



# La atmósfera global: los gases de efecto invernadero y la contaminación urbana

por Euan Nisbet<sup>1</sup> y Martin Manning<sup>2</sup>

## Introducción

**Durante cincuenta años, desde que Dave Keeling comenzó a realizar un seguimiento del dióxido de carbono en Mauna Loa (Hawai) y en el Polo Sur, muchos científicos han rastreado los gases de efecto invernadero y otros gases traza presentes en la atmósfera global.** Los resultados han revolucionado nuestra forma de entender la biogeoquímica y, asimismo, han demostrado que la actividad humana influye en el cambio climático y en la calidad del aire. Las mediciones precisas de las concentraciones de gases traza, iniciadas por Dave Keeling, comenzaron como una investigación científica emocionante y desembocaron, probablemente, en el desafío socioeconómico y político de mayor importancia al que la humanidad se ha enfrentado.

A través de mediciones precisas y calibradas de gases traza en varios emplazamientos hemos sido capaces de elaborar balances exactos para las fuentes y los sumideros de los gases de efecto invernadero y de los contaminantes que determinan la calidad del aire. Los efectos antropógenos en la atmósfera se han identificado claramente. Al mismo tiempo, hemos perfeccionado nuestra comprensión acerca de la envergadura de los daños que puede generar un cambio atmosférico sin límites. Esto ha provocado que el mundo entero

[...] la vigilancia de la atmósfera nos proporciona la visión general más completa de los cambios biogeoquímicos que se producen en un mundo que se está calentando a gran velocidad.

se replantee la dirección y el modelo de actividad económica.

Los avances tecnológicos necesarios para evitar cambios perjudiciales para la atmósfera tienen un coste pero, cada vez más, la evidencia demuestra que el precio de no hacer nada sería mucho mayor. Las consecuencias en la calidad del aire y en el cambio climático ascienden posiblemente a billones de dólares (Burtraw y otros, 2003; Metz y otros, 2007; Sitch y otros, 2007). Irónicamente, a pesar de la atención internacional que se presta al cambio global, el seguimiento preciso y estratégico de los gases traza presentes en la atmósfera, que identificaron el problema en primera instancia, carece de una gran financiación (Nisbet, 2007). Sin embargo, esta “ciencia cenicienta” sigue siendo la única con medios que señalen si la mitigación está teniendo resultados.

Si diésemos por sentado el cambio atmosférico, se justificaría un enfoque de vigilancia minimalista. Sin embargo, el agujero de la capa de

ozono demostró que la química de la atmósfera es capaz de dar sorpresas. Es más, la vigilancia de la atmósfera nos proporciona la visión general más completa de los cambios biogeoquímicos que se producen en un mundo que se está calentando a gran velocidad. Este no es momento para dar por sentada la vigilancia de la atmósfera.

## ¿Qué gases de efecto invernadero se vigilan y dónde?

Es necesario vigilar los gases de efecto invernadero por varias razones. En primer lugar, la respiración de la Tierra es una ciencia fundamental. Keeling (1960), en su primer informe, documentó el ciclo estacional de aumento y descenso de la biosfera planetaria y mostró el efecto dominante de las masas de tierra del hemisferio norte sobre las del sur. En segundo lugar, y lo que es más preocupante, la vigilancia ha detectado el continuo aumento del nivel de dióxido de carbono. Las mediciones comenzaron en Hawai en marzo de 1958; entonces se registraron 316 partes por millón (ppm) de dióxido de carbono. En marzo de 2007, el valor comparable era 384 ppm. La curva de Mauna

1 Departamento de ciencias de la Tierra, Royal Holloway, Universidad de Londres (Reino Unido)

2 Instituto de investigación sobre el cambio climático, Universidad Victoria de Wellington (Nueva Zelanda)

Loa, simple e inequívoca, cambió nuestra forma de concebir el mundo y nuestros actos.

En la actualidad, muchos países declaran sus emisiones de gases de efecto invernadero, que se calculan a partir de datos económicos y estadísticos, tales como las toneladas de combustible fósil quemado, las filtraciones de vertederos o el cálculo de las emisiones de metano de las vacas (que pueden variar considerablemente de un país a otro). Existen documentos en los que figura esta información pero, pese a la posibilidad de errores en el proceso de acopio de datos, estas emisiones todavía no se han verificado de forma independiente y completa. Este es el mayor defecto del proceso de Kioto, ya que en él las emisiones se asocian con costes financieros reales o con ganancias.

Hoy en día, la vigilancia mundial de los gases de efecto invernadero y de sustancias similares que llevan a cabo muchas naciones por el bien público está comenzando a proporcionar un enfoque independiente y científico para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero. Por el momento, la información solo sir-

ve para ofrecer elementos generales y muy regionales que ayuden a comprender la situación o para cuantificar penachos que proceden de fuentes localizadas de gran tamaño. En el futuro, en virtud de un tratado de Kioto complementario, se deberían llevar a cabo un mayor número de acciones con el fin de garantizar su aplicación en todos los niveles: local (por ejemplo, en una fábrica), regional, nacional y continental.

Los principales componentes traza presentes en la atmósfera vigilados a escala mundial son:

- los principales gases que regula Kioto, esto es, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el hidrofluorocarbono (HFC), el perfluorocarbono (PFC) y el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ );
- los gases que agotan la capa de ozono tales como el clorofluorocarbono (CFC) y el hidroclorofluorocarbono (HCFC), controlados por el Protocolo de Montreal;
- los gases de efecto invernadero indirecto, como el hidrógeno

( $\text{H}_2$ ), que en una economía de hidrógeno crecería bruscamente, y el monóxido de carbono (CO) (implicado en la química del metano y en la calidad del aire); y,

- el dióxido de carbono isotópico ( $^{13}\text{CO}_2$ ), el metano isotópico ( $^{13}\text{CH}_4$ ), y el ozono ( $\text{O}_3$ ), que limitan las fuentes y los balances de  $\text{CO}_2$ .

A escala local y regional, muchos contaminantes de corta duración, tales como los compuestos orgánicos volátiles (COV), el óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y las partículas, son vigilados junto con sustancias que resultan de sus reacciones químicas, por ejemplo, el ozono.

No todos estos gases se vigilan por igual y la cobertura espacial y temporal de la información disponible varía enormemente. Pero, en cualquier caso, el alcance limitado de la cobertura o el carácter esporádico de los programas de mediciones que no se financian de forma continua están limitando nuestra capacidad para identificar cambios de origen natural o humano. Durante muchos años, la verificación de los efectos de la po-

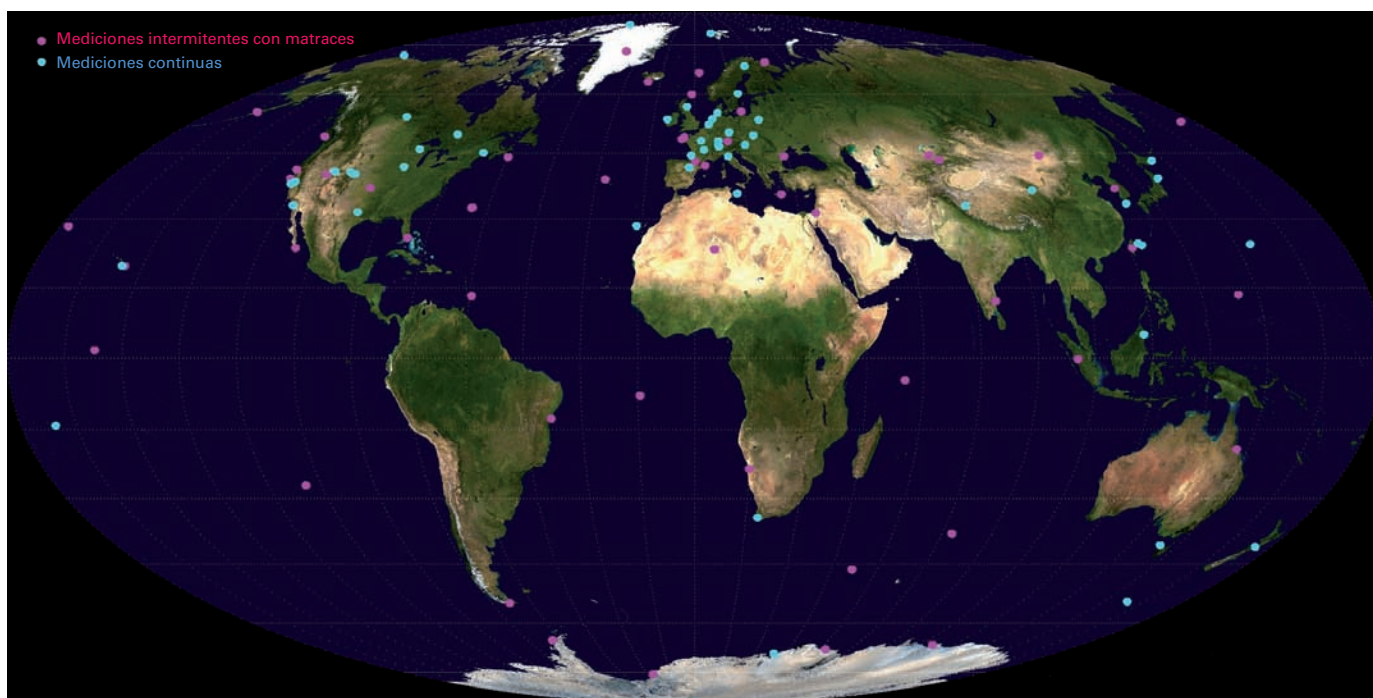


Figura 1 — Lugares del mundo en los que se vigila el dióxido de carbono en noviembre de 2008 (cortesía de A.C. Manning). Las estaciones indicadas pertenecen a programas de la NOAA (EEUU), del Instituto de investigación Scripps (EEUU), de Princeton (EEUU), de la Organización de investigación y ciencia de la Commonwealth (Australia), del Instituto nacional de investigaciones sobre el agua y la atmósfera (Nueva Zelanda), del Instituto nacional de estudios ambientales (Japón), del Servicio Meteorológico de Sudáfrica y de CarboEurope-IP (UE, incluyendo el programa francés RAMCES).

lítica en el control de las emisiones se ha identificado como uno de los posibles objetivos de los programas nacionales e internacionales de la ciencia atmosférica, pero aún debe lograrse de forma significativa.

Grupos nacionales y multinacionales, algunos gubernamentales, y otros vinculados a universidades se encargan de realizar la vigilancia. El programa de vigilancia mundial más exhaustivo lo lleva a cabo la Administración nacional del océano y de la atmósfera de los Estados Unidos (NOAA), que también aporta la mayor parte de la normativa sobre calibración. El trabajo de la NOAA sobre dióxido de carbono está estrechamente coordinado con los programas nacionales de Australia, Canadá, China, Japón, Nueva Zelanda y Sudáfrica, entre otros, pero no con el Reino Unido: una excepción considerable respecto a los países desarrollados.

Los programas de la Unión Europea, como CarboEurope y GEOmon, contribuyen de forma significativa al coordinar los esfuerzos nacionales, por ejemplo, la red francesa RAMCES (Red atmosférica de medición de compuestos de efecto invernadero), y al ayudar a realizar mediciones en la India y en África. Sin embargo, muchos programas de vigilancia reciben poca financiación o son propensos a reducciones importantes (como ha ocurrido con el trabajo de prestigio mundial que se realizaba en Australia y en Canadá así como con el programa de vigilancia del metano de la Unión Europea). Las principales deficiencias de la red de vigilancia se dan en los trópicos, especialmente en la India (donde Francia realiza cierta labor de vigilancia), en Arabia Saudí, en el África Tropical y en Brasil (desde donde es difícil enviar muestras).

La OMM coordina las mediciones de todo el mundo y el análisis de las mismas, por ejemplo, al apoyar desde 1975 un encuentro internacional bienal de la comisión de expertos sobre dióxido de carbono y gases traza. A través del programa de la Vigilancia atmosférica global (VAG), la OMM es la responsable de ayudar a los asociados internacionales que mantienen los componentes clave de la red mundial de medición del dióxido de carbono y gases traza de la VAG, que es parte del Sistema

mundial de observación del clima. El gran compromiso adoptado por la comunidad internacional que investiga el ciclo del carbono ha facilitado el acuerdo sobre las normas y la metodología analítica. Esta comunidad ayuda a la OMM a publicar un boletín anual sobre los gases de efecto invernadero en el que se hace constancia del consenso existente sobre la composición y la tendencia de dichos gases. Lo que es más importante, los grupos de expertos sobre mediciones del VAG inician estudios de comparación circulares descuidados por los organismos de financiación, pero sin los cuales la colaboración internacional y la mayor parte de la modelización de los balances carecería prácticamente de valor. Aproximadamente 25 programas nacionales participan en este trabajo (el número va en aumento). El trabajo tiene un alcance mundial, especialmente gracias a la NOAA y al programa RAMCES, que utilizan las islas oceánicas estratégicamente. Sin embargo, hay deficiencias en la cobertura (Figura 1), sobre todo en los trópicos.

La vigilancia por satélite de gases traza todavía está en su etapa preliminar pero proporcionará una imagen más amplia y valiosa. Los sistemas de satélites, como el Espectrómetro de absorción de imágenes mediante exploración para cartografía de la atmósfera (Sciamachy) del satélite de observación del medio ambiente

(Envisat) de la Unión Europea, usan el infrarrojo cercano para medir la cantidad total de dióxido de carbono y metano presente en la columna vertical de la atmósfera. Dentro de poco, el Observatorio orbital de carbono (OCO) de la NASA y el satélite IBUKI (GOSAT) de la Agencia de exploración aeroespacial de Japón, que observa los gases de efecto invernadero, proporcionarán cobertura adicional en la mayor parte del mundo. En principio, la cobertura prácticamente mundial que ofrecen las técnicas de teledetección nos conducirá a mejorar nuestra capacidad para relacionar la actividad humana en la concentración de gases traza con la distribución de las fuentes y sumideros que las causan (Rayner y O'Brien, 2001). De todos modos, este enfoque todavía tiene que ser probado. En el futuro cercano, dependemos claramente de la red terrestre. Además, a largo plazo, continuaremos necesitando la verificación en tierra de datos proporcionados por las mediciones en la columna de superficie y en la ascendente.

El dióxido de carbono varía a lo largo del planeta. Keeling demostró que cambia considerablemente en una escala de tiempo plurianual, pero también existen variaciones estacionales y latitudinales importantes. La Figura 2 muestra la "alfombra de carbono" o "alfombra mágica", es decir, el dióxido de carbono presente en la capa marina límite por tiempo

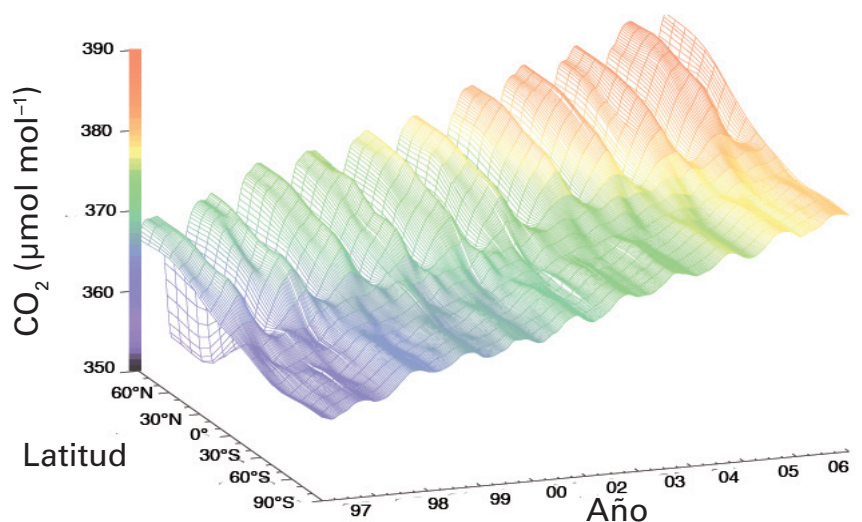


Figura 2 — Promedio mundial de la distribución del dióxido de carbono atmosférico en el fondo marino por tiempo y latitud (datos de la red cooperativa de muestreo de aire del Laboratorio de investigación del sistema terrestre de la NOAA ([www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov)))

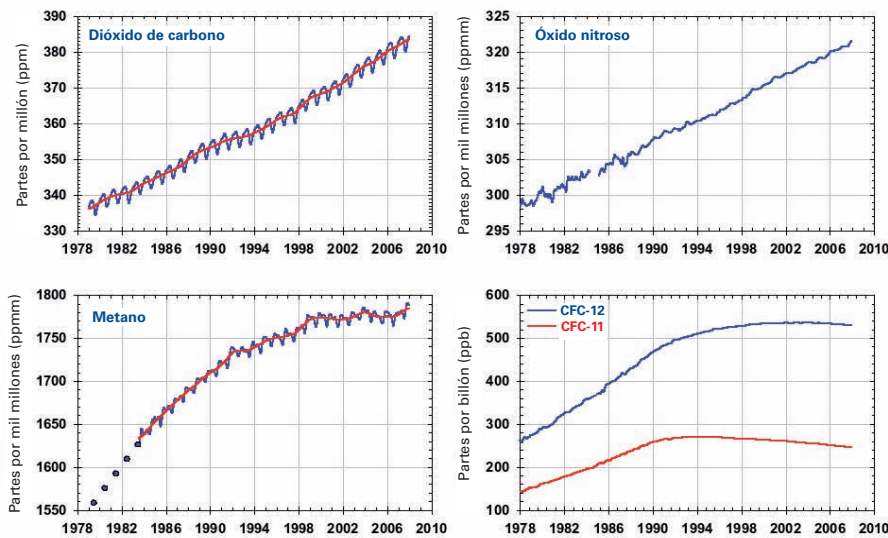


Figura 3 — Promedios mundiales de las concentraciones de los gases de efecto invernadero más importantes, bien mezclados, de larga duración: dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, CFC-12 y CFC-11. Datos recogidos desde 1978 por la red cooperativa de muestreo de aire del Laboratorio de investigación del sistema terrestre de la NOAA ([www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/))

y latitud. Esto es un registro maravilloso de la respiración de la biosfera de nuestro planeta y del incremento de la actividad humana. La topografía fina de la variación mundial de dióxido de carbono puede compararse con la variación global en temperatura absoluta. Mientras que, durante un anticiclón primaveral, el nivel de dióxido de carbono en tierra en una región altamente industrializada puede exceder las 450 ppm, en un bosque a mil kilómetros de distancia dicho nivel puede ser 100 ppm inferior. Compárese esta información con la temperatura de 330 K en el Sahara y de 230 K en el Polo Sur en el mes de julio. Hay ciclos estacionales grandes y un gradiente hemisférico más importante.

## El efecto invernadero mundial

La Figura 3 muestra la evolución de los promedios mundiales de los gases de efecto invernadero más importantes desde 1978, según datos de la red cooperativa de muestreo de aire del Laboratorio de investigación del sistema terrestre de la NOAA. El aumento del dióxido de carbono parece inexorable, especialmente en el último decenio. Obsérvese el cambio que se produce en la pendiente en el período de menor crecimiento y de El Niño a comienzos de los noventa. El óxido nítrico también crece a un rit-

mo constante: este gas, liberado en la fabricación del nailon y en la agricultura, puede ser un objetivo rentable de las medidas de reducción.

El metano es, incluso por delante del óxido nítrico, un primer objetivo interesante para la labor de reducción ya que muchas de sus emisiones, como las de los vertederos y los gasoductos, son económicamente dispendiosas y medioambientalmente perjudiciales. El balance de metano estuvo cerca de alcanzar el equilibrio a principios de la década de los noventa pero, en la actualidad, el balance de este gas puede estar creciendo nuevamente, especialmente en el Ártico (resultados de la NOAA que aún no se han publicado, y Rigby y Prinn, 2008). Todavía se desconocen los motivos de dicho aumento y esto, mientras continúe así, constituye una crítica contundente a nuestra capacidad para diagnosticar el cambio atmosférico. La Unión Europea financió hace unos años la vigilancia de los isótopos del metano presente en el Ártico que, en principio, permitía distinguir las fuentes de aporte. Este programa terminó y ahora prácticamente toda la investigación isotópica en el Ártico está en manos de programas estadounidenses y nacionales. Por último, la Figura 3 muestra reducciones alentadoras de los clorofluorocarbonos, lo que refleja el éxito del proceso del Protocolo

de Montreal. Este resultado es un indicador esperanzador para continuar con el Protocolo de Kioto.

## ¿Para qué medir los gases de efecto invernadero?

### Estudios regionales

El estudio detallado de la distribución del dióxido de carbono que proporcionan las redes de vigilancia ayuda a resolver varias cuestiones científicas. Por ejemplo, permite cuantificar los sumideros de dióxido de carbono en la tierra y en los océanos, evaluar las consecuencias de la ola de calor que vivió Europa en 2003 sobre el nivel de dióxido de carbono presente en la atmósfera, estudiar las consecuencias del ciclo de El Niño/Oscilación Austral u observar los principales impactos de los episodios volcánicos.

En los Estados Unidos de América, la NOAA vigila el dióxido de carbono realizando observaciones de forma continua desde torres de gran altura y recogiendo muestras con una pequeña aeronave. La información recogida proporciona gradientes regionales en espacio y tiempo, que se introducen en un sistema de modelización de la asimilación de datos del ciclo del carbono denominado *Carbon Tracker* (rastreador de carbono). A partir de los datos que ofrece el mencionado sistema, Peters y otros (2007) calcularon el intercambio neto de dióxido de carbono entre la tierra y la atmósfera desde 2000 hasta 2005. Descubrieron que la biosfera continental de América del Norte es un sumidero de carbono de gran importancia, ya que absorbe unos  $0,65 \times 10^{15}$  gramos de carbono por año (nota: la variabilidad es grande, desde  $0,4$  hasta  $1,01 \times 10^{15}$  g/año). Esto compensa parcialmente las emisiones de combustible fósil, calculadas en  $1,8 \times 10^{15}$  g/año. En Europa está en curso un programa de vigilancia desde torres altas como parte del programa Chiotto de CarboEurope y del emergente Sistema integrado de observación del carbono.

Stephens y otros (2007) utilizaron perfiles verticales obtenidos a partir de mediciones tomadas desde aeronaves para inferir que la absorción

del norte era de aproximadamente  $1,5 \times 10^{15}$  g/año, estimación menor a la de años anteriores, y que las emisiones netas tropicales eran bajas ( $0,1 \times 10^{15}$  g/año), lo que supone que la fuerte absorción de los trópicos equilibra en gran parte la mayor proporción de las emisiones de la tala de bosques tropicales y de los incendios de herbazales. Piao y otros (2008) llaman a la cautela porque, al utilizar los datos y modelos sobre observaciones de la NOAA, descubrieron que el calentamiento otoñal podría tener graves consecuencias en el balance de dióxido de carbono.

La vigilancia isotópica resulta especialmente impactante. Como las emisiones de diferentes fuentes tienen distinta proporción isotópica, es posible calcular la intensidad de la fuente. Por ejemplo, si desde una cuenca minera soplan vientos enriquecidos en  $^{13}\text{CH}_4$ , dicho incremento puede relacionarse con el total de metano que se liberó. El uso de análisis de retrotrayectorias de viento permite tales deducciones sobre la fuente a grandes distancias: el metano liberado en incendios producidos en Canadá puede "olerse" en Irlanda; el metano liberado en África llega hasta Nueva Zelanda. Finalmente, los isótopos se combinan de forma similar a como lo hacen las serpentinatas de colores en los penachos de humo.

Levin y otros (2007) se sirvieron de observaciones de  $^{14}\text{C}$  radiogénico

realizadas en estaciones regionales en Alemania y las compararon con mediciones en la troposfera libre en Jungfraujoch (Alpes suizos), para calcular el excedente regional de dióxido de carbono en relación a años anteriores.

Bakwin y otros (2004) muestran de forma más general que, mediante el uso de mediciones de dióxido de carbono, es posible cuantificar las emisiones de este gas a escala regional (hasta aproximadamente un millón de kilómetros cuadrados, siempre que la red de vigilancia sea adecuada). Con instrumentos relativamente económicos y con muestras secundarias tomadas desde aeronaves, debería ser posible calcular las emisiones por cantidad y por fuente isotópica. En relación con los programas existentes no es necesario redoblar esfuerzos. En principio, debería ser posible actuar con prudencia sin la necesidad de que en el futuro exista ningún acuerdo como el de Kioto, por lo menos en las regiones industriales más importantes como China, Estados Unidos, Europa y la India.

### Consecuencias sobre el aire de las ciudades

La calidad del aire de las ciudades de los países desarrollados ha mejorado considerablemente durante el último decenio. La Figura 4 muestra el promedio mensual de monóxido de carbono, un buen representante de

la calidad del aire global, en Egham, al suroeste de Londres (Reino Unido). En la actualidad, es muy raro que haya días con un nivel de monóxido de carbono muy elevado. Esta mejora se viene produciendo desde 1997 como consecuencia de la reducción de las emisiones de los automóviles a la que dieron lugar el convertidor catalítico de gases de combustión, un régimen fiscal que hizo que el combustible sin plomo fuese más barato que el combustible con plomo (reduciéndose así el deterioro del catalizador) y un régimen de inspección anual más riguroso. Hoy en día, el aire de Londres es a menudo perfecto y no es la única ciudad en la que sucede: la mayor parte de las ciudades europeas y estadounidenses han logrado la misma mejora. Aunque sigue habiendo riesgos graves para la salud, el panorama general es mucho más prometedor que hace diez años.

La calidad del aire de muchas ciudades de los nuevos países industrializados, especialmente en China y en la India, sigue siendo extremadamente mala. No obstante, también en estos dos países la situación está cambiando. La calidad del aire de Pekín es un ejemplo ilustrativo: los grandes esfuerzos para mejorar las condiciones de cara a los Juegos Olímpicos de 2008 hicieron que el pueblo deseara un aire más limpio en todo el país. En la India la presión popular también podría suponer resultados positivos. La experiencia en materia de calidad del aire de América del Norte y Europa, y en la década anterior con la lluvia ácida, demuestra que, con trabajo, la calidad del aire puede mejorar considerablemente en el plazo de diez años.

Si bien tenemos un conocimiento relativamente amplio sobre la calidad del aire local alrededor de los principales centros urbanos, es probable que el crecimiento previsto de las megaciudades plantee nuevos problemas, sobre todo porque emitimos nuevos tipos de gases sintéticos a la atmósfera a un ritmo desafiante antes de saber cuáles son todas las consecuencias medioambientales que ello supone. Lo que es quizás más preocupante es que aún sabemos poco sobre el origen de los cambios químicos de la atmósfera que pueden estar ocurriendo a escalas mayores. Por ejemplo, existen

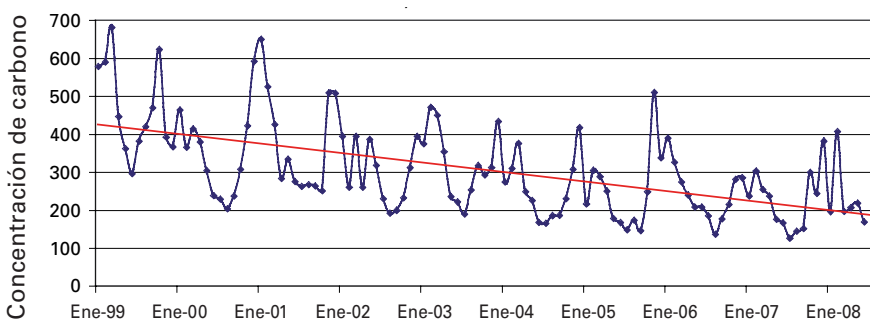


Figura 4 — Registro de los últimos diez años de la concentración de monóxido de carbono en Egham, oeste de Londres. En el gráfico aparece el promedio mensual de la relación de mezcla de carbono. El registro detallado del metano también muestra una reducción brusca desde 1997 debida a episodios graves de contaminación. Entre 2006 y 2008, hubo muchos días con vientos del oeste que traían niveles de carbono no muy por encima de los niveles de fondo coetáneos (estacionales) del Atlántico y niveles de metano similares a los obtenidos en las mediciones simultáneas realizadas en Mace Head, al oeste de Irlanda (datos preliminares no publicados, Grupo Royal Holloway: nótese que la línea es solo de carácter indicativo).

pruebas de que las fluctuaciones en la concentración de las sustancias oxidantes dominantes, el radical hidroxilo (OH), pueden ser bastante grandes (Manning y otros, 2005), y es revelador que mucho de lo que inferimos sobre el hidroxilo provenga de los modelos químicos atmosféricos en lugar de hacerlo de las observaciones (Jöckel y otros, 2003; Spivakovsky y otros, 2000).

Irónicamente, la contaminación por aerosoles china e india fuerza el efecto invernadero de forma negativa a escala mundial. Por ello, estos dos países limpiarán su aire. Al hacerlo, aliviarán los problemas locales pero también acelerarán el calentamiento global. Además, los convertidores catalíticos de gases de combustión hacen más pesado al automóvil, lo que se traduce en ineficacia. Por consiguiente, el consumo total de combustible de los vehículos en los países occidentales es más elevado de lo que sería si el aire estuviese más sucio. Las mejoras medioambientales locales pueden significar un aumento transitorio del calentamiento global.

## Conclusión

Con el apoyo internacional de la OMM, la vigilancia y el análisis de los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera se han desarrollado en un sistema mundial integrado que cumple cincuenta años desde las primeras mediciones realizadas por Dave Keeling en Mauna Loa (Hawai) y en el Polo Sur. Las enormes repercusiones científicas y socioeconómicas de este trabajo se han dado por sentadas en numerosas ocasiones. El aumento del calentamiento global debido al efecto invernadero y el mayor número de localizaciones con la

calidad del aire degradada se comprenden razonablemente. Ahora, lo que necesitamos es una vigilancia más exhaustiva y detallada (y relativamente económica) diseñada para impulsar modelos pertinentes con el fin de determinar el balance local y regional de gases traza. Esto permitirá una revisión independiente de las emisiones en función de la fuente, el emplazamiento y el tiempo. Actualmente, resulta posible disponer de una herramienta eficaz de rastreo de carbono.

## Referencias

BAKWIN, P.S., K.J. DAVIS, C. YI, J.W. MUNGER, L. HASZPRA and Z. BARCZA, 2004: Regional carbon fluxes from mixing ratio data. *Tellus*, 56B, 301-11.

BURTRAW, D., A. KRUPNICK, K. PALMER, A. PAUL, M. TOMAN and C. BLOYD, 2003: Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45, 650-673.

JÖCKEL, P., C.A.M. BRENNINKMEIJER, P.J. CRUTZEN, 2003: A discussion on the determination of atmospheric OH and its trends. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 107-118.

LEVIN, I., S. HAMMER, B. KROMER and F. MEINHARDT, 2007: Radiocarbon observations in atmospheric CO<sub>2</sub>: determining fossil fuel CO<sub>2</sub> over Europe using Jungfraujoch observations as background. *Science of the Total Environment*, 391, 211-6.

MANNING, M.R., D.C. LOWE, R.C. MOSS, G.E. BODEKER and W. ALLAN, 2005: Short term variations in the oxidizing power of the atmosphere. *Nature*, 436: 1001-1004.

METZ, B., O.R. DAVIDSON, P.R. BOSCH, R. DAVE and L.A. MEYER (Eds.), 2007: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

NISBET, E.G., 2007: Cinderella science. *Nature*, 450, 789-790.

PATAKI, D.E., D.R. BOWLING, J.R. EHLERINGER and J.M. ZOBITZ, 2006: High resolution atmospheric monitoring of urban carbon dioxide. *Geophysical Research Letters*, 33, L03813, 5 pp.

PIAO, S. y 15 otros, 2008: Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451, 49-53.

PETERS, W. y 15 otros, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: Carbon Tracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 48, 18925-18930.

RAYNER, P.J., D.M. O'BRIEN, 2001: The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions. *Geophysical Research Letters* 28(1): 175-178.

RIGBY, M., 2008: Renewed growth of atmospheric methane. *Geophysical Research Letters*, 35, L22805, doi:22810.21029/22008GL036037.

SITCH, S., P.M. COX, W.J. COLLINS and C. HUNTINGFORD, 2007: Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 448: 791-794.

SPIVAKOVSKY, C.M., J.A. LOGAN, S.A. MONTZKA, Y.J. BALKANSKI, M. FOREMAN-FOWLER, D.B.A. JONES, L.W. HOROWITZ, A.C. FUSCO, C.A.M. BRENNINKMEIJER, M.J. PRATHER, S.C. WOFSY and M.B. McELROY, 2000: Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: Update and evaluation. *Journal of Geophysical Research* 105(D7), 8931-8980.

STEPHENS, B.B. y 21 otros, 2007: Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science* 316, 1732-1735.