

CAMBIOS RECENTES EN EL DIOXIDO DE CARBONO, EL MONOXIDO DE CARBONO Y EL METANO Y SUS IMPLICACIONES EN EL CAMBIO CLIMATICO MUNDIAL

Por P. C. NOVELLI^{1,2}, T. J. CONWAY¹, E. J. DLUGOKENCKY¹ y P. P. TANS¹

Introducción

El clima de la Tierra depende de la composición de la atmósfera. La radiación solar que llega al sistema tierra-atmósfera se compensa con la emisión de radiación de onda larga hacia el espacio. La energía absorbida por la Tierra es irradiada al espacio como radiación de onda larga (infrarrojo (IR) e infrarrojo lejano); las nubes y algunos gases presentes en la atmósfera de la Tierra absorben, y después emiten, radiación IR. La atmósfera, al ser más fría que la superficie, absorbe más energía de la que emite al espacio. Esto conduce a un calentamiento de la atmósfera inferior, el fenómeno comúnmente conocido como "efecto invernadero". En la atmósfera, algunos gases, aunque presentes en muy pequeñas cantidades, contribuyen de forma importante a absorber la energía. Algunos de estos gases en trazas, radiativamente importantes (es decir, los gases de efecto invernadero), están presentes de forma natural, por ejemplo el dióxido de carbono y el metano. Son los responsables del clima de la Tierra relativamente cálido y mantenido a largo plazo. Muchos de estos gases, presentes de forma natural, pueden tener también un origen antropogénico. Sin embargo, otros han sido introducidos recientemente en la atmósfera por el hombre (como los clorofluorocarburos (Mitchell, 1989; y muchos otros)).

Fourier (1827) fue uno de los primeros en presentar el efecto invernadero de la atmósfera y en avisar de que la industrialización podría modificar el clima. Estas ideas fueron desarrolladas más tarde por Arrhenius (1896) y Callendar (1938), que surgieron que el incremento de los niveles del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, procedente de la combustión de los combustibles fósiles, podría dar lugar a temperaturas superficiales más altas. En los últimos

año, se han documentado profusamente los cambios en la composición de la atmósfera ocasionados por las actividades humanas. El control de las concentraciones atmosféricas demuestra que el CO_2 , así como otros gases de efecto invernadero, han aumentado en los últimos decenios (IPCC, 1990 y bibliografía adjunta). Se han determinado los cambios para escalas cronológicas más amplias, mediante la comparación de las concentraciones de gases en trazas en el aire atrapado en el hielo polar con las actualmente presentes (Neftel y col., 1985). Estos estudios demuestran que la industrialización de la sociedad ha alterado la composición de la atmósfera. Se prevé que estos cambios conduzcan a un calentamiento de la Tierra (IPCC, 1990 y bibliografía adjunta).

Recientemente se han producido cambios en las tasas de incremento de las concentraciones de los tres gases carbonados más abundantes en la atmósfera: dióxido de carbono, monóxido de carbono (CO) y metano (CH_4). Estos tres gases ejercen una gran influencia sobre la temperatura de la atmósfera. El dióxido de carbono y el metano absorben fuertemente el IR, y su abundancia contribuye directamente al calentamiento atmosférico. El monóxido de carbono no absorbe radiación térmica de una forma significativa, pero desempeña un importante papel en la química atmosférica y tiene un efecto indirecto sobre el clima. Las concentraciones de CO_2 , CO y CH_4 vienen determinadas por los procesos naturales y antropogénicos, y sus ciclos atmosféricos comparten algunas fuentes y sumideros comunes. Informes recientes, de nuestro laboratorio y de otros, indican que durante los años 1991-1993 los aumentos a largo plazo de estos gases o bien disminuyeron drásticamente o bien tomaron la dirección contraria.

Laboratorio de vigilancia y diagnóstico del clima, Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera, R/E/CG1, 325, Broadway, Boulder, Colorado 80301, EE.UU.

Instituto Cooperativo para la Investigación de las Ciencias Ambientales (ICICA), Universidad de Colorado, Boulder, Colorado, 80309-0449, EE.UU.

Más adelante trataremos sobre los últimos cambios del CO₂, CO y CH₄ en términos de fuentes y sumideros, y comentaremos las implicaciones en el futuro cambio del clima.

Cambios recientes en los niveles atmosféricos de CO₂, CO y CH₄

En la atmósfera, solamente las nubes y el vapor de agua absorben más IR que el dióxido de carbono (Dickenson y Cicerone, 1986). Los modelos del ciclo del carbono, a escalas cronológicas menores que las geológicas, describen los movimientos del carbono entre tres depósitos principales: la atmósfera (presente básicamente como CO₂), la biosfera terrestre (como carbono orgánico) y los océanos (abundante como carbono inorgánico). Callendar (1938) revisó los datos disponibles y concluyó que los niveles de CO₂ aumentaban como consecuencia de las actividades humanas y que este incremento conduciría al calentamiento atmosférico. Posteriormente, varios modelos del balance radiativo terrestre han apoyado la hipótesis de que el incremento del CO₂ conduce al cambio climático (Cess y col., 1993 y bibliografía del final). Los niveles de CO₂ en los núcleos del hielo indican que las concentraciones atmosféricas han aumentado desde la revolución industrial, con niveles actuales que reflejan cerca de un 25 por ciento de incremento relativo respecto a los niveles anteriores a 1800 (Neftel y col., 1985). Las medidas de CO₂ en la troposfera indican un aumento en los últimos 30 años (figura 1).

El Grupo del Ciclo del Carbono, del Laboratorio de Control y Diagnóstico del Clima (LCDC), de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera de los EE.UU., ha medido el CO₂ en muestras de aire recogidas en varios emplazamientos mundiales dispersos, desde finales de los años 1970 (Conway y col., 1988). Nosotros también usamos dichas muestras para examinar las distribuciones y tendencias mundiales del metano y del monóxido de carbono (Steele y col., 1987; y Novelli y col., 1992).

Desde 1981 a 1992, Conway y col. (1994), evaluaron los datos de CO₂ de 32 de estos lugares. La característica fundamental de las series cronológicas es un aumento mundial, a largo plazo, en las concentraciones

de CO₂ (figura 2, arriba). Recientemente, la tasa de aumento de CO₂ (razón de crecimiento) ha disminuido (figura 2, abajo). A partir de la máxima razón de crecimiento medio mundial, de aproximadamente 2,5 partes por millón (ppm) y por año, observada en 1987-1988, hubo una disminución hasta 1992 (parte inferior de la figura 2). Durante los años 1991-1992, hubo un aumento extremadamente pequeño de las concentraciones mundiales (aproximadamente 0,6 ppm por año), y no se apreció incremento alguno en las latitudes altas del hemisferio norte.

Las distribuciones atmosféricas de los gases traza vienen determinadas por sus vidas medias, el desequilibrio entre fuentes y sumideros, y los efectos del transporte. Los modelos del ciclo atmosférico del CO₂ tratan de compensar las distribuciones de las concentraciones observadas con las de sus fuentes y sumideros. Estos modelos, a menudo se conciben como combinaciones lineales de las principales fuentes y sumideros del CO₂. La mayor fuente de dióxido de carbono para la atmósfera es la combustión de combustibles fósiles antropogénicos, seguida de las emisiones debidas a la deforestación y a la oxidación del CO a CO₂. Estas fuentes son parcialmente compensadas por la transferencia neta de CO₂ desde la atmósfera al océano y su absorción por ecosistemas terrestres. La distribución de las concentraciones atmosféricas crea fuertes restricciones en los modelos. El incremento observado en el CO₂ atmosférico desde 1958, explica sólo un 58 por ciento de las emisiones estimadas procedentes de la combustión de combustibles fósiles. Los

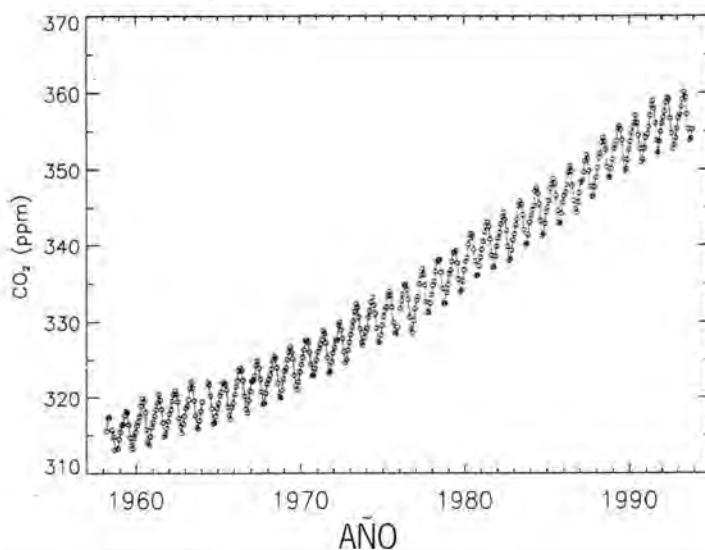


Figura 1 – Registro de las razones de mezcla del CO₂ en Mauna Loa, Hawaii. Los datos anteriores a mayo de 1994 proceden de la Institución Scripps de Oceanografía, La Jolla, California; los datos desde mayo de 1974 son de la NOAA/LCDC, Boulder, Colorado.

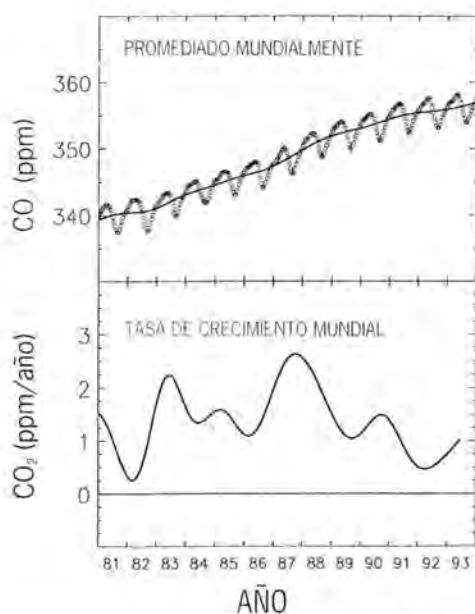


Figura 2 – (*Arriba*) razones de mezcla medias mundiales del CO_2 atmosférico determinadas en unos 40 lugares, empleando el programa cooperativo de muestreo del aire de la NOAA/LCDC (la línea continua representa la tendencia a largo plazo); (*debajo*) tasa media de crecimiento mundial del CO_2 calculada con los datos de la parte superior de la figura.

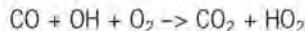
modelos de absorción oceánica explican entre el 26 y el 44 por ciento de la absorción del CO_2 fósil, la diferencia sugiere que la biosfera terrestre es un sumidero del CO_2 (Tans y col., 1990).

Conway y col. (1994), estudiaron los cambios en el aumento del CO_2 empleando un análisis inverso bidimensional (latitud y altura) de los datos de CO_2 del LCDC. El modelo calcula las fuentes y sumideros como función de la latitud a partir de las distribuciones observadas (según describen Tans y col., 1989). Este estudio sugiere que la baja tasa de crecimiento en 1992, se debió básicamente a un incremento de cerca de un 25 por ciento en un sumidero del CO_2 localizado en las latitudes septentrionales, entre los 30° y 60° . Aunque el modelo no da explicaciones sobre las variaciones de fuentes y sumideros, Conway y col. consideraron que la disminución puede estar relacionada con el incremento de la absorción del CO_2 por la biosfera terrestre.

Esta hipótesis está apoyada por las medidas de las razones isotópicas del CO_2 realizadas a la vez que las medidas de las concentraciones sobre la que se trató anteriormente. La composición isotópica de los gases atmosféricos puede ayudar a discernir las magnitudes relativas de diferentes fuentes y sumideros, cuando éstos tienen señales isotópicas únicas. Las medidas del LCDC para el C^{13} en el CO_2 atmos-

férico, fueron modelizadas empleando el modelo inverso de 2-D, modificado para tener en consideración el desequilibrio isotópico y el fraccionamiento asociados a la destrucción y crecimiento de los vegetales. El análisis concluye que los ecosistemas templados y boreales del hemisferio norte, fueron en 1992 un sumidero principal de CO_2 (Ciais y col., 1994).

El papel del monóxido de carbono en el cambio climático es indirecto. Nuestro interés en el CO reside básicamente en la reacción del CO con el radical hidroxilo (OH):



Esta reacción explica del 90 al 95 por ciento de la eliminación del CO de la atmósfera y el 75 por ciento de la eliminación del OH (Logan y col., 1981; Thompson, 1992). Esta fuerte interrelación crea una realimentación inversa entre los niveles de OH y de CO. Los modelos fotoquímicos de la atmósfera muestran que si los niveles de CO aumentan, los de OH disminuyen. Una disminución en el OH afecta después a la eliminación de otros gases oxidados por este radical, principalmente el CH_4 (Thompson y Cicerone, 1986). De este modo, el CO tiene una influencia indirecta sobre el equilibrio radiativo de la tierra.

Las tendencias a largo plazo del monóxido de carbono no están bien definidas. Las medidas de la columna total de CO realizadas en 1951 y de nuevo, en 1985, en el Observatorio de Jungfraujoch, en los Alpes suizos, indican un incremento medio anual de un 1 por ciento, sobre este lugar (Zander y col., 1989) (a)). La razón de mezcla del CO medida en la capa límite de ocho lugares, entre 1981 y 1987, sugiere un incremento medio entre 1 y 2 por ciento, por año (Khalil y Rasmussen, 1988), pero las medidas realizadas en El Cabo, África del Sur, durante un período similar, no mostraron una tendencia significativa (Brunke y col., 1990). Ultimamente ha habido una disminución en los niveles del CO atmosférico. Este cambio comenzó, de forma gradual, a finales de los años 1980 (Khalil y Rasmussen, 1994) y fue seguido por un descenso bastante brusco que comenzó a finales de 1991 (Novelli y col., 1994) (figura 3). Desde junio de 1990 hasta junio de 1993, la media mundial del nivel de CO, determinada mediante la red atmosférica de muestreo del LCDC, disminuyó unas 6,2 partes por millar de millones (ppmm) por año o casi un 20 por ciento a lo largo de un período de tres años (Novelli y col., 1994).

Las principales fuentes de CO son la combustión de combustibles fósiles, las emisiones generadas por la quema de la biomasa (principalmente en la limpieza del terreno y en los desechos agrícolas) y la oxidación del CH_4 atmosférico y otros hidrocarburos no metánicos. El

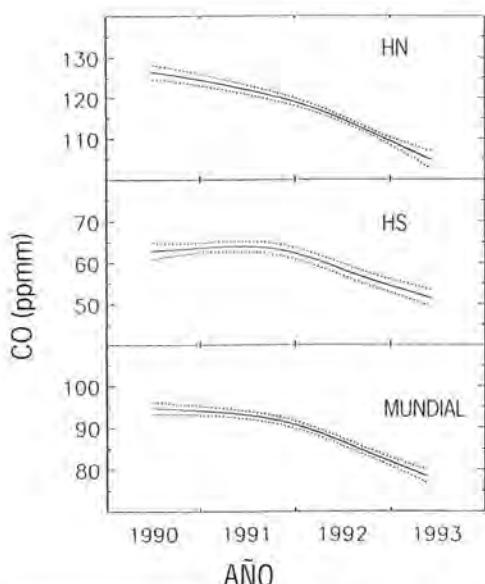


Figura 3 – Razones medias de mezcla del CO determinadas en 27 lugares de todo el mundo empleando la red cooperativa de muestras del aire de la NOAA/LCDC: (arriba) valores medios en el hemisferio norte (HN); desde junio de 1990 a junio de 1993; (en medio) lo mismo que arriba para el hemisferio sur (HS); (debajo) razones de mezcla medias mundiales del CO. La línea continua representa la razón de mezcla promediada espacialmente, la línea discontinua representa la incertidumbre del promedio determinado empleando la técnica "bootstrap".

mayor sumidero es la reacción con el OH. Novelli y col. (1994), examinaron la reciente disminución del CO, relacionando la variación del mismo en la troposfera (relativo a su concentración) con los cambios en fuentes concretas y mediante la reacción con el OH. Dedujeron que solamente una pequeña parte de la disminución observada, podría explicarse en términos de disminuciones razonables de las emisiones de combustibles fósiles, de cambios en el metano atmosférico o de aumento a largo plazo del OH. Los autores especulan sobre si la disminución de las emisiones de CO debidas a la quema de biomasa (QB), contribuye a disminuir el CO, o posiblemente se debe a un aumento reciente y rápido de los niveles de OH.

Estudiamos la sensibilidad de los niveles atmosféricos de CO a la reducción de QB, empleando las expresiones que relacionan los cambios en las concentraciones del CO atmosférico con los cambios en fuentes y sumideros descritos en Novelli y col. (1994). Aceptando que la QB explica casi el 24 por ciento del origen mundial del CO (Logan y col., 1981), y que el 15, el 30 ó el 50 por ciento de la disminución media observada del CO (6,5 por ciento anual) era debido a una dismi-

nución de la QB, el CO proveniente de esta fuente debería, por lo tanto, haber disminuido un 4, un 8 ó un 12 por ciento anual, respectivamente, en los tres últimos años. Incluso variaciones de la QB por encima de este intervalo, no son excesivas (J. Lobert, Cires/LCDC), comunicación personal, 1994). Los datos climatológicos indican que 1991-1992 fue uno de los períodos más secos del último siglo en África oriental y occidental (NOAA), e informes ocasionales sugieren que la sequía origina, frecuentemente, una menor quema de biomasa ya que gran parte de ésta, está relacionada con la agricultura.

Además de una disminución de la QB, un reciente aumento del OH, quizás como resultado de la erupción del Pinatubo, podría haber originado disminuciones del CO y de otros gases reducidos. La inyección de azufre volcánico hacia la estratosfera puede haber ocasionado una eliminación heterogénea de ozono (O_3). La disminución de ozono permitiría que llegara a la atmósfera inferior más radiación UV y, por tanto, se produciría más OH [$O_3 + h\nu \rightarrow O^+ + O_2$; y después $O^+ + H_2O \rightarrow 2 OH$] (Madronich y Grainer, 1992). Aunque existe cierto desacuerdo sobre la localización de la mayor disminución, parece que el O_3 estratosférico, en 1992-1993, fue inferior a la media climatológica de 15 años (Gleason y col., 1993; Grant y col., 1994).

El metano atmosférico absorbe la radiación infrarroja y contribuye directamente al efecto invernadero (Dickenson y Cicerone, 1986). Los niveles de metano en la atmósfera han aumentado durante la era industrial, como se deduce de las medidas realizadas en los núcleos del hielo polar (Rasmussen y Khalil, 1984), y de medidas recientes de la razón de mezcla del CH_4 atmosférico. Khalil y Rasmussen (1989), revisaron las medidas del CH_4 realizadas por distintos laboratorios en momentos distintos, durante el período 1962-1979, y calcularon un aumento mundial del CH_4 de un 1 por ciento anual, durante este período; una tendencia en consonancia con las medidas espectroscópicas realizadas por encima del Observatorio de Jungfraujoch (Zander y col., 1989 (b)).

Las medidas de metano realizadas por el LCDC en numerosos puntos del mundo indican que, aunque la cantidad de CH_4 en la atmósfera continúa aumentando, durante el decenio de los años 80, la tasa de crecimiento mundial disminuyó (Steele y col., 1992; Dlugokencky y col., 1994). Estos datos indican una deceleración de la tendencia a largo plazo para el aumento del metano: desde un máximo de 13,3 ppmm al año, a comienzos del decenio de los 80, hasta 9,5 ppmm al año, en 1990 (parte superior de la figura 4). En 1991, hubo un aumento de la razón de crecimiento del CH_4 , en particular en el hemisferio sur. Los niveles de CO también au-

mentaron en el hemisferio sur en 1991, posiblemente como resultado de los efectos dinámicos inducidos por la erupción del Pinatubo (15 de junio de 1991) (véase Pitari, 1993). A este aumento le siguió un espectacular descenso del CH₄ (parte inferior de la figura 4); durante 1992, el metano aumentó sólo mínimamente en el hemisferio norte. Durante el periodo de medidas, la razón de crecimiento en el hemisferio sur presenta una variación interanual considerable, con un valor especialmente bajo en 1990 y, de nuevo, en 1992 (Dlugokencky y col., 1994).

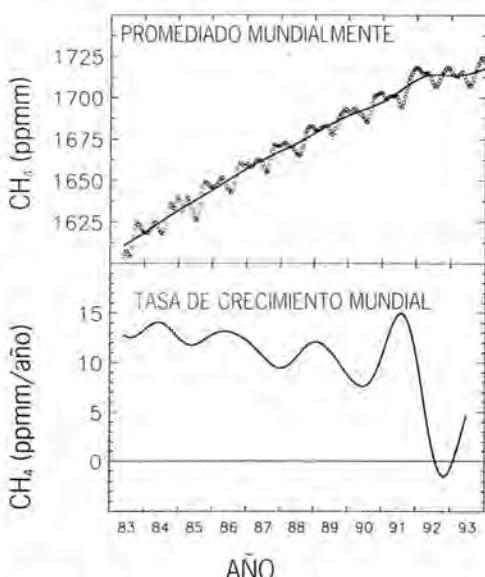
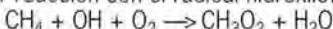


Figura 4 - (Arriba) razones de mezcla medias mundiales del CH₄ atmosférico determinadas en unos 40 lugares, empleando el programa cooperativo de muestreo del aire de la NOAA/LCDC (la línea continua representa la tendencia a largo plazo); (debajo) tasa media de crecimiento mundial del metano calculada con los datos de la parte superior de la figura.

Aunque el balance mundial del metano no está bien delimitado, se cree que cada una de sus fuentes principales (tierras húmedas, cultivos de arroz, pozos petrolíferos y animales rumiantes) origina entre un 15 a 20 por ciento del total. Otras fuentes son la QB (del 10 al 20 por ciento), los océanos y los escapes de gas natural (<10 por ciento) (Cicerone y Oremland, 1988). Casi todo el CH₄ se elimina de la atmósfera por reacción con el radical hidroxilo:



Dlugokencky y col. (1994), estudiaron las bajas tasas de crecimiento de 1992, respecto al balance mundial de CH₄, y dedujeron que la disminución actual podría deberse a una reducción de aproximadamente un 2 por ciento del total

de la fuente. Sugieren que el cambio en el hemisferio norte puede reflejar una mayor eficiencia (menores pérdidas) en el suministro de gas natural en la antigua URSS.

Una fracción significativa de la disminución observada en el CO podría ser una consecuencia razonable de una reducción en las emisiones de la QB. Si durante 1991-1993 se hubiera producido una disminución semejante cabría esperar, también, un efecto similar sobre el CH₄ atmosférico. Previamente, determinamos que una reducción anual de un 8 por ciento en la QB podría justificar un tercio de la reducción total. Podemos calcular el cambio en la fuente total de CH₄ a partir de una reducción de la QB de este orden. Si aceptamos que las emisiones varían con la cantidad quemada y que la QB representa el 10 por ciento de la fuente total del CH₄ (Cicerone y Oremland, 1988), entonces una reducción de un 8 por ciento anual en la QB indicaría una disminución de la fuente total anual (alrededor de 500 Tg) de 4 Tg por año. Este valor es ligeramente inferior a la mitad de la reducción estimada para 1992 a partir de los datos de CH₄ atmosférico (Dlugokencky y col., 1994).

Las medidas de ¹³CH₄/¹²CH₄ realizadas en Baring Head, Nueva Zelanda, indican que la QB es una fuente importante de CH₄ en el hemisferio sur, y los cambios recientes en la razón isotópica del carbono en el metano, indican una reducción brusca de las emisiones procedentes de esta fuente durante 1991-1992 (Lowe y col., 1994). Lowe y col., calculan la reducción del CH₄ procedente de la QB en un 40 por ciento de toda la fuente hemisférica (aceptando que la QB representa un 6 por ciento del total de la fuente), lo cual es significativamente mayor que la indicada por las razones de mezcla del CH₄. No obstante, es probable que las recientes disminuciones de CO y CH₄ reflejen una reducción de las emisiones procedentes de la quema de biomasa.

Los cambios recientes del CO₂, del CO y del CH₄ y el cambio climático

Las predicciones sobre el clima futuro de la Tierra tienen en cuenta los efectos de la actividad humana en la atmósfera. Los cálculos de las concentraciones futuras de los gases traza atmosféricos incluyen la extrapolación de las actuales razones de crecimiento, ajustadas para los cambios previstos en sus fuentes y sumideros (Dickenson y Cicerone, 1986). Puesto que, con frecuencia, el balance total de estos gases está poco definido, las predicciones de las concentraciones futuras son difíciles. Estas incertidumbres se reflejan en las predicciones del calentamiento atmosférico futuro.

Las concentraciones del dióxido de carbono, del monóxido de carbono y del metano desempe-

ñan claramente su función en el desequilibrio radiativo de la Tierra, y sus variaciones podrían ocasionar un cambio en el clima mundial. Es difícil de calcular el impacto sobre el clima de las recientes disminuciones en las razones de crecimiento del CO₂ y CH₄ y de la reducción de los niveles atmosféricos del CO. La dificultad radica básicamente en la interpretación: ¿Representan cambios fundamentales que persistirán durante decenios?, ¿o quizás los datos atmosféricos reflejan algunas variaciones inusuales, y posiblemente de corta duración, y por otro lado tendencias a largo plazo? Con los datos disponibles estas preguntas no se pueden contestar de forma categórica. Sin embargo, las últimas medidas de la red de muestreo atmosférico de la NOAA/LCDC, indican que las bajas tasas de crecimiento del CO₂, CO y CH₄ han comenzado a recuperarse.

La vigilancia futura de los compuestos dirá si las tasas de crecimiento a largo plazo han cambiado significativamente; los laboratorios de todo el mundo continuarán realizando estas medidas. Ellas, junto con la información de las señales isotópicas de los gases traza, mejorarán nuestra capacidad para comprender las causas posibles para las tendencias de estos gases. Esto será inestimable en la toma de decisiones políticas en relación con el cambio climático futuro.

Referencias

- ARRHENIUS, S., 1896: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Philos. Mag.*, **41**, 237-277.
- BRUNKE, E. G., M. E. SCHEEL y W. SEILER, 1990: Trends of tropospheric carbon monoxide, nitrous oxide and methane as observed at Cape Point, South Africa, *Atmos. Environ.*, **24**(A), 585-595.
- CALLendar, G. S., 1938: The artificial production of carbon dioxide and its effect on temperature, *Quart. Jour. R. Meteor. Soc.*, **64**, 223-240.
- CESS, R. D. et al., 1993: Uncertainties in carbon dioxide of radiative forcing in atmospheric general circulation models, *Science*, **262**, 1 252-1 255.
- CLAIS, P., P. P. TANS, J. W. C. WHITE, M. TROLIER, R. J. FRANCEY, J. A. BERRY, D. R. RANDALL, P. J. SELLERS, J. G. COLLATZ y D. S. SCHIMEL, 1994: Partitioning of ocean and land uptake of CO₂ as inferred by ¹³C measurements from the NOAA/CMDL global air sampling network, *Jour. Geophys. Res.* (In press).
- CICERONE, R. J. y R. OREMPLAND, 1988: Biogeochemical aspects of atmospheric methane, *Global Biogeochemical Cycles*, **2**, 299-328.
- CONWAY, T. J., P. P. TANS, L. S. WATERMAN, K. W. THONING, K. A. MASARIE y R. H. GAMMON, 1988: Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984, *Tellus*, **40**(B), 81-115.
- CONWAY, T. J., P. P. TANS, L. S. WATERMAN, K. W. THONING, D. R. KITZIS, K. A. MASARIE y N. ZHANG, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL global air sampling network, *Jour. Geophys. Res.* (In press).
- DICKERSON, R. E. y R. J. CICERONE, 1986: Future global warming from atmospheric trace gases, *Nature*, **319**, 109-115.
- DLUGOKENCKY, E. J., K. A. MASARIE, P. M. LANG, P. P. TANS, L. P. STEELE y E. G. NISBET, 1994: A dramatic decrease in the growth rate of atmospheric methane in the northern hemisphere during 1992, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 45-48.
- FOURIER, J. B., 1827: Les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Mem. Acad. Sci. Fr.*, **7**, 569-607.
- GLEASON, J. F., P. K. BHARTIA, J. R. HERMAN, R. MCPETERS, P. NEWMAN, R. S. STOLARSKI, L. FLYNN, G. LABOW, D. LARKO, C. SEFTOR, C. WELLEMAYER, W. D. KOMHYR, A. J. MILLER y W. PLANET, 1993: Record low global ozone in 1992, *Science*, **260**, 523-526.
- GRANT, W. B., E. V. BROWELL, J. FISHMAN, V. G. BRACKETT, R. E. VEIGA, D. NGANGA, A. MINGA, B. CROS, C. F. BUTLER, M. A. FENN, C. S. LONG y L. STOWE, 1994: Aerosol-associated changes in tropical stratospheric ozone following the eruption of Mount Pinatubo, *Jour. Geophys. Res.* (In Press).
- IPCC, 1990: *Climate change. The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press.
- KHALIL, M. A. K. y R. A. RASMUSSEN, 1988: Carbon monoxide in the Earth's atmosphere: Indications of a global increase, *Nature*, **332**, 242-245.
- KHALIL, M. A. K. y R. A. RASMUSSEN, 1989: Trends of atmospheric methane during the 1960s and 1970s, *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 18 279-18 288.
- KHALIL, M. A. K. y R. A. RASMUSSEN, 1994: Global decrease in atmospheric carbon monoxide concentration, *Nature*, **370**, 639-641.
- LOGAN, J. A., M. J. PRATHER, S. C. WORSY y M. B. McELROY, 1981: Tropospheric chemistry: A global perspective, *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 7 210-7 254.
- LOWE, D. C., C. A. M. BRENNINKMEIJER, G. W. BRAILSFORD, K. R LASSEY, A. J. GOMEZ y E. G. NISBET, 1994: Concentrations and ¹³C records of atmospheric methane in New Zealand and Antarctica: evidence for changes in methane sources, *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 16 913-16 926.
- MADRONICH, S. y C. GRANIER, 1992: Impact of recent total ozone changes on tropospheric ozone photo-dissociation, hydroxyl radicals, and methane trends, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 465-467.
- MITCHELL, J. F. B., 1989: The greenhouse effect and climate change, *Rev. Geophys.*, **27**, 115-139.
- NEFTEL, A., E. MOOR, A. OESCHGER y B. STAUFFER, 1985: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries, *Nature*, **315**, 45-47.
- NOVELLI, P. C., L. P. STEELE y P. P. TANS, 1992: Mixing ratios of carbon monoxide in the troposphere, *Jour. Geophys. Res.*, **97**, 20 731-20 750.
- NOVELLI, P. C., K. A. MASARIE, P. P. TANS y P. M. LANG, 1994: Recent changes in atmospheric carbon monoxide, *Science*, **263**, 1 587-1 590.
- PITARI, G., 1993: A numerical study of the possible perturbation of stratospheric dynamics due to Pinatubo aerosols: implications for tracer transport, *Jour. Atmos. Sci.*, **50**, 2 443-2 461.

- 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. DLUGOKENKY, 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. EHHALT, 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. EHHALT 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 TROPOSFÉRICO 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 fortalecimiento 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 Atmósfericas, Garantía de Calidad/Centro de Actividad en Ciencias, Instituto Fraunhofer para la Investigación Atmósferica 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