

- RASMUSSEN, R. A. y M. A. K. KHALIL: 1984, Atmospheric methane in the recent and ancient atmospheres: concentrations, trends and interhemispheric gradient, *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 11 599-11 605.
- STEELE, L. P., P. J. FRASER, R. A. RASMUSSEN, M. A. K. KHALIL, T. J. CONWAY, A. J. CRAWFORD, R. H. GAMMON, K. A. MASARIE y K. W. THONING, 1987: The global distribution of methane in the troposphere, *Jour. Atmos. Chem.*, **5**, 125-171.
- STEELE, L. P., E. J. DLUGOKENCKY, P. M. LANG, P. P. TANS, R. C. MARTIN y K. A. MASARIE, 1992: Slowing down of the global accumulation of methane during the 1980s, *Nature*, **358**, 313-316.
- TANS, P. P., T. J. CONWAY y T. NAKAZAWA, 1989: Latitudinal distribution of the surface sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and an atmospheric transport model, *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 5 151-5 172.
- TANS, P. P., I. Y. FUNG y T. TAKAHASHI, 1990: Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget, *Science*, **247**, 1 431-1 438.
- THOMPSON, A. M., 1992: The oxidizing capacity of the earth's atmosphere: probable past and future changes, *Science*, **256**, 1 157-1 165.
- THOMPSON, A. M. y R. J. CICERONE, 1986: Possible perturbations to atmospheric CO, CH₄, and OH, *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 10 853-10 864.
- ZANDER, R., P. DEMOULIN, D. H. EHRLICH, U. SCHMIDT y C. P. RINSLAND, 1989(a): Secular increase of total vertical column abundance of carbon monoxide above central Europe since 1950, *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 11 021-11 028.
- ZANDER, R., P. DEMOULIN, D. H. EHRLICH y U. SCHMIDT, 1989(b): Secular increase of the vertical column abundance of methane derived from IR spectra recorded at the Jungfraujoch station, *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 11 029-11 039.

EL PAPEL POTENCIAL DEL OZONO TROPOSFERICO COMO GAS DEL CLIMA

Por Volker A. MOHNEN¹, Walter GOLDSTEIN² y Wei-Chyung WANG³

Introducción

La preocupación científica acerca de la investigación sobre "el ozono troposférico libre" ha ido ganando, poco a poco, importancia a lo largo de los últimos años. Se ha evidenciado que: (a) el ozono tiene una influencia significativa en el forzamiento radiativo del sistema climático de la superficie y la troposfera; (b) la fotodisociación del ozono define la "eficiencia oxidante" de la troposfera libre; y (c) como resultado, el ozono ha modificado indirectamente la concentración y la permanencia de otros gases, especialmente del monóxido de carbono y de los hidrocarburos metánicos y no metánicos.

Los datos de observación de las tendencias de las concentraciones de ozono troposférico eran limitados hasta hace unos pocos años pero se ha producido claramente un incremento sustancial de la concentración del ozono troposférico libre (en alturas entre los 8 y los 12 km) en zonas del hemisferio norte. Se hicieron predicciones en el sentido de que incrementos similares podrían extenderse al hemisferio norte en su totalidad y, posiblemente, al hemisferio sur (Hi-

dalgo y Crutzen, 1977) y de que las consecuencias podrían ser perjudiciales para la salud humana y para el cambio climático.

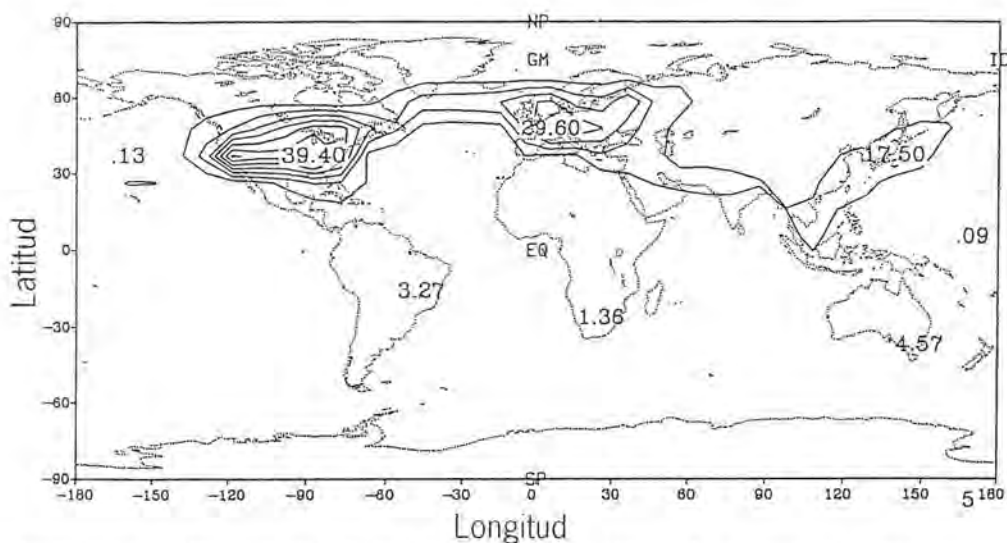
Los antiguos trabajos de evaluación se centraron sobre todo en dos capas de la atmósfera: (a) la capa límite planetaria, en la cual los crecientes niveles de ozono continúan haciendo peligrar la salud y dañando a bosques y cultivos (NRC, 1991; Chameides y otros, 1994); (b) la estratosfera en la que la reducción de la capa de ozono incrementa la penetración de rayos UV-B en la troposfera, planteando serias amenazas a los organismos vivos e influenciando posiblemente a la química troposférica (GEICC, 1992; OMM, 1991).

Un número limitado de experimentos de campo han mejorado la comprensión del balance troposférico mundial del ozono (Carroll y Thompson, 1994). No obstante, todavía se discute en la comunidad científica acerca de una tasa de cambio confirmada de la distribución mundial del ozono, particularmente el estrato situado entre los 8 y los 12 km de altura. Las medidas mundiales de ozono se han deducido de las de un reducido número de observatorios y la calidad de los

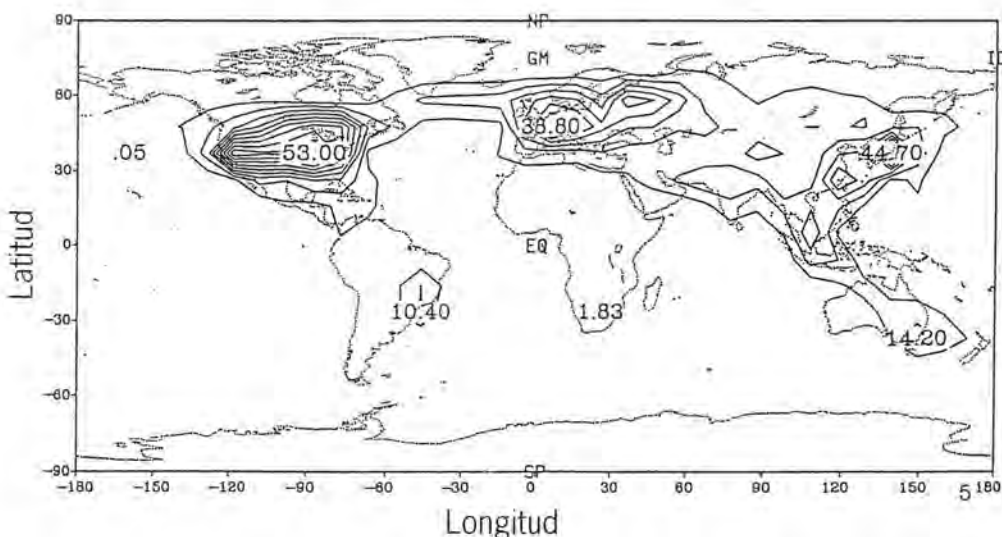
¹ Profesor de Ciencias Atmosféricas, Garantía de Calidad/Centro de Actividad en Ciencias, Instituto Fraunhofer para la Investigación Atmosférica Ambiental (IFU), Garmisch-Partenkirchen, Alemania

² Profesor de Política Pública, Rockefeller College, State University of New York en Albany

³ Profesor de Ciencias Aplicadas, State University of New York en Albany



Concentraciones totales de NO_x (en unidades de $\times 10^{-10}$ mol mol⁻¹) en el estrato de 8 a 12 km para los años 1990-2015 (datos).



datos no es la adecuada para despejar las incertidumbres básicas.

El ozono como gas del clima

El ozono actúa como gas de efecto invernadero absorbiendo las radiaciones salientes de onda larga. También absorbe la radiación solar, particularmente la UV-B. Los cambios en la distribución vertical del O₃ pueden perturbar el forzamiento radiativo solar y el de las ondas largas del sistema climático superficie-troposfera. Se ha constatado que una disminución del O₃ estratosférico produce un incremento de la radiación solar disponible para absorción y un efecto de enfriamiento causado por una disminución de la radiación de onda larga des-

cendente. El efecto neto dependerá de la localización y de la época del año. Por el contrario, un incremento del O₃ troposférico puede calentar el sistema troposfera-superficie mediante un marcado aumento de la absorción tanto de la radiación solar como de las emisiones de onda larga de la superficie. Los registros de los cálculos radiativos (OMM, 1991) muestran que la variación de la densidad absoluta del ozono, entre los 8 y los 12 km de altitud, modificaría fuertemente la tasa de forzamiento radiativo. Si se debe realizar una evaluación mejor de la influencia del ozono en las temperaturas de superficie, debería investigarse la tendencia de la concentración del ozono en el régimen del estrato crítico entre los 8 y los 12 km de altitud.

El ozono se diferencia netamente de otros gases de efecto invernadero. En primer lugar es consecuencia de reacciones fotoquímicas en la atmósfera; la fotodisociación y las reacciones consecuentes del O(D) con el vapor de agua disparan la formación de radicales hidroxilos (OH) en el aire atmosférico de fondo. El radical hidroxilo rige el destino del monóxido de carbono y del metano (este último constituye un potente gas invernadero) y genera el radical peróxido HO₂. Además, la conversión del NO en NO₂ por el HO₂ conduce a una posterior formación de ozono debida a una rápida fotólisis del NO₂, que cede el átomo de oxígeno necesario para producir ozono. Sin embargo, con bajas concentraciones de NO, menores que 10 partes por billón (ppb), el HO₂ destruiría realmente ozono. El óxido nítrico se conserva durante el complejo proceso de producción de ozono; puede considerársele, en síntesis, como un catalizador en la formación del ozono. Así, si cambian las concentraciones de óxido nítrico es muy probable que se module la producción de O₃ e, indirectamente, la formación de OH. De forma que existe, como resultado, una estrecha relación entre los gases radiativamente activos, el O₃ y el metano, y la eficiencia oxidante de la troposfera, provocando cambios en los procesos de oxidación e impulsando el forzamiento del clima. A causa de estos procesos de realimentación, los cálculos del efecto climatológico de los cambios del ozono tienen incertidumbres inherentemente mayores que cálculos análogos realizados para aquellos gases invernadero que son emitidos directamente a la atmósfera.

Se debe considerar un segundo factor. La vida relativamente corta del ozono en la troposfera provoca un abanico considerablemente amplio de cambios, espaciales y temporales, en las concentraciones del ozono. La influencia del O₃ en el forzamiento del clima contrasta poderosamente con la influencia de otros gases invernadero cuya distribución es más uniforme en la troposfera. La vida del ozono en la troposfera alcanza, generalmente,

periodos de días o semanas, pero su vida en la estratosfera dura incluso muchos meses. El forzamiento del clima debido al O₃ no es uniforme y su influencia sobre las temperaturas de superficie es más difícil de evaluar que la de otros gases invernadero mejor mezclados.

Wang y otros (1993) emplearon los sondeos de siete estaciones en latitudes medias y altas para estudiar las variaciones del O₃ durante unos cuantos decenios últimos. Evaluaron el forzamiento radiativo por incremento de otros gases invernadero: CO₂, CH₄, CFCl₂, CF₂Cl₂ y N₂O. Las estaciones eran (de norte a sur): Resolute (75°N, 95°W), Churchill (59°N, 94°W), Edmonton (54°N, 114°W), Goose Bay (53°N, 60°W), Payenne (47°N, 7°E), Hohenpeissenberg (47°N, 11°E) y Tateno (36°N, 140°E). Encontraron: (a) una clara disminución del ozono en la baja estratosfera (por encima de 12 km) e incrementos del mismo en la troposfera superior (8 a 12 km), y (b) que los cambios en la distribución vertical del O₃ perturbaban el forzamiento radiativo y los registros climatológicos. Después examinaron el forzamiento climático debido a incrementos del CO₂, del CH₄, del N₂O y de los CFC y compararon sus datos con cálculos similares basados en los cambios observados en perfiles verticales pertinentes del ozono.

La tabla de esta página resume los cálculos del forzamiento radiativo realizados en una estación, la de Hohenpeissenberg, Alemania, que mantiene las series más largas de medidas de las distribuciones verticales de ozono. El forzamiento radiativo total debido al conjunto de los gases radiativamente activos con temperaturas fijas resultó ser de 0,79 y 1,05 Wm⁻² para enero y julio, respectivamente; los efectos debidos a los cambios en el O₃, por si solo, se evaluaron en 0,41 y 0,57 Wm⁻², respectivamente. En el tratamiento del calentamiento con dinámica fija, el forzamiento radiativo total para enero y julio resultó ser de 0,71 y 1,03 W m⁻², respectivamente. Que dichos valores resulten ser ligeramente

Comparación de los cambios en el forzamiento radiativo (Wm⁻²) entre los cambios del O₃ y los cambios combinados de O₃ con incrementos de los gases invernadero CO₂, CH₄, CFCl₂, CF₂Cl₂ y N₂O en Hohenpeissenberg
(según Wang y col., 1993)

	Cambios de O ₃				Cambios combinados de O ₃ y otros gases	
	Total		Troposfera			
	TF	DF	TF	DF	TF	TF
Enero	0,410	0,327	0,222	0,136	0,794	0,710
Julio	0,570	0,548	0,490	0,467	1,050	1,027

Los cambios calculados en el forzamiento radiativo son de los períodos 1971-1980 y 1981-1990. Los aumentos de concentración de otros gases corresponden también a los períodos indicados. TF y DF corresponden al tratamiento con temperatura fija y con dinámica fija, respectivamente, al calcular el forzamiento radiativo.

inferiores a los obtenidos con el tratamiento a temperatura fija se debe, principalmente, a la asociación de una temperatura estratosférica más fría con las disminuciones locales de O_3 en la zona de los 12 a los 18 km de altitud. La tabla revela, sin embargo, que una disminución de la temperatura de la estratosfera inferior (12-18 km) provoca un cambio marcado en el forzamiento radiativo del ozono. Queda claro que el tratamiento con temperatura fija y con calentamiento dinámico afecta sustancialmente al forzamiento radiativo local causado por el aumento del ozono troposférico.

Mientras que la reducción del O_3 en la baja estratosfera se atribuye demostrablemente a una expansión de los clorofluorocarburos, persisten las dudas en lo que se refiere al incremento relativamente amplio del O_3 troposférico en las latitudes medias y altas del hemisferio norte. Un estudio reciente (Thompson, 1992) sugiere que los incrementos pueden ser causados por un aumento de los gases traza precursores del O_3 (CO , NO_x e hidrocarburos). La influencia sobre el forzamiento radiativo requiere un mayor esfuerzo investigador para identificar y cuantificar el origen de los aumentos durante los dos últimos decenios de forma que la tendencia futura puede evaluarse mejor. La gran sensibilidad del forzamiento radiativo del O_3 a las temperaturas de la baja estratosfera destaca la necesidad de estudiar las implicaciones climáticas de los cambios en el O_3 con ayuda de modelos de circulación general (MCG), en los cuales las interacciones entre radiación y dinámica se encuentren correctamente incorporadas.

La necesidad de observaciones mundiales a largo plazo

Las observaciones de la distribución vertical del ozono en el estrato de 8 a 12 km de altitud se han obtenido, hasta ahora, de sondas ozonométricas lanzadas en el marco del Sistema Mundial de Observación del Ozono (SMO O_3) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1990; 1991). Los resultados muestran una tendencia positiva, estadísticamente amplia, en todas las estaciones del año, pero la evidencia de un aumento a escala mundial no es todavía concluyente. Las actuales redes de sondeos ozonométricos deben desarrollarse, incluyendo tanto plataformas satelitarias y un mayor número de estaciones terrestres equipadas para realizar medidas tanto directas (*in situ*) como remotas (por lidar y espectrométricas) en la troposfera libre.

Será necesario un futuro refinamiento de la investigación. Los cambios en el ozono de la troposfera superior se atribuyen a: (a) transportes descendentes de aire estratosférico rico en ozono a través de la tropopausa durante sucesos de inestabilidad asociados a los ciclones de las lati-

tudes medias; y (b) formación fotoquímica *in situ* originada por gases precursores con óxidos de nitrógeno como "catalizadores".

El primero de los mecanismos, el transporte descendente, se supuso que había permanecido constante durante decenios, aunque no disponíamos de datos que probasen tal constancia. Existían pruebas definitivas de que las concentraciones de gases precursores del ozono (óxido nítrico e hidrocarburos) habían crecido sustancialmente en muchas regiones del hemisferio norte y de que existía un consecuente potencial creciente de formación de ozono. Además, un sorprendente aumento en el tráfico de aviación civil se sumó de forma significativa a los manantiales de óxido nítrico e hidrocarburos en la troposfera superior. En 1990, se quemaron aproximadamente 176 millones de toneladas de gasolina de aviación por una flota aérea mundial de 375 000 aeronaves civiles más un número incierto de aviones militares. De ese total, 12 000 unidades correspondieron a las aeronaves comerciales más pesadas que queman grandes cantidades de combustibles para reactores y producen emisiones considerables a alturas y latitudes variables (NASA, 1993). Las dos partes de la figura de la página 39 muestran las emisiones actuales (1990), y extrapoladas futuras (2015) de NO_x en el estrato de 8 a 12 km. Particularmente notable resulta el incremento previsto de tráfico aéreo, y consecuentemente de emisiones de gases precursores, en la zona circumpacífica que se adentra, holgadamente, en el hemisferio sur. La necesidad de vigilancia de la troposfera se volverá acuciante con el incremento del NO_x y, sobre todo, con el aumento pronosticado de las concentraciones de ozono. Esto puede dañar rápidamente tanto las atestadas aerovías del hemisferio norte como a las regiones del hemisferio sur antes diáfanas.

Si una red de investigación debe satisfacer las necesidades de los modelizadores del clima mundial, la comunidad investigadora de la química atmosférica deberá alcanzar un nivel sin precedentes de cooperación internacional y de asesoramiento. Dos programas mundiales han comenzado ya a documentar los cambios en la composición química de la atmósfera: (a) la OMM creó la Vigilancia de la Atmósfera Mundial (VAM) para registrar las tendencias, a largo plazo, de todos los compuestos troposféricos relacionados con el clima; se basará, en principio, en 30 estaciones cuidadosamente seleccionadas y dispersas por el mundo que midan el ozono superficial, el ozono total en columna y los perfiles verticales de ozono y de otras sustancias atmosféricas; y (b) el proyecto Internacional de la Química Atmosférica Mundial (QAIM) ha establecido, recientemente, un subproyecto fundamental llamado Red Mundial del Ozono (RMO). Apoyará a los investigadores de los procesos en sus esfuerzos por desentrañar la compleja química atmosférica

del ozono y complementará también la componente ozonométrica de la VAM.

Conclusión

La sensibilidad demostrada del forzamiento radiativo del ozono a la respuesta térmica de la baja estratosfera es actualmente un tema importante de preocupación científica. Los experimentos con MCG pronto comenzarán a estudiar cómo las temperaturas estratosféricas y el calentamiento dinámico influyen en el forzamiento climático debido a cambios en la distribución vertical, estacional y por latitud, del ozono. Si queremos comprender tales cambios químicamente inducidos deberemos desarrollar modelos más complejos para evaluar el cambio climático y las distribuciones regionales del O_3 . En consecuencia, son urgentemente necesarios modelos en los que se acoplen procesos físicos, químicos y dinámicos. La comunidad científica está actualmente respondiendo a ese reto.

El seguimiento del ozono troposférico se encuentra, hoy en día, en un estado crítico. El ozono ejerce una influencia clara en la temperatura de superficie; pero si futuros incrementos de gases precursores y de radiación UV-B son virtualmente inevitables, entonces debemos obtener datos mundiales de mejor calidad para documentar los cambios de la composición química de la atmósfera y para mejorar el análisis de las tendencias. Para alcanzar ese objetivo debe ponerse en marcha un conjunto integrado de observaciones de superficie y desde satélites. El actual inventario de herramientas de observación es insuficiente para evaluar fiablemente, a nivel mundial, la incidencia del cambio en el ozono. Existe una fuerte probabilidad de que las mejoras en la adquisición de datos y el nivel de complejidad de los modelos conduzca a un hito importante en la comprensión de las distribuciones del ozono en la troposfera y de su considerable influencia en el cambio climático.

Referencias y bibliografía

- CARROLL, M. A. y A. M. THOMPSON, 1994: NO_x in the non-urban troposphere. In: *Current Problems and Progress in Atmospheric Chemistry*, J. BARKER (Ed.), World Pub. Company (to be published).
- CHAMEIDES, W. L., P. S. KASIBHATLA, J. YIENGER y H. LEVY II, 1994: Growth of continental-scale metro-agroplexes, regional ozone pollution, and world food production, *Science*, **264**, 74-77 (1 April).
- HIDALGO, H. y P. J. CRUTZEN, 1977: The tropospheric and stratospheric composition perturbed by NO_x emissions of high-altitude aircraft. *Jour. Geophys. Res.* **82**, 5 833-5 866.
- HOUGHTON, J. T., B. A. CALLANDER y S. K. VARNEY (Eds.), 1992: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. WMO/UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 1993: *The Atmospheric Effects of Stratospheric Aircraft: A Third Program Report*. Reference Publication 1313, November 1993, Washington, DC, USA.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991: *Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution*. National Academy Press, Washington DC, USA.
- THOMPSON, A. M., 1992: The oxidizing capacity of the earth's atmosphere; Probable past and future changes. *Science*, **256**, 1 157-1 165.
- WANG, W. C., Y.-C. ZHUANG y R. D. BOJKOV, 1993: Climate implications of observed changes in ozone vertical distributions at middle and high latitudes of the northern hemisphere. *Geophysical Research Letters*, **20** (15), 1 567-1 570 (6 August).
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1990: *International Ozone Assessment: 1989*, WMO Global Ozone Research and Monitoring Network Project, Report No. 20, WMO, Geneva.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1991: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991*. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 25, WMO, Geneva.

LA EVALUACION INTERNACIONAL DEL OZONO 1994

Por Rumén D. BOJKOV*

Desde principios de los años setenta, cuando nació la preocupación inicial por la posible disminución del ozono originada por los gases de escape de las aeronaves supersónicas a niveles altos,

ha surgido un interés creciente por la evaluación del estado de la capa de ozono. El conocimiento de la degradación del ozono como consecuencia de las actividades humanas es el resultado de la

* Asesor especial del Secretario General de la OMM en Asuntos del Ozono y del Medio Ambiente Mundial