documentados en los gases que se suelen mezclar bien ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y clorofluorocarbonos), la importante disminución del ozono estratosférico y los incrementos del vapor de agua también son factores que contribuyen. Los cambios de temperatura promediados mundialmente observados en la estratosfera inferior durante las dos últimas décadas son una característica sólida que está presente en varios conjuntos de datos observados, al igual que el correspondiente cambio en la columna de ozono.

En la Figura 4, tomada de la Evaluación del SPARC-IOC de las Tendencias en la

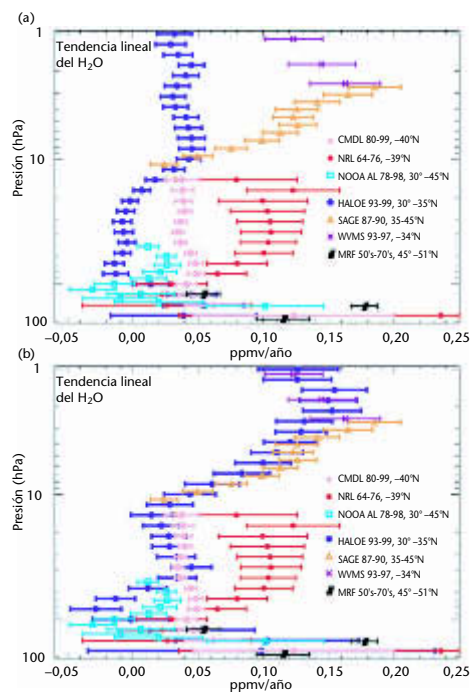


**Figura 4 — Tendencias e incertidumbres medias en la distribución vertical de ozono en latitudes medias septentrionales, 1980-1996**

Distribución Vertical de Ozono (Informe N.º 1 del SPARC), se ilustra la distribución vertical de la tendencia del ozono. Las tendencias representadas en esta figura se calcularon utilizando las obtenidas con el SAGE I-II, las ozon sondas, el SBUV y las mediciones Umkehr. Las incertidumbres combinadas se muestran como  $1\sigma$  (líneas continuas delgadas) y  $2\sigma$  (líneas de rayas). Las tendencias y las incertidumbres combinadas se extienden por abajo hasta los 10 km como muestran las líneas de puntos delgadas, pero los resultados por debajo de 15 km deberían tomarse con precaución.

La tendencia creciente del vapor de agua se ilustra en la Figura 5 (Informe N.º 2 del SPARC) en términos del coeficiente de variación lineal de la razón de mezcla del vapor de agua. Los instrumentos, las latitudes y los períodos de tiempo válidos utilizados se indican en la figura (las barras de error señalan las incertidumbres como una desviación estándar de los coeficientes del análisis de regresión lineal). El Esquema (a) y el Esquema (b) son idénticos a excepción del período de tiempo HALOE utilizado. El Esquema (a) muestra el término de cambio lineal HALOE calculado para 1993-1999, mientras que el Esquema (b) muestra el término de cambio lineal HALOE calculado para 1993-1997. Esta tendencia del vapor de agua tiene importantes implicaciones radiativas y podría estar contribuyendo al calentamiento de la troposfera y de la superficie.

El mecanismo de deshidratación de Brewer-Dobson, la condensación y el congelamiento asociados a las bajas temperaturas en la troposfera superior tropical y en la estratosfera inferior (TS/EI), se considera el más importante para controlar la concentración de vapor de agua en la estratosfera inferior. Este mecanismo es claramente evidente en la variación estacional del vapor de agua en la estratosfera



**Figura 5 — Coeficiente de variación lineal de la razón de mezcla del vapor de agua**

inferior tropical derivada de los ajustes del ciclo estacional de las mediciones HALOE (Figura 6), y se caracteriza por una elevada higrópausa que asciende con el tiempo y que ahora se conoce como el "registrador de cinta tropical" (Mote y otros, 1996).

A la vista de la tendencia decreciente de la temperatura en la estratosfera inferior, la tendencia creciente del vapor de agua parece paradójica. Sin embargo, las incertidumbres en las mediciones del vapor de agua son importantes, sobre todo en regiones con cantidades bajas, y hacen que la tendencia sea bastante incierta. La oxidación del metano, producido en la superficie y transportado a la estratosfera, es una de las principales fuentes de vapor de agua en la estratosfera. El incremento observado en el metano troposférico a lo largo de varias décadas pasadas puede haber contribuido a la tendencia del vapor de agua estratosférico, pero es insuficiente para explicarla.

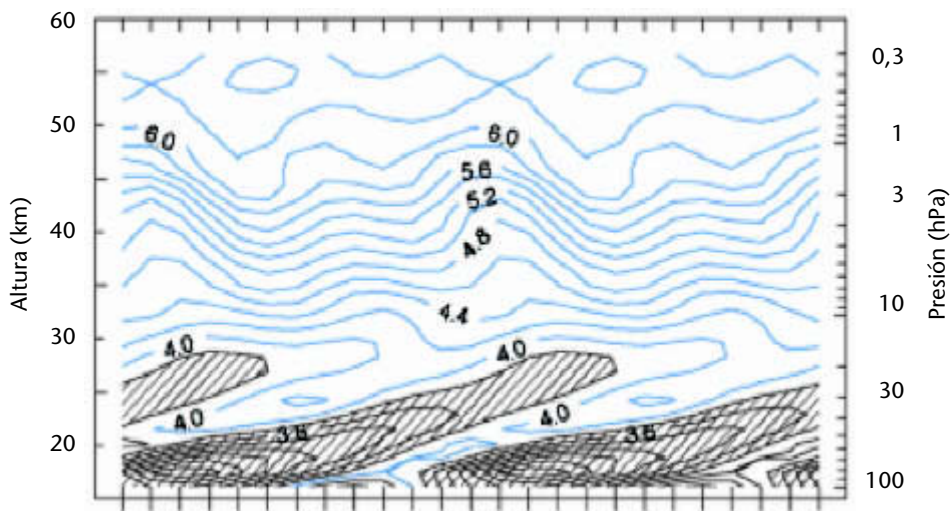


Figura 6 — Variación estacional de la razón de mezcla del vapor de agua en el Ecuador

El SPARC ha mostrado interés en los procesos de acoplamiento asociados a las interacciones entre la estratosfera y la troposfera. Uno de sus grandes éxitos ha sido reunir a especialistas en dinámica, especialistas en transferencia radiativa atmosférica, químicos y microfísicos para tratar cuestiones fundamentales en materia de investigación. La incertidumbre relativa a la tendencia del vapor de agua y los mecanismos que la determinan es una de las numerosas cuestiones importantes que se relacionan con nuestro conocimiento de los procesos clave en la región de la TS/EI. En esta región es donde resulta de gran importancia el acoplamiento entre los procesos químicos, microfísicos y dinámicos. Debido a las grandes escalas temporales radiativas y químicas, esta región es crítica para la sensibilidad y el conocimiento del clima.

La modelización de los procesos químicos y microfísicos es fundamental para el éxito de la predicción climática. Esta es la transición entre el régimen del ozono alto y el vapor de agua bajo de la estratosfera media y el régimen del ozono bajo y el vapor de agua alto de la troposfera. Los procesos de transporte juegan un papel especialmente importante

en la determinación de la estructura de esta región y un papel esencial en la determinación de las grandes cantidades de ozono en la troposfera. Estos procesos también son clave en la formación y la persistencia de las nubes y en las reacciones químicas heterogéneas y de fase múltiple. Debido a la complejidad y a la variedad de los procesos químicos, físicos y dinámicos en su interior, la región TS/EI es de interés tanto para el SPARC como para el IGAC.

Por lo tanto, a finales de la década de los noventa, como un primer paso, el SPARC y el IGAC iniciaron un trabajo conjunto con datos de laboratorio de procesos químicos fundamentales que tenían interés para ambos proyectos. Este trabajo produjo muchos seminarios exitosos que reunieron a químicos de laboratorio con los colectivos de las mediciones de campo y de la modelización e hizo posibles dos artículos exitosos, uno sobre el rendimiento cuántico del O(1D) en la fotólisis del ozono (Matsumi y otros, 2002) y otro sobre la química atmosférica de los radicales de peróxido pequeños (Tyndal y otros, 2001). Este trabajo inicial de colaboración fue el precursor de las colaboraciones entre el SPARC

y el IGAC sobre el tema de las Interacciones entre la Química y el Clima del SPARC (véase "Direcciones futuras").

Los amplios modelos climáticos globales (MCG) están entre las herramientas más importantes para comprender el papel de la estratosfera en el sistema del clima y para predecir el cambio climático. En las dos últimas décadas, los rápidos avances en la tecnología informática y en los conocimientos técnicos de la modelización han dado como resultado el desarrollo de un gran número de dichos modelos, varios de los cuales incluyen una atmósfera media realista.

El proyecto GRIPS se ha convertido en el centro de colaboración entre importantes grupos de modelización en el desarrollo y la evaluación de modelos. Se ha llevado a cabo a través de sucesivas fases, desde la realización de comparaciones básicas de modelos a estudios de mecanismos. Los seminarios anuales han servido como centro de atención para presentar el progreso alcanzado en los proyectos formales, y también para presentar nuevos resultados a medida que se desarrollaban los modelos. Los resultados clave de las colaboraciones del GRIPS se han publicado en artículos de revistas. Entre ellos había comparaciones de simulaciones de variables atmosféricas observables fundamentales de la mayor parte de los centros importantes de modelización (Pawson y otros, 2000) y documentación de otras características importantes de simulaciones de modelos como el espectro de energía cinética (Koshyk y otros, 1999) y la variabilidad de la precipitación y la actividad de ondas tropicales (Horinouchi y otros, 2003).

La Figura 7 muestra un ejemplo de predicciones de un modelo climático-químico de los cambios de ozono antártico hasta 2060 (de Austin y otros,

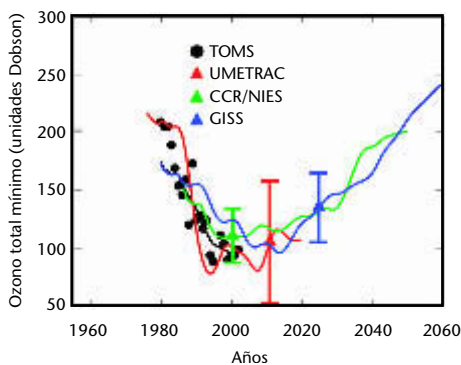


Figura 7 — Ozono antártico total observado, simulado y predicho

2003). Aunque los modelos se rigen por los mismos cambios de forzamiento impuestos, entre los modelos hay importantes diferencias, tanto en la evolución temporal como en la variabilidad interanual, y apenas se conocen las razones de estas diferencias. La evaluación de las razones de tales sensibilidades de los modelos (en particular para los modelos acoplados de química y clima) supone un paso adelante crucial para predecir el futuro cambio estratosférico. Esto constituye simplemente un ejemplo de intercomparaciones de las simulaciones del clima actual y del cambio climático que son de gran valor para comprender y mejorar la capacidad que tienen los modelos para predecir el clima futuro.

La disponibilidad de una climatología de referencia, que documenta las medias observadas y la variabilidad de los parámetros atmosféricos básicos que predicen los modelos facilita enormemente una comparación significativa de las simulaciones del modelo con las observaciones. El Grupo de Climatología de Referencia del SPARC se creó para actualizar y evaluar las climatologías existentes de la atmósfera media (estratosfera y mesosfera) para el GRIPS y para otros proyectos y actividades del SPARC. Esto condujo a la publicación del Informe N.º 3 del SPARC (en diciembre de 2002), que ofrece una comparación exhaustiva de las climatologías de la atmósfera media.

El intercambio oportuno de datos entre los científicos participantes resulta fundamental para que la colaboración tenga éxito. El Centro de Datos del SPARC (<http://www.sparc.sunysb.edu/>) se estableció en 1999 para facilitar la colaboración y la investigación relacionada. Desde su creación, han aumentado rápidamente el número y la variedad de conjuntos de datos de sus archivos y disponibles en la red. Entre ellos se incluyen los datos clave de referencia utilizados en las evaluaciones del SPARC, tales como la Evaluación del Vapor de Agua (WAVAS), y también otros datos como datos de temperatura y de viento de alta resolución obtenidos de radiosondas para años seleccionados.

Uno de los distintivos del SPARC ha sido anticiparse a las necesidades de las evaluaciones internacionales como son la de ozono de la OMM y las del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Esto se ha logrado mediante seminarios oportunos, el desarrollo de temas fundamentales antes de las evaluaciones (artículos en revistas y proyectos de colaboración) y ofreciendo conocimientos técnicos (participación de científicos del SPARC como coautores, autores principales, autores colaboradores y revisores). Se espera que este servicio continúe en el futuro.

### Direcciones futuras

El progreso en la última década de la investigación y del conocimiento en lo referente a los procesos estratosféricos, en una gran medida bajo los auspicios de las colaboraciones del SPARC, ha llamado la atención

sobre numerosos temas que hay que tratar mediante actividades de investigación que requieren colaboración en el futuro próximo. A la vista de ello, se han desarrollado nuevos temas y nuevas perspectivas para el proyecto SPARC que han recibido el apoyo del PMIC. La colaboración con otros proyectos internacionales es esencial para fomentar la ciencia del SPARC dentro de estos temas. Con este fin, el Comité Científico Mixto del PMIC ha reconocido que el SPARC debe jugar un papel de liderazgo para lograr numerosos objetivos específicos: (a) llegar a una colaboración en las interacciones entre la química y el clima con el proyecto IGAC; (b) centrarse en los temas que han surgido de los últimos estudios de la Oscilación Ártica (OA); (c) trabajar en colaboración con el SCOSTEP en el forzamiento radiativo solar y las tendencias de temperatura; (d) trabajar con el proyecto de la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM en la penetración de la radiación ultravioleta; y (e) contribuir a la planificación internacional y a la planificación de misiones. La lista anterior es un mero subconjunto de posibles áreas de colaboración. Por ejemplo, para la variabilidad y la predictibilidad a largo plazo del clima es fundamental la existencia de vínculos más fuertes con el proyecto CLIVAR del PMIC.

Últimamente, el SPARC ha organizado sus actividades dentro de tres temas que se relacionan entre sí para consolidar sus contribuciones a la predicción del clima y para crear puntos de contacto eficaces con otros proyectos del PMIC. Las cuestiones asociadas que se plantean dentro de cada tema, aunque no sean exhaustivas, pretenden identificar los principales puntos de interés de las actividades del SPARC, al menos en el futuro inmediato.



## Detección, atribución y predicción de los cambios estratosféricos

- ¿Cuáles son las variaciones y los cambios pasados en la estratosfera?
- ¿Con qué bondad podemos explicar los cambios pasados en términos de efectos naturales y antropogénicos?
- ¿Cómo esperamos que evolucione la estratosfera en el futuro, y qué confianza tenemos en esas predicciones?

Este tema es continuación, síntesis y ampliación de los anteriores temas del SPARC sobre la variabilidad y las tendencias a largo plazo en la estratosfera. El trabajo futuro destacará la atribución y la predicción. Esto requerirá un programa concertado de investigación en colaboración que implique, en muchos casos, modelos acoplados de química y clima.

La determinación de la magnitud de la variabilidad natural de parámetros clave en regiones fundamentales es esencial para la detección y la atribución del cambio a largo plazo. En muchos casos, el registro disponible de observaciones no es lo suficientemente largo como para evaluar el alcance de la variabilidad natural. Por ejemplo, el importante calentamiento invernal que se produjo en la estratosfera antártica en 2002 (OMM, 2002) fue el primero que se registró e invirtió abruptamente la tendencia hacia un vórtice polar, últimamente, más frío y de mayor duración, que era evidente en los 20 años previos de observaciones (Baldwin y otros, 2003). Por el contrario, los calentamientos invernales en la estratosfera ártica se observan con relativa frecuencia. La observación de este raro fenómeno por primera vez en la Antártida subraya la dificultad de evaluar el intervalo completo de la variabilidad natural a partir de los registros de observaciones exclusivamente.

La evaluación de la probabilidad de tales episodios infrecuentes con la

ayuda de conjuntos de simulaciones largas que utilizan modelos climáticos globales es una posibilidad (Taguchi y Yoden, 2002). La confianza en la predicción y la atribución demandará resultados estadísticamente significativos basados en conjuntos grandes de integraciones con modelos numéricos (o aproximaciones que pueda demostrarse que son estadísticamente equivalentes). La experiencia adquirida dentro del proyecto GRIPS es una base para el papel futuro del SPARC en la coordinación de experimentos de distintos grupos para facilitar una comparación coherente de los resultados.

## Química estratosférica y clima

- ¿Cómo evolucionarán el ozono estratosférico y otros componentes?
- ¿Cómo afectarán al clima los cambios en la composición estratosférica?
- ¿Cuáles son los vínculos entre los cambios en el ozono estratosférico,

la radiación UV y la química troposférica?

El último informe de evaluación del IPCC identifica como limitaciones científicas importantes el conocimiento insuficiente del acoplamiento y de las retroalimentaciones entre la química atmosférica, la biosfera y el clima —y el consiguiente fracaso para representar los procesos afines de manera adecuada en los modelos de predicción climática—. Debe adoptarse un enfoque interdisciplinar que implique mediciones de laboratorio, campañas de campo y modelización numérica. El trabajo dentro de este tema implicará una gran colaboración entre los proyectos SPARC e IGAC. Como se señala más adelante, la región TS/EI es donde son más difíciles de llevar a cabo algunos desafíos científicos.

Para lograr una predicción precisa del clima futuro y una evaluación del efecto del cambio climático y de las variaciones sobre el sistema terrestre

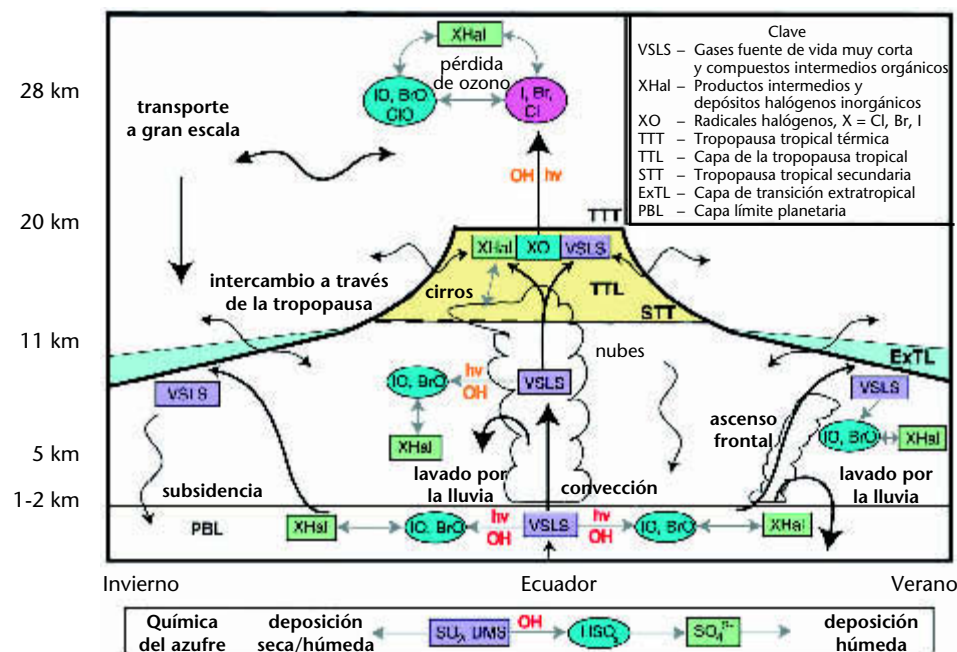


Figura 8 — Procesos químicos y de transporte que afectan a los gases fuente de vida muy corta y a los compuestos intermedios orgánicos

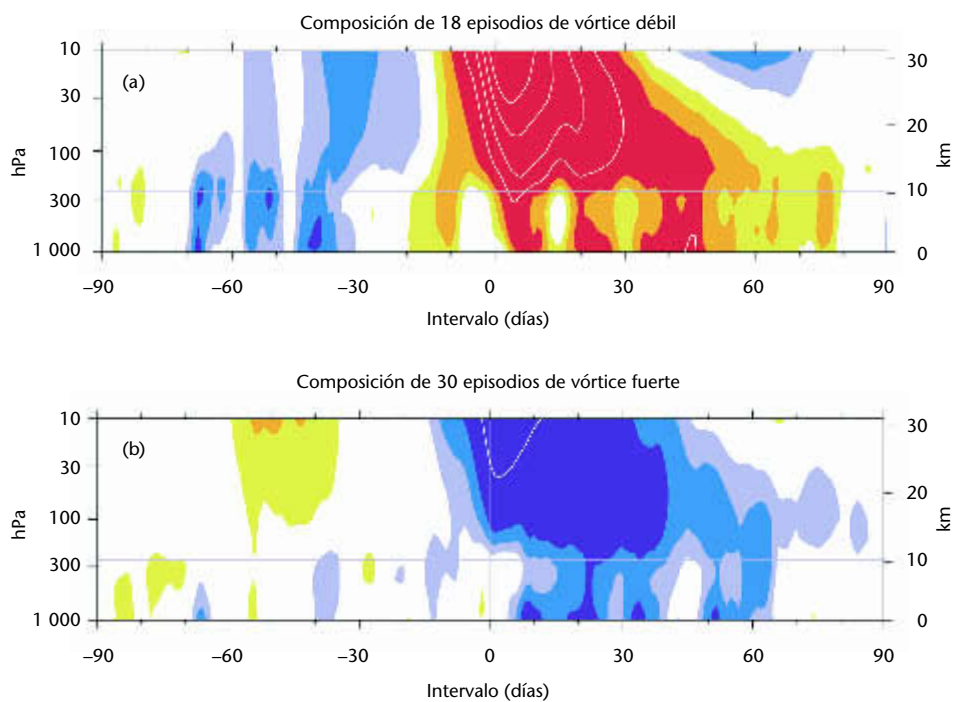


Figura 9 — Propagación hacia abajo de las anomalías, de la estratosfera a la troposfera

resulta fundamental un conocimiento claro de los procesos que conectan las emisiones (fuente, precursores) con las concentraciones, y de los procesos que conectan las concentraciones con los forzamientos climáticos. El estudio de los procesos implicados en la química y en la dinámica de la capa de la tropopausa tropical (TTL) es un ejemplo del tipo de actividades que se están llevando a cabo en este tema. Algunas de ellas se representan esquemáticamente en la Figura 8 (Cox y Haynes, 2003; de la Evaluación Científica de la Disminución de la Capa de Ozono: 2002, informe Mundial N.º 47 de la OMM sobre la Investigación y la Vigilancia del Ozono).

### Acoplamiento entre la estratosfera y la troposfera

- ¿Cuál es el papel del acoplamiento dinámico y radiativo con la estratosfera en la predicción meteorológica

troposférica a gran escala y en la determinación de las tendencias a largo plazo del clima troposférico?

- ¿Qué mecanismos hacen que la estratosfera y la troposfera actúen como un sistema acoplado?

Una gran motivación para este tema es que varios de los últimos estudios de observaciones han sugerido que una llamada Oscilación Ártica (o Modo Anular del Norte, NAM, con un Modo Anular del Sur equivalente) es una componente dominante de la variabilidad a gran escala de la atmósfera. El descubrimiento de que las anomalías en un índice de la OA pueden a veces abarcar el sistema de la estratosfera y la troposfera ha vuelto a dar vida al antiguo tema del acoplamiento entre la estratosfera y la troposfera. En particular, la propagación ocasional de las anomalías hacia abajo, de la estratosfera a la troposfera, implica, con el apoyo del análisis estadístico de los datos, que el conocimiento del estado de la estratos-

fera puede aumentar nuestra capacidad para predecir aspectos de la evolución a gran escala de la troposfera que tendrían valor práctico para la predicción meteorológica y para la predicción climatológica.

Esto se representa en la Figura 9, que muestra que las alteraciones de la circulación troposférica hacia la superficie pueden asociarse a un debilitamiento (en rojo) o a un fortalecimiento (en azul) del vórtice estratosférico. Los diagramas muestran composiciones del índice del NAM: (a) composición de 18 episodios de vórtice débil y (b) de 30 episodios de vórtice fuerte (Baldwin y Dunkerton, 2001). Si el estado de la estratosfera influye en la evolución de la troposfera en un sentido causal (y si es así, por medio de qué mecanismos y en qué escalas temporales) constituyen temas esenciales que requieren experimentación numérica.

Como ha sido el caso hasta ahora para los puntos de interés del SPARC, para tratar las cuestiones científicas de los nuevos temas del SPARC hará falta respaldar las actividades dentro de áreas generales como el desarrollo de modelos, los estudios de procesos y el análisis y el archivo de los datos necesarios. En muchos casos, para facilitar estas actividades hará falta crear (de manera temporal, posiblemente) grupos de trabajo elegidos, algunos de los cuales habrán evolucionado a partir de las actividades actuales del SPARC.

Un ejemplo de esas actividades nuevas de fortalecimiento es la comparación de modelos de química y clima a través de análisis dirigidos a procesos y de validación. Una componente importante de varios de los seminarios del GRIPS ha sido el hablar del progreso en los modelos acoplados de química y clima, incluso aunque no se hubiera organizado una evaluación formal. Los modelos climáticos incluyen cada vez más componentes químicos y ahora se pone de manifiesto que la intercomparación y la evaluación

del rendimiento de estas componentes son importantes para mejorar el conocimiento tanto de las componentes químicas como de sus modelos climáticos mundiales subyacentes y, en última instancia, para mejorar las representaciones de estos procesos en los modelos climáticos globales.

El logro de este objetivo, al igual que el de suministrar información que tenga más utilidad científica en las futuras evaluaciones, fue el motor para incluir esta actividad como uno de los pilares de apoyo de los temas del programa del SPARC. Los conceptos de esta nueva actividad se desarrollaron en un seminario en Grainau, en Alemania, en noviembre de 2003.

También serán necesarios grupos de trabajo elegidos para resolver distintos temas relacionados con los procesos atmosféricos adicionales dentro del contexto de los principales temas científicos. Uno de los muchos ejemplos posibles es la incertidumbre actual y la falta de conocimiento de los procesos que afectan al transporte del vapor de agua de la troposfera a la estratosfera, que es necesario para calcular la variabilidad aparente a largo plazo en las concentraciones de vapor de agua. El SPARC contribuirá a resolver estas incertidumbres a través de evaluaciones científicas destinadas a realizar artículos científicos y mediante el fomento y la participación en campañas de observación y la modelización numérica asociada. En la Tercera Asamblea General del SPARC (Victoria, Canadá, agosto de 2004) se pusieron de manifiesto los nuevos temas y se presentaron resultados nuevos en numerosas áreas clave que seguirán recibiendo atención por parte de la comunidad del SPARC (en el Boletín Informativo N.º 24 del SPARC se incluye un informe de la III Asamblea General y en futuros boletines aparecerán artículos ampliados basados en presentaciones esenciales que

se hicieron en la misma). En la Asamblea General se destacó que, aunque nuestro conocimiento del papel de la estratosfera en el sistema climático ha avanzado mucho, siguen existiendo importantes incertidumbres, sobre todo en la interacción de la química atmosférica y el clima. La resolución de estas incertidumbres requerirá una investigación que se desarrolle en colaboración y que sea transversal a los actuales proyectos del PMIC.

## Referencias

- AUSTIN, J., D. SHINDELL, C. BRUHL, M. DARNERIS, E. MANZINI, T. NAGASHIMA, P. NEWMAN, S. PAWSON, G. PITARI, E. ROZANOV, C. SCHNADT & T. G. SHEPHERD, 2003: Uncertainties and assessments of chemistry-climate models of the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1-27.
- BALDWIN, M., T. HIROOKA, A. O'NEILL & S. YODEN, 2003: Major stratospheric warming in the southern hemisphere in 2002: dynamical aspects of the ozone hole split, *SPARC Newsletter*, 20, enero de 2003.
- BALDWIN, M. P. & T. J. DUNKERTON, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, 294, 581-584.
- HAMILTON, K., 2003: The Darwin Area Wave Experiment (DAWEX), *SPARC Newsletter*, 20, 19-20.
- HAMILTON, K., 2004: Report on the Chapman Conference on Gravity Wave Processes and Parameterization, *SPARC Newsletter*, 23, 15-16.
- HOLTON, J. R., P. H. HAYNES, M. E. MCINTYRE, A. R. DOUGLAS, R. B. ROOD & L. PFISTER, 1995: Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33, 403-439.
- HORINOUCI, T., S. PAWSON, K. SHIBATA, U. LANGEMATZ, E. MANZINI, M. A. GIORGETTA, F. SASSI, R. J. WILSON, K. HAMILTON, J. DE GRANPRÉ & A. A. SCAIFE, 2003: Tropical cumulus convection and upward propagating waves in middle atmospheric GCMs, *J. Atmos. Sci.*, 60, 2765-2782.

- KOSHYK, J. N., B. A. BOVILLE, K. HAMILTON, E. MANZINI & K. SHIBATA, 1999: The kinetic energy spectrum of horizontal motions in middle-atmosphere models, *J. Geophys. Res.*, 104, 27177-27190.

- MATSUMI, Y., F. J. COMES, G. HANCOCK, A. HOFZUMAHAUS, A. J. HYNES, M. KAWASAKI & A. R. RAVISHANKARA, 2002: *J. Geophys. Res.*, 107, oid: 10.1029/2001JD000510.

- MOTE, P. W., K. H. ROSENLOF, M. E. MCINTYRE, y otros, 1996: An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapour, *J. Geophys. Res.*, 103, (D8), 8651-8666.

- PAWSON, S., K. KODERA, K. HAMILTON, T. G. SHEPHERD, S. R. BEAGLEY, B. A. BOVILLE, J. D. FARRARA, T. D. A. FAIRLIE, A. KITOH, W. A. LAHOZ, U. LANGEMATZ, E. MANZINI, D. H. RIND, A. A. SCAIFE, K. SHIBATA, P. SIMON, R. SWINBANK, L. TAKACS, R. J. WILSON, J. A. AL-SAADY, M. AMODEI, M. CHIBA, L. COY, J. DE GRANDPRÉ, R. S. ECKMAN, M. FIORINO, W. L. GROSE, H. KIODE, J. N. KOSHYK, D. LI, J. LERNER, J. D. MAHLMAN, N. A. MCFARLANE, C. R. MECHOO, A. MOLOD, A. O'NEILL, R. B. PIERCE, W. J. RANDEL, R. B. ROOD & F. WU, 2000: The GCM-Reality Intercomparison Project for SPARC (GRIPS): Scientific Issues and Initial Results, *Bull. Am. Met. Soc.*, 81, 781-796.

- RAMASWAMY, V., M.-L. CHANIN y otros, 2001: Stratospheric temperature trends: observations and model simulations, *Reviews of Geophysics*, 39, 71-122.

- TAGUCHI, M. & S. YODEN, 2002: Internal interannual variations of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model. Part II: Millenium integrations. *J. Atmos. Sci.*, 59, 3037-3050.

- TYNDAL, G. S., R. A. COX, C. GRANIER, R. LESCLAUX, G. K. MOORTGAT, M. J. PILLING, A. R. RAVISHANKARA & T. J. WALLINGTON, 2001: Atmospheric Chemistry of small organic peroxy radicals, *J. Geophys. Res.*, 106, 12157-12182.

- OMM, 2002: Antarctic ozone hole splits in two. Press Release N.º 681.