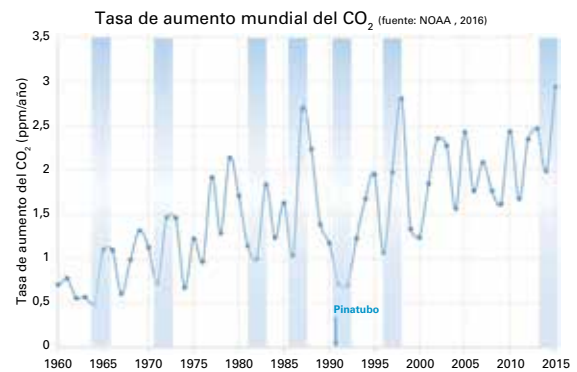
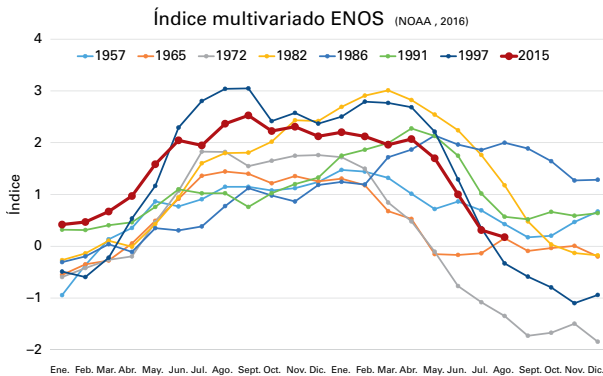




BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2015

Nº 12 | 24 de octubre de 2016



2015: El Niño ejerce gran influencia en el estado de los gases de efecto invernadero

En 2015 se registró el comienzo de un intenso episodio de El Niño. El fenómeno de El Niño acarrea fluctuaciones naturales del sistema climático, razón por la que se observan aguas inusualmente cálidas en el océano Pacífico ecuatorial. El fenómeno de El Niño está asociado a características meteorológicas anormales, como fuertes tormentas en algunas zonas y sequías o inundaciones en otras. Un episodio típico de El Niño dura entre 9 meses y 2 años. Este fenómeno puede observarse más o menos cada 2 a 7 años, si bien un episodio de El Niño de tal intensidad no había ocurrido durante los últimos 18 años.

En el gráfico de la izquierda puede observarse el índice multivariado El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) [1], que indica la intensidad de un episodio de El Niño. Allí se muestran los episodios de El Niño más significativos desde 1950. El episodio de El Niño de 2015/2016 fue uno de los ocho más intensos desde 1950 y se lo asoció a 16 meses consecutivos de temperaturas mundiales sin precedentes [2]. Con excepción de los años siguientes a la erupción del volcán Pinatubo en 1991, la tasa de aumento del dióxido de carbono atmosférico (CO₂) se ha acelerado tras episodios de El Niño (véase el gráfico de la derecha). El gráfico se basa en la tasa de aumento mundial del CO₂ estimada mediante la red mundial in situ [3] de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) con datos disponibles a partir de 1960. Los períodos en los que se produjeron los siete episodios más intensos de El Niño desde 1960 se destacan en azul.

La tasa de aumento del CO₂ calculada sobre la base de las observaciones del programa de la Vigilancia de la Atmósfera

Global (VAG) de la OMM es superior a la media de los últimos 10 años, pese a las pruebas de que las emisiones antropógenas mundiales se han mantenido básicamente estables entre 2014 y 2015. Según los datos más recientes, la tasa de aumento ha seguido creciendo incluso bien entrado 2016, conforme a la diferencia prevista entre el aumento del CO₂ y el índice ENOS. Teniendo en cuenta esa situación, se prevé que 2016 será el primer año en que en el Observatorio Mauna Loa se registre un nivel de CO₂ superior a 400 ppm¹ durante todo el año, y por lo tanto por muchas generaciones más [4].

Pese al aumento de las emisiones procedentes de la generación de energía con combustibles fósiles, el océano y la biosfera terrestre absorben aún casi la mitad de las emisiones antropógenas [5]. Sin embargo, estos sumideros podrían saturarse y aumentaría entonces la fracción de CO₂ emitido que permanece en la atmósfera, lo que, a su vez, aceleraría la tasa de aumento del CO₂ atmosférico. Durante un episodio de El Niño la capacidad de absorción terrestre es menor. Como sucedió con el anterior episodio significativo de El Niño de 1997/1998, es probable que aumenten las emisiones netas debido a una mayor incidencia de la sequía en las regiones tropicales, lo que reduciría la absorción del carbono por la vegetación y provocaría un incremento de las emisiones de CO₂ resultantes de incendios. Según la Global Fire Emissions Database (Base de Datos Mundial sobre Emisiones Procedentes de Incendios) [6], las emisiones de CO₂ en Asia ecuatorial alcanzaron 0,34 PgC² en 2015 (la media para el período 1997-2015 es de 0,15 PgC). Pueden esperarse otras posibles retroacciones de fenómenos distintos de El Niño, pero más bien en relación con la gran disminución de hielos marinos en el Ártico, el aumento de las sequías en regiones de interior causadas por el calentamiento [7], el deshielo del permafrost y cambios en la circulación termohalina de los océanos, en la que El Niño es un modulador menor.

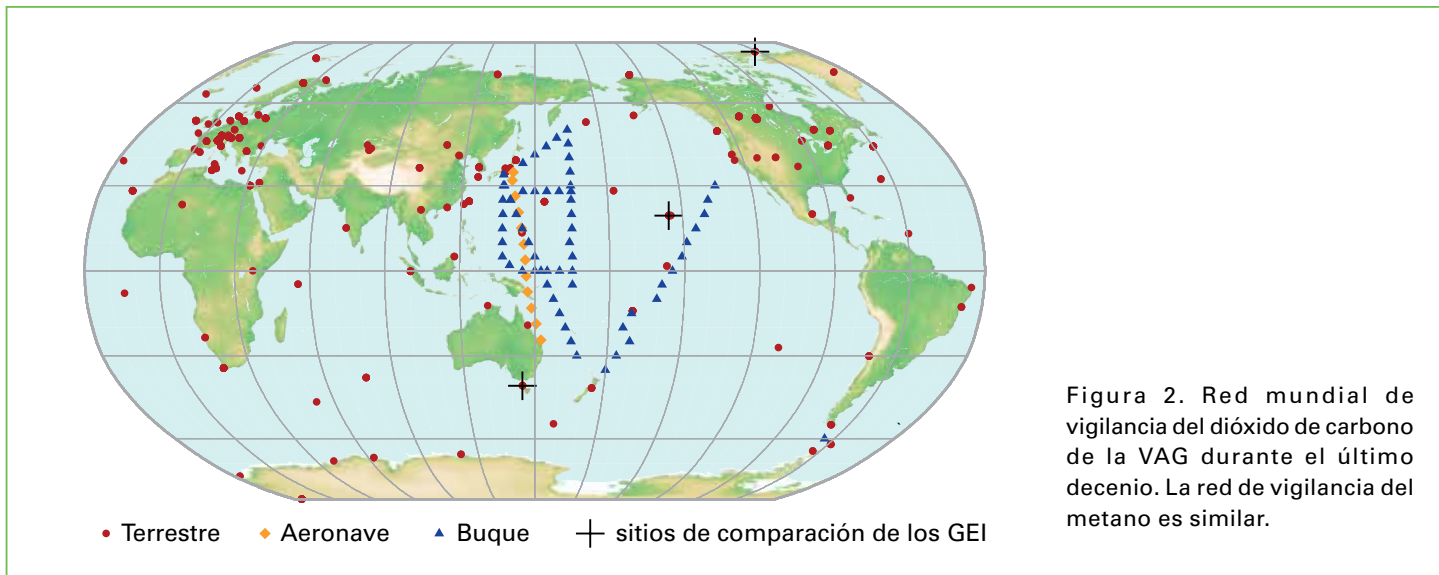


Figura 2. Red mundial de vigilancia del dióxido de carbono de la VAG durante el último decenio. La red de vigilancia del metano es similar.

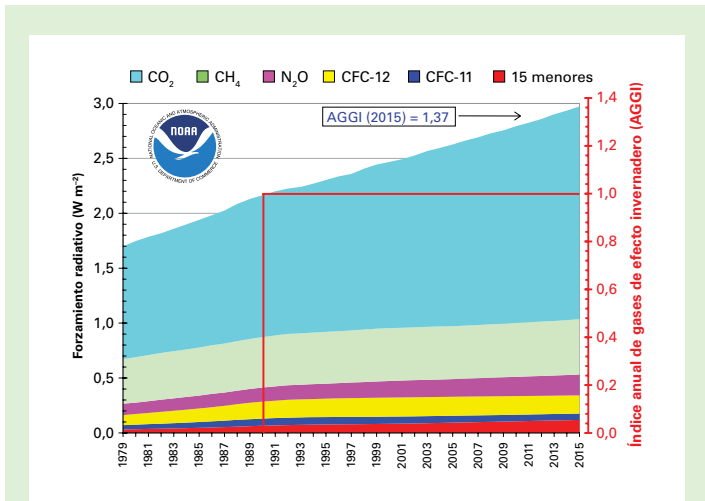


Figura 1. Forzamiento radiativo de la atmósfera debido a los GEI de larga duración, respecto de 1750, y actualización de 2015 del índice anual de gases de efecto invernadero de la NOAA [8, 9]

Cuadro 1. Promedio mundial anual de las abundancias en superficie (2015) y tendencias de los principales GEI medidos por la red mundial de vigilancia de los GEI de la VAG de la OMM. Las unidades son fracciones molares de aire seco, y las incertidumbres tienen un límite de confianza del 68% [10]; el método para determinar el promedio se describe en [11].

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Abundancia mundial en 2015	400,0±0,1 ppm	1845±2 ppb	328,0±0,1 ppb
Abundancia en 2015 respecto de 1750 ^a	144%	256%	121%
Aumento absoluto de 2014 a 2015	2,3 ppm	11 ppb	1,0 ppb
Aumento relativo de 2014 a 2015	0,58%	0,60%	0,31%
Promedio del aumento absoluto anual durante los últimos 10 años	2,08 ppm año ⁻¹	6,0 ppb año ⁻¹	0,89 ppb año ⁻¹

^a En el supuesto de que la fracción molar preindustrial fuera de 278 ppm para el CO₂, de 722 ppb para el CH₄ y de 270 ppb para el N₂O. Para los análisis se usaron los números de estaciones siguientes: 125 para el CO₂, 123 para el CH₄ y 33 para el N₂O.

Resumen

El último análisis de las observaciones de la VAG de la OMM muestra que los promedios mundiales de las fracciones molares en superficie³⁾, calculados a partir de esta red *in situ* para el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), alcanzaron nuevos máximos en 2015 al registrar, respectivamente, 400,0±0,1 ppm, 1 845±2 ppb⁴⁾ y 328,0±0,1 ppb, lo que representa respectivamente el 144%, 256% y 121% de los niveles preindustriales (antes de 1750). Se prevé que 2016 será el primer año en que en el Observatorio Mauna Loa se registre un nivel de CO₂ superior a 400 ppm durante todo el año, y por lo tanto por muchas generaciones más [4]. El aumento de CO₂ de 2014 a 2015 fue superior al observado de 2013 a 2014 y al promedio de los 10 últimos años. El episodio de El Niño de 2015 contribuyó a la aceleración de la tasa de aumento a través de complejas interacciones recíprocas entre el cambio climático y el ciclo del carbono. El aumento del CH₄ de 2014 a 2015 fue superior al observado de 2013 a 2014 y al promedio del último decenio. El aumento del N₂O de 2014 a 2015 fue similar al observado de 2013 a 2014 y superior a la tasa de aumento medio de los últimos 10 años. El índice anual de gases de efecto invernadero de la NOAA [8, 9] muestra que entre 1990 y 2015 el forzamiento radiativo debido a los gases de efecto invernadero (GEI) de larga duración aumentó un 37%, al que el CO₂ contribuyó en casi un 80%.

Introducción

Desde tiempos preindustriales (antes de 1750), la presencia en la atmósfera de GEI de larga duración ha aumentado considerablemente debido a las emisiones procedentes de la actividad humana. El crecimiento demográfico, prácticas agrícolas más intensivas, un mayor uso de la tierra y una mayor deforestación, la industrialización y el consiguiente uso de energía fósil han llevado, todos, a una aceleración de la tasa de aumento de la concentración de GEI de larga duración en los últimos años.

Es sumamente probable que ese aumento sea responsable del calentamiento actual de la Tierra [5]. Es también probable que el sistema Tierra responda al cambio climático con retroacciones, entre ellas, cambios en la magnitud de los flujos naturales de los GEI. Esa retroacción puede incrementar o disminuir la tasa de aumento de esos gases en la atmósfera y, en consecuencia, acelerar o desacelerar el ritmo del cambio climático. La dirección y magnitud de esa retroacción es bastante incierta, pero algunos

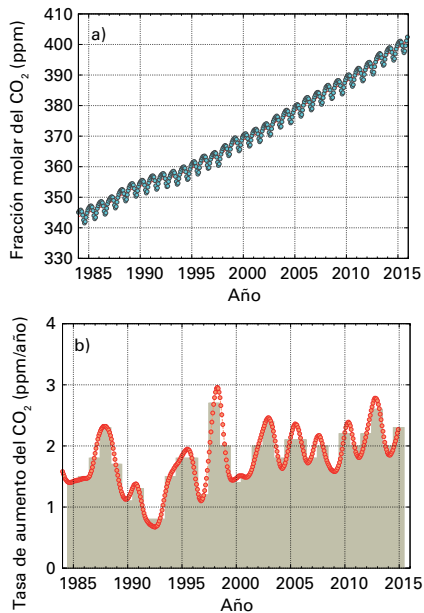


Figura 3. Promedio mundial de la fracción molar del CO₂ a) y su tasa de aumento b) desde 1984 a 2015. Los incrementos de las medias anuales sucesivas se muestran mediante columnas en b).

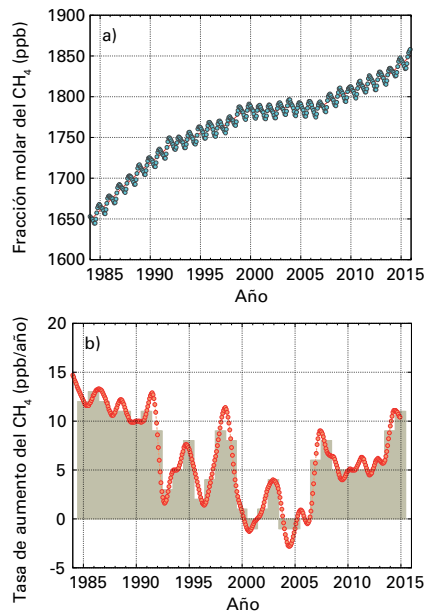


Figura 4. Promedio mundial de la fracción molar del CH₄ a) y su tasa de aumento b) de 1984 a 2015. Los incrementos de las medias anuales sucesivas se muestran mediante columnas en b).

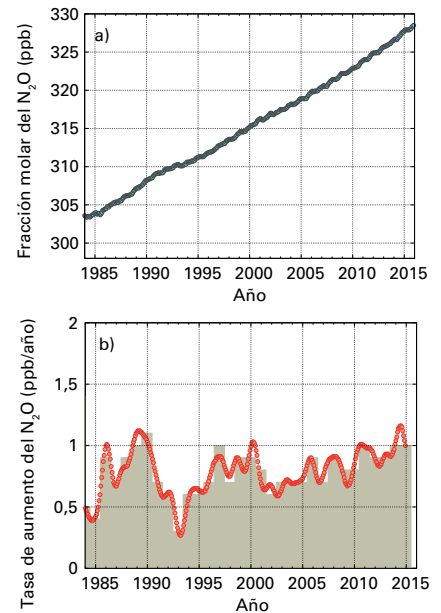


Figura 5. Promedio mundial de la fracción molar del N₂O a) y su tasa de aumento b) de 1984 a 2015. Los incrementos de las medias anuales sucesivas se muestran mediante columnas en b).

estudios muy recientes dan a entender que el futuro cambio climático influirá marcadamente en la sequía, lo que reducirá el sumidero terrestre e intensificará el aumento del CO₂ en la atmósfera; que el nivel de emisiones que se registre si todo sigue igual producirá un mayor calentamiento que el previsto; y que el deshielo de la Antártida podría llevar a dos veces la elevación máxima del nivel del mar estimada en el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), incluso si se logra el objetivo de limitar el aumento de la temperatura mundial a 2 °C convenido por la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en su 21° período de sesiones (CP 21) [12, 13, 14].

Solo la atenta observación de la atmósfera y la disponibilidad de mediciones muy exactas y a largo plazo, como las realizadas por el programa *in situ* de la VAG, complementadas por observaciones satelitales y modelizaciones numéricas nos permitirán comprender cómo está cambiando la composición atmosférica mundial. Gracias a esas observaciones también podremos saber si la reducción de las emisiones convenida en el acuerdo de la CP 21 tendrán el efecto deseado sobre las abundancias de GEI de larga duración en la atmósfera, y si se logrará reducir esas abundancias a largo plazo. Sobre la base de esa información podrá decidirse, a nivel político, si se necesitan nuevos esfuerzos de mitigación para hacer frente a los efectos de los mecanismos de retroacción del sistema Tierra.

Sinopsis de las observaciones de la red *in situ* de la VAG para 2015

En este duodécimo Boletín sobre los gases de efecto invernadero que publica anualmente la VAG de la OMM se informa acerca de la abundancia atmosférica y los índices de evolución de los principales gases de efecto invernadero de larga duración (CO₂, CH₄, N₂O) y se resumen las contribuciones de otros gases. Esos tres gases, junto con el CFC-12 y el CFC-11, contribuyen en ~96%⁵⁾ [15] al forzamiento radiativo debido a los GEI de larga duración (figura 1).

El programa de la VAG de la OMM (<http://www.wmo.int/gaw>) coordina las observaciones sistemáticas y el análisis de los gases de efecto invernadero y de otros gases traza. En la figura 2 se muestran los emplazamientos donde se han realizado mediciones de los GEI en el último decenio. Los datos de las mediciones son notificados por los países participantes, y archivados y distribuidos por el Centro Mundial de Datos sobre Gases de Efecto Invernadero (CMDGEI), que administra el Servicio Meteorológico de Japón.

Los resultados aportados por el CMDGEI de la OMM para el promedio mundial y la tasa de aumento difieren ligeramente de los resultados obtenidos por la NOAA para los mismos años [3] debido a las diferencias en las estaciones utilizadas, en el procedimiento para determinar el promedio y en el período de tiempo del que las cifras son representativas. El CMDGEI de la OMM sigue el procedimiento descrito en la publicación WMO/TD-No. 1473 [11].

En el cuadro 1 figura el promedio mundial de las abundancias atmosféricas de los tres principales GEI de larga duración en 2015 y su evolución desde 2014 y 1750. En este análisis global no se utilizan los datos procedentes de estaciones móviles, excepto el muestreo de la NOAA en el Pacífico (triángulos azules en la figura 2).

Los tres GEI de larga duración que figuran en el cuadro 1 están estrechamente relacionados con actividades antropógenas e interactúan intensamente con la biosfera y los océanos. Es necesario tener un conocimiento cuantitativo de las numerosas fuentes, sumideros y transformaciones químicas de estos gases para poder predecir su evolución en la atmósfera. Las observaciones de la VAG proporcionan unas limitaciones inestimables sobre los balances de estos y otros GEI de larga duración, y se utilizan para mejorar los inventarios de las emisiones y para evaluar los datos recogidos por satélite sobre los promedios de las columnas de GEI de larga duración.

SISTEMA MUNDIAL INTEGRADO DE INFORMACIÓN SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO

En diciembre de 2015, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) aprobó el Acuerdo de París, donde se consagra la idea de contribuciones determinadas a nivel nacional. Esas contribuciones varían según la nación, la región geográfica y la capacidad económica. Con independencia de las estrategias y medidas adoptadas, se necesitará información coherente, fiable y oportuna sobre la magnitud de las emisiones de GEI y su tendencia en el tiempo para implementar y gestionar efectivamente políticas a largo plazo.

En 2010 los científicos que se ocupan de la atmósfera, del ciclo del carbono y del cambio climático produjeron una serie de estudios [16, 17, 18] sobre la capacidad potencial de las mediciones de la concentración de los GEI en la atmósfera y de los análisis de modelos para evaluar con independencia la exactitud de los inventarios de emisiones de GEI elaborados según los métodos estadísticos descritos en las directrices de 2006 del Grupo especial del IPCC sobre los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero [19]. En esos informes se concluye que para que ese enfoque pueda llevarse integralmente a la práctica se necesita invertir más en investigación, disponer de más mediciones bien calibradas de los GEI en la atmósfera, y mejorar la modelización del transporte atmosférico y la capacidad de asimilación de datos.

En reconocimiento de los progresos alcanzados en la investigación, las mediciones y la modelización desde 2010, la OMM está desarrollando el Sistema Mundial Integrado de Información sobre Gases de Efecto Invernadero (IG³IS) [20]. La VAG de la OMM fija las normas para las mediciones atmosféricas y el IG³IS establecerá, dará a conocer y, con el tiempo, mejorará las normas metodológicas sobre cómo los análisis de modelizaciones inversas del transporte atmosférico de las concentraciones de GEI que se hayan medido en la atmósfera (enfoque descendente) pueden combinarse con datos socioeconómicos de inventarios de emisiones espacial y temporalmente explícitos (enfoque ascendente) para ofrecer mejor información y permitir una gestión óptima de las políticas y medidas de reducción de emisiones.

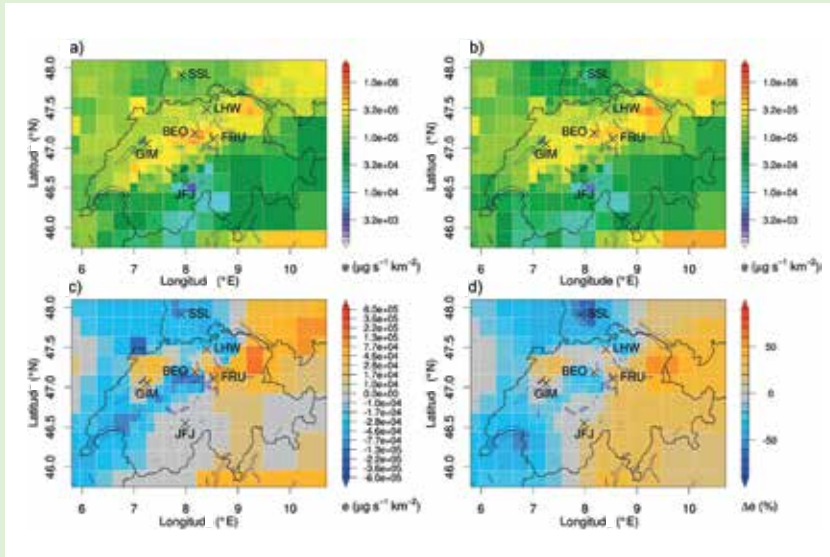
El IG³IS funcionará como un mecanismo de coordinación internacional, en el que participarán numerosos asociados de la OMM, como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Oficina Internacional de Pesos y Medidas y el Grupo de Observación de la Tierra. Para que la iniciativa del IG³IS llegue a buen puerto, deberán hacerse esfuerzos por establecer una buena comunicación con los clientes y usuarios finales de su información para comprender sus necesidades, ganar su confianza y demostrarles el valor de la información que recibirán, con objeto de adoptar medidas que reduzcan más eficazmente las emisiones. Con el tiempo, el marco del IG³IS deberá promover e incorporar capacidades técnicas innovadoras (por ejemplo, nuevas observaciones satelitales y sensores), mejorando así la calidad y fiabilidad de esa información.

El IG³IS se está implementando de acuerdo con una serie de principios y de tres áreas objetivas definidas en el documento conceptual [20]: 1) reducir la incertidumbre de los inventarios

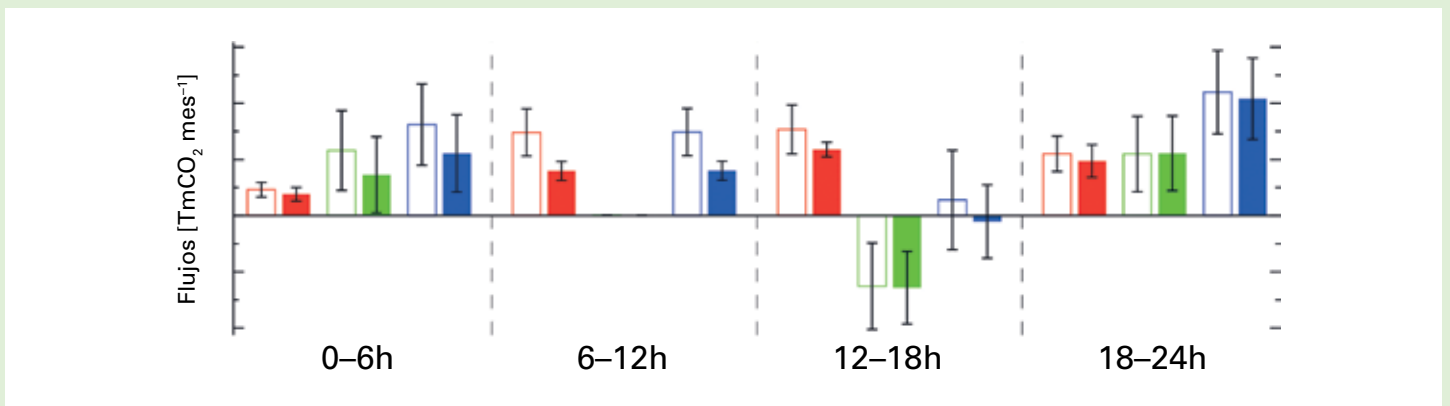
nacionales de emisiones que proporcionan información a la CMNUCC; 2) localizar a los emisores, cuantificarlos e informarles de oportunidades de reducción de emisiones hasta ahora desconocidas; 3) proporcionar a entidades nacionales y subnacionales información oportuna y cuantificada sobre el volumen, la tendencia y la atribución de sus emisiones a fin de respaldar la consecución de los objetivos de reducción de emisiones. La implementación del IG³IS se organiza en dos líneas de actividad para cada área objetiva: 1) la iniciación de proyectos piloto de corto plazo que promueven las capacidades de métodos seleccionados y generan confianza entre las partes interesadas en el valor de la información y 2) la elaboración de planes sistemáticos para cada área objetiva con el fin de orientar a las naciones, los estados, las ciudades y las empresas privadas respecto de la implementación de esos sistemas de información. Realizar con éxito cada vez más demostraciones por área objetiva es la piedra angular de la implementación del IG³IS. Los ejemplos siguientes demuestran el valor del IG³IS: Las mediciones continuas de metano procedentes de cuatro sitios de la meseta suiza y de dos sitios adicionales se combinaron con simulaciones del transporte atmosférico y modelizaciones inversas para deducir la distribución espacial de las emisiones de CH₄ en Suiza y en los países adyacentes [21]. La mejor estimación inversa del total de emisiones de CH₄ en Suiza para el período de observación de marzo de 2013 a febrero de 2014 es de 196±18 Gg año⁻¹.⁶⁾ Ese valor concuerda perfectamente con el total nacional de 206±33 Gg año⁻¹ notificado por Suiza a la CMNUCC en 2015 para los años 2012 y 2013. La combinación de los enfoques ascendente y descendente confirma en gran medida la estimación del total de emisiones notificado, con una reducción de la incertidumbre de los valores notificados de 16% a 9%.

El sistema de inversión no se estableció con objeto de optimizar las emisiones por categoría de forma individual, sino para estimar la distribución espacial del total de emisiones. No obstante, la información que se desprende de la inversión sobre la distribución espacial de las emisiones aporta datos cualitativos de las categorías de fuentes que predominan en una región dada. Un sólido patrón espacial sugiere un aumento de las emisiones estimadas para el noreste de Suiza (véase la ilustración superior de la página 5). Las prácticas agrícolas de esa región difieren de las utilizadas en el resto del país, lo que explicaría esas estimaciones y acarrearía distintas emisiones por cabeza de ganado. Asimismo, otras fuentes antropógenas y naturales potenciales podrían estar contribuyendo a las emisiones inesperadamente elevadas de esa región. Se necesitarán más observaciones para verificar y caracterizar mejor esa fuente. Tanto Suiza como el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte incluyen información “descendente” en sus informes nacionales a la CMNUCC [22].

Las concentraciones mundiales de metano en la atmósfera continúan aumentando, pero aún no hay una comprensión cabal de la variabilidad de la tasa de aumento mundial y la atribución a fuentes naturales y antropógenas. Estudios anteriores que aportan estimaciones divergentes de las emisiones de metano procedentes de la cadena de suministro de petróleo y gas han



La distribución espacial del inventario de emisiones anteriores para Suiza figura en a), las emisiones posteriores se muestran en b), y su diferencia absoluta y relativa (posterior menos anterior) se representan respectivamente en c) y d). Se usó una malla de inversión irregular con una alta resolución espacial cerca de los sitios de observación (marcados por una X), que se vuelve aproximada al alejarse de ellos (fuente: [21]).



Estimaciones del flujo total en un período de 30 días, para los cuatro períodos de seis horas, en rojo para las emisiones antropógenas, verde para los flujos biogénicos y azul para el total. Las estimaciones anteriores figuran como rectángulos vacíos, mientras que las posteriores aparecen como rectángulos llenos. La reducción de la incertidumbre es evidente para los períodos de la mañana y la tarde (fuente: [26]).

suscitado reivindicaciones encontradas sobre la huella total de los GEI de esa industria. Las estimaciones resultantes de enfoques descendentes y basadas en muestreos atmosféricos a gran escala exceden con frecuencia las estimaciones de enfoques ascendentes que se basan en inventarios de emisiones por fuentes. Los trabajos dirigidos por el Fondo de Defensa del Medio Ambiente y la NOAA [23] reconcilian las estimaciones de emisiones de metano resultantes de los enfoques ascendente y descendente en una de las principales cuencas productoras de gas natural de Estados Unidos, usando técnicas de medición replicable y de integración de datos. Alentado por el éxito de esos métodos, el IG³IS prevé crear un prototipo de los métodos estándares y refinarlos para poder darlos a conocer internacionalmente y caracterizar con un mayor nivel de confianza y exactitud las fuentes emisoras de metano en la cadena de suministro de petróleo y gas. La capacidad de los operadores del sector del petróleo y del gas para aprovechar nuevas oportunidades de mitigación y la posibilidad de que las emisiones de metano procedentes de la gestión de residuos y la agricultura se beneficien también de esas oportunidades dependerán de la identificación y cuantificación de la pequeña proporción de emplazamientos con un elevado nivel de emisiones.

La Agenda de Acción Lima-París del Acuerdo de París ha formalizado el rol de las entidades subnacionales como ciudades (grandes fuentes urbanas), que representan más del 70% de las emisiones de CO₂ resultantes de la quema de combustibles

fósiles. Varios estudios han demostrado el potencial de ciudades con redes de medición atmosférica y análisis de modelos inversos de alta resolución [24, 25] para cuantificar mejor las emisiones y tendencias de los GEI. Los requisitos para una inversión atmosférica son más exigentes en el caso del CO₂ procedente de los combustibles fósiles. Sin embargo, existen pruebas de que, gracias a la combinación de análisis de modelos inversos de una red de medición suficientemente densa y bien distribuida y de un conocimiento previo espacialmente explícito de las fuentes, pueden cuantificarse mejor las emisiones de CO₂ procedentes de los combustibles fósiles [26] (véase la ilustración inferior de la página 5). Si bien la tendencia del total de emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles de las ciudades es un dato valioso, los administradores de las ciudades y urbanistas necesitarán información específica para poder aprovechar las oportunidades de reducción de emisiones. Un estudio reciente utilizó un experimento de simulación de sistema de observación para demostrar que redes más densas con sitios de medición de precisión media y costo reducido (30 a 70 en París) pueden producir información sobre emisiones urbanas espacialmente explícita para sectores específicos [27]. Para economías emergentes con conocimientos estadísticos “ascendentes” inadecuados de las emisiones procedentes de grandes fuentes urbanas y de paisajes naturales, esos enfoques de inversión atmosférica pueden ser fuentes de información especialmente útiles.

El índice anual de GEI de la NOAA [8] fue de 1,37 en 2015, lo que representa un aumento del 37% del forzamiento radiativo total (respecto del nivel de 1750) causado por el conjunto de GEI de larga duración desde 1990, y de 1,3% de 2014 a 2015 (figura 1). El forzamiento radiativo total causado por el conjunto de esos gases en 2015 corresponde a una fracción molar equivalente en CO_2 de 485 ppm [9].

Dióxido de carbono (CO_2)

El CO_2 es el principal GEI antropógeno de la atmósfera al contribuir en $\sim 65\%$ al forzamiento radiativo causado por el conjunto de GEI de larga duración. Es responsable de $\sim 81\%$ del aumento de ese forzamiento en los últimos 10 años y de $\sim 82\%$ en los 5 últimos. El nivel de ~ 278 ppm de la era preindustrial representaba un equilibrio de flujos entre la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre. En 2015 el CO_2 atmosférico alcanzó el 144% del nivel preindustrial a causa principalmente de las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento (en 2014 el total de emisiones de CO_2 fue de $9,8 \pm 0,5$ PgC), de la deforestación y de los demás cambios del uso de la tierra (la media fue de $0,9 \pm 0,5$ PgC para el período 2005-2014 [7]). El aumento medio del CO_2 atmosférico de 2005 a 2014 corresponde a $\sim 44\%$ del CO_2 emitido por la actividad humana, y el $\sim 56\%$ restante es eliminado por los océanos y la biosfera terrestre. La porción de CO_2 procedente de la quema de combustibles fósiles que permanece en la atmósfera (fracción atmosférica) varía de un año a otro debido a la alta variabilidad natural de los sumideros de CO_2 , y no sigue una tendencia global confirmada.

En 2015 el promedio mundial de la fracción molar del CO_2 fue de $400 \pm 0,1$ ppm (figura 3). El aumento de la media anual de 2,3 ppm que se produjo de 2014 a 2015 es superior al incremento registrado de 2013 a 2014 y a la tasa de aumento medio correspondiente al último decenio ($\sim 2,08$ ppm año $^{-1}$). La aceleración de esa tasa de aumento en 2015 respecto de años anteriores se debe a un incremento natural de las emisiones de CO_2 relacionado con el episodio más reciente de El Niño.

Metano (CH_4)

El metano contribuye en $\sim 17\%$ al forzamiento radiativo causado por los GEI de larga duración. Aproximadamente el 40% del CH_4 que se emite a la atmósfera procede de fuentes naturales (p. ej. humedales y termitas), mientras que cerca del 60% proviene de fuentes antropógenas (p. ej. ganadería de rumiantes, cultivo de arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos y combustión de biomasa). Como resultado del aumento de las emisiones antropógenas, el CH_4 atmosférico llegó al 256% de su nivel preindustrial (~ 722 ppb). El promedio mundial de la fracción molar del CH_4 calculado a partir de observaciones *in situ* alcanzó en 2015 un nuevo máximo de 1845 ± 2 , lo que representa un aumento de 11 ppb con respecto al año anterior (figura 4). La tasa de aumento medio anual del CH_4 disminuyó de ~ 13 ppb año $^{-1}$ a principios de los años ochenta a prácticamente cero entre 1999 y 2006. Desde 2007 se ha registrado nuevamente un aumento del CH_4 atmosférico. Los estudios que emplean las mediciones del CH_4 de la VAG indican como causas probables de ello el aumento de las emisiones de CH_4 procedentes de los humedales en los trópicos y de fuentes antropógenas en las latitudes medias del hemisferio norte.

Óxido nítrico (N_2O)

El N_2O contribuye en $\sim 6\%$ al forzamiento radiativo causado por los GEI de larga duración, siendo el tercer gas que más

contribuye a ese forzamiento. Las emisiones de N_2O a la atmósfera proceden de fuentes naturales (cerca del 60%) y de fuentes antropógenas (aproximadamente el 40%), por ejemplo, los océanos, los suelos, la quema de biomasa, el uso de fertilizantes y diversos procesos industriales. En 2015 el promedio mundial de la fracción molar del N_2O alcanzó $328,0 \pm 0,1$ ppb, superando en 1,0 ppb el promedio del año anterior (figura 5), y representa 121% del nivel preindustrial (270 ppb). El aumento anual de 2014 a 2015 es superior a la tasa de aumento medio de los últimos 10 años ($0,89$ ppb año $^{-1}$). Las causas probables de ese aumento son un mayor uso de fertilizantes en la agricultura y una mayor liberación de N_2O de los suelos debido a un exceso de deposición de nitrógeno atmosférico como consecuencia de la contaminación.

Otros gases de efecto invernadero

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un potente GEI de larga duración. Es producido por la industria química y se usa principalmente como aislante eléctrico en los equipos de distribución eléctrica. Su fracción molar actual es casi el doble de la cifra registrada a mediados de los años noventa (figura 6 a)). Los clorofluorocarbonos (CFC), que agotan la capa de ozono, y los gases halogenados menores contribuyen en $\sim 12\%$ al forzamiento radiativo causado por los GEI de larga

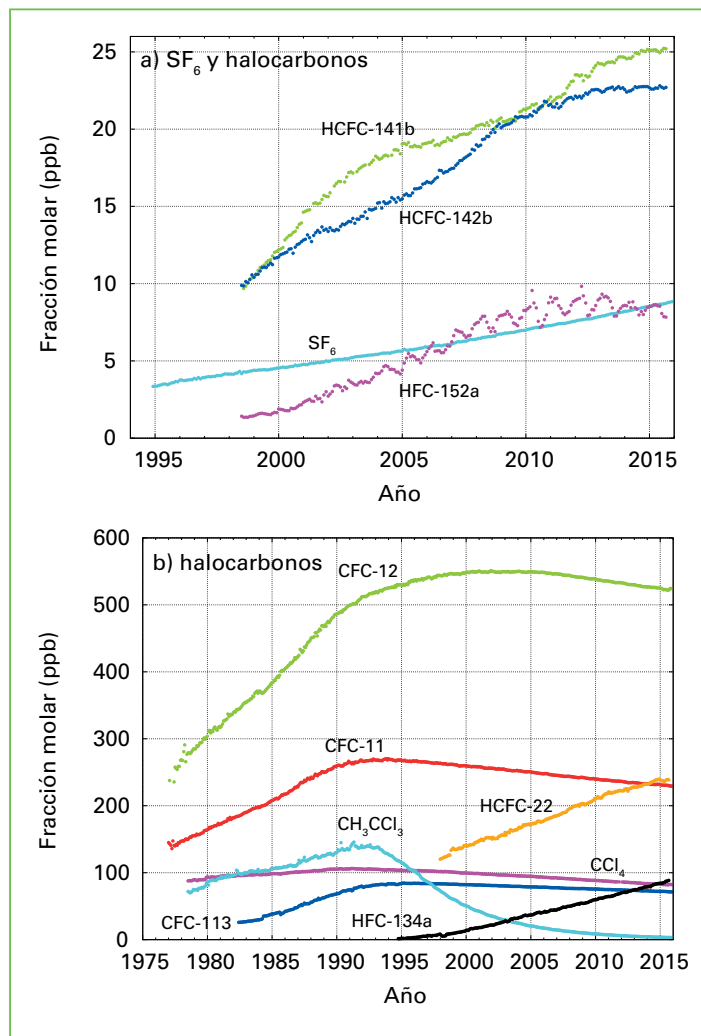


Figura 6. Promedio mensual de las fracciones molares del SF_6 y los halocarbonos más importantes: SF_6 y fracciones más pequeñas a) y más grandes b) de los halocarbonos. Los números de las estaciones utilizadas para los análisis son los siguientes: SF_6 (24), CFC-11 (23), CFC-12 (24), CFC-113 (23), CCl_4 (21), CH_3CCl_3 (24), HCFC-141b (10), HCFC-142b (14), HCFC-22 (14), HFC-134a (10), HFC-152a (9).

duración. Si bien los CFC y la mayoría de los halones están disminuyendo, algunos hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), que son también potentes GEI, están aumentando a un ritmo relativamente rápido, aunque su concentración es todavía baja (en niveles de ppt⁷).

En este Boletín se abordan sobre todo los GEI de larga duración. El ozono troposférico, cuyo ciclo de vida es relativamente corto, produce un forzamiento radiativo comparable al de los halocarbonos. Otros muchos contaminantes, como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, que no se conocen con el nombre de GEI, tienen pocos efectos directos o indirectos en el forzamiento radiativo. Los aerosoles (partículas en suspensión) son también sustancias de corta duración que modifican el balance de radiación. Todos los gases citados, así como los aerosoles, son vigilados por el programa de la VAG, con el apoyo de los países Miembros de la OMM y de redes colaboradoras.

Agradecimientos y enlaces

Cincuenta y un países Miembros de la OMM han aportado datos sobre el CO₂ y otros GEI al CMDEGI de la VAG. Alrededor del 46% de los registros de medición enviados a ese Centro proceden de estaciones de la red cooperativa de muestreo del aire del Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre de la NOAA (ESRL). Para obtener información sobre otras redes y estaciones puede consultar el documento *16th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2011)* (GAW Report No. 206) (Informe de la 16ª reunión de la OMM y el OIEA sobre el dióxido de carbono, otros gases de efecto invernadero y las técnicas de medición correspondientes), disponible en <http://www.wmo.int/gaw>. El Experimento mundial avanzado sobre gases en la atmósfera (AGAGE) aporta también los resultados de sus observaciones al presente Boletín. Asimismo, las estaciones de vigilancia de la VAG que han aportado datos a esta publicación (figura 2) figuran en la lista de contribuyentes de la página web del CMDGEI (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg>) y se describen en el Sistema de información de las estaciones de la VAG (GAWSYS) (<https://gawsis.meteoswiss.ch>), que gestiona MeteoSwiss (Suiza).

Referencias

- [1] NOAA ESRL, 2016: Multivariate ENSO Index (MEI), <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>.
- [2] NOAA, 2016: August marks ongoing trend of record-breaking heat for the globe, <http://www.noaa.gov/news/august-marks-ongoing-trend-of-record-breaking-heat-for-globe>.
- [3] Dlugokencky, E. y P. Tans, 2016: NOAA/ESRL, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
- [4] Betts, R. A. y otros, 2016: El Niño and a Record CO₂ rise. *Nature Climate Change* 6(9): 806-810, doi:10.1038/nclimate3063.
- [5] Stocker, T. F. y otros, 2013: Resumen técnico. En: *Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Stocker, T. F., D. Qin y otros, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos.
- [6] Giglio, L., J. T. Randerson y G. R. van der Werf, 2016: Global Fire Emissions Database, www.globalfiredata.org.
- [7] Le Quéré, C. y otros, 2015: Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*, 7(2): 349-396, doi:10.5194/essd-7-349-2015.
- [8] Butler, J. H. y S. A. Montzka, 2016: The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- [9] NOAA ESRL, 2016: NOAA's Annual Greenhouse Gas Index, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>.
- [10] Conway, T. J. y otros, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network, *J. Geophys. Res.*, 99:22831-22855.
- [11] OMM, 2009: *Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Centre for Greenhouse Gases* (Y. Tsutsumi, K. Mori y otros). GAW Report No. 184 (WMO/TD-No. 1473), Ginebra, 29 págs, https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/TD_1473_GAW184_web.pdf.
- [12] Berg, A. y otros, 2016: Land-atmosphere Feedbacks Amplify Aridity Increase over Land under Global Warming. *Nature Climate Change* 6 (9): 869-874, doi:10.1038/nclimate3029.
- [13] Frölicher, T. L., 2016: Climate Response: Strong Warming at High Emissions. *Nature Climate Change* 6 (9), 823-824, doi:10.1038/nclimate3053.
- [14] DeConto R. M. y D. Pollard, 2016: Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise, *Nature*, 531:591-597, doi:10.1038/nature17145.
- [15] IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (Equipo principal de redacción: R. K. Pachauri y L. A. Meyer, eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 176 págs.
- [16] National Academy of Sciences, 2010: *Verifying Greenhouse Gas Emissions: Methods to Support International Climate Agreements*. The National Academies Press, Washington, D.C., 2010, doi: 10.17226/12883
- [17] Ciais, P. y otros, 2010: *GEO Carbon Strategy*, Secretaría del GEO, Ginebra/FAO, Roma.
- [18] IPCC 2010, *Expert Meeting on Uncertainty and Validation of Emission Inventories* (H. S. Eggleston, J. Baasansuren, K. Tanabe y N. Srivastava, eds.). Meeting Report of the Expert Meeting on Uncertainty and Validation of Emission Inventories, Utrecht, Países Bajos, 23 a 25 de marzo de 2010, Pub. IGES, Japón.
- [19] IPCC 2006: *2006 Guidelines on National Emission Inventories*, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- [20] OMM, 2016: Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS), <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/IG3IS-info.html>.
- [21] Henne, S. y otros, 2016: Validation of the Swiss methane emission inventory by atmospheric observations and inverse modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, 16:3683-3710, www.atmos-chem-phys.net/16/3683/2016/.

[22] http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php.

[23] Zavala-Araiza y otros, 2015: Reconciling divergent estimates of oil and gas methane emissions. *PNAS*, 112(51):15597-15602, www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1522126112.

[23] Lauvaux, T. y otros, 2016: High-resolution atmospheric inversion of urban CO₂ emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2015JD024473.

[25] McKain, K. y otros, 2015: Methane emissions from natural gas infrastructure and use in the urban region of Boston, Massachusetts. *PNAS*, 112(7):1941-1946, doi:10.1073/pnas.1416261112.

[26] Bréon, F. M. y otros, 2015: An attempt at estimating Paris area CO₂ emissions from atmospheric concentration measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 15 :1707-1724, 2015, <http://www.atmos-chem-phys.net/15/1707/2015/acp-15-1707-2015.html>.

[27] Wu, L. y otros, 2016: What would dense atmospheric observation networks bring to the quantification of city CO₂ emissions? *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 7743-7771, 2016, <http://www.atmos-chem-phys.net/16/7743/2016/acp-16-7743-2016.html>.

[28] OMM, 2012: *16th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2011)*. Wellington, Nueva Zelandia, 25 a 28 de octubre de 2011 (G. Brailsford, ed.). GAW Report No. 206. Ginebra.

Contactos

Organización Meteorológica Mundial

División de Investigación sobre el Medioambiente Atmosférico
Departamento de investigación, Ginebra
Correo electrónico: gaw@wmo.int
Sitio web: <http://www.wmo.int/gaw>

Centro Mundial de Datos sobre Gases de Efecto Invernadero

Servicio Meteorológico de Japón, Tokio
Correo electrónico: wdcgg@met.kishou.go.jp
Sitio web: <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>

- 1) ppm = número de moléculas de gas por millón (10⁶) de moléculas de aire seco
- 2) 1 PgC = 1 petagramo (10¹⁵ gramos) de carbono
- 3) La fracción molar es la expresión que se prefiere para referirse a la abundancia (concentración) de una mezcla de gases o fluidos. En la química de la atmósfera, se utiliza para expresar la concentración como cantidad de moles de un compuesto por mol de aire seco.
- 4) ppb = número de moléculas de gas por mil millones (10⁹) de moléculas de aire seco
- 5) Este porcentaje se calcula en términos de la contribución relativa del o de los gas(es) mencionado(s) al aumento del forzamiento radiativo mundial causado por el conjunto de GEI de larga duración desde 1750.
- 6) Gg = gigagramo (10⁹ gramos)
- 7) ppt = número de moléculas de gas por billón (10¹²) de moléculas de aire seco

Observatorios de gases de efecto invernadero



La Estación de referencia de medición de la contaminación atmosférica del cabo Grim (40,68°S, 144.69°E, 94 metros sobre el nivel del mar) es una estación de la VAG de la OMM en pleno funcionamiento. Está ubicada sobre el acantilado costero del extremo noroccidental de Tasmania (Australia). Los vientos predominantes del suroeste por lo general atraviesan grandes franjas del océano Austral, expuestos a un contacto mínimo o nulo con fuentes terrestres o antropógenas durante largos períodos, lo que ofrece un emplazamiento ideal para hacer muestreos de referencia en las latitudes medias del hemisferio sur. En otras ocasiones, los vientos del norte (que atraviesan la ciudad de Melbourne) o del sureste (procedentes de tierras rurales agrícolas) permiten realizar un muestreo episódico en circunstancias particulares. La estación está administrada por la Oficina de Meteorología de Australia, y sus actividades de investigación científica están gestionadas conjuntamente por dicha Oficina y por la Organización de Investigaciones Científicas e Industriales del Commonwealth de Australia. Cuenta también con la colaboración de otros asociados, como la Organización de Ciencia y Tecnología Nucleares de Australia y la Universidad de Wollongong, así como de varias instituciones internacionales y programas de medición. Los programas científicos de la estación abordan la química atmosférica multifase, las partículas, la radiación espectral y pasiva, el ozono/los gases reactivos, el dióxido de carbono y sus isótopos estables, los gases de efecto invernadero distintos del CO₂, el archivo de muestras de aire y el radón. La estación se inauguró en 1976 y en 2016 celebra 40 años de observaciones continuas y de excelencia científica.



El Observatorio Kosetice (49,58°N, 15,08°E, 534 metros sobre el nivel del mar), administrado por el Instituto Hidrometeorológico de la República Checa, está ubicado en una zona rural agrícola escasamente poblada en las Tierras Altas de Bohemia y Moravia. El Observatorio fue creado en 1988 como estación especializada en la vigilancia e investigación de la calidad ambiental a nivel regional en Chequia. La estación se centra en la calidad del aire (NO_x, O₃, SO₂, CH₄, CO, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, química de la precipitación) y las mediciones meteorológicas y de aerosoles específicos, entre otras. El Observatorio ha realizado observaciones continuas del CH₄ desde 1996 usando la cromatografía en fase gaseosa. La estación forma hoy parte de la red del Sistema Europeo Integrado de Observación del Carbono y mide el CO₂ y el CH₄ con equipos de punta.