



BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS GASES REACTIVOS

Aspectos más destacados del Programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global

Nº 2 | Agosto de 2018

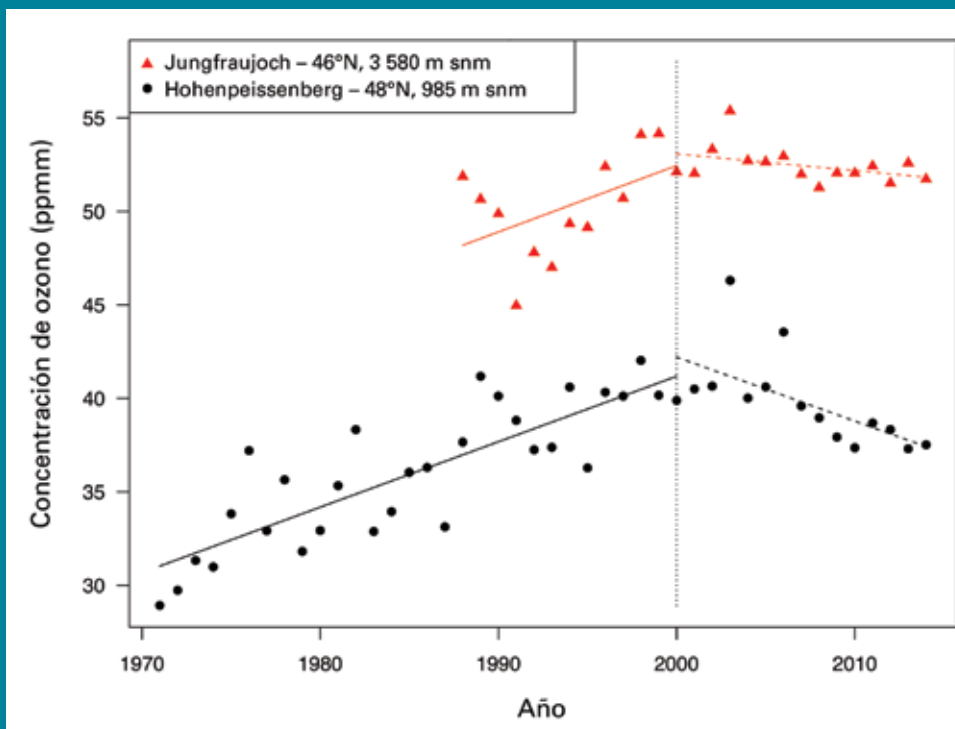


Figura 1. Concentraciones medias anuales de ozono de superficie obtenidas en dos estaciones europeas de vigilancia del ozono. Las dos estaciones forman parte del Programa VAG y han participado en el Informe de evaluación sobre el ozono troposférico. Las líneas de tendencia se han ajustado por separado para los periodos anterior y posterior al año 2000, ya que la tendencia ascendente se revirtió a principios del siglo XXI, a excepción del período de 2003 a 2006, cuando se registraron concentraciones muy altas durante la ola de calor que se produjo en Europa. Las concentraciones de ozono son más altas en Jungfraujoch que en Hohenpeissenberg, ya que aumentan con la altitud.

La reglamentación sobre la calidad del aire y las medidas de mitigación de la contaminación en Europa y América del Norte han tenido efectos decididamente positivos en la calidad del aire. Desde el año 2000, tanto la concentración media como la máxima de ozono de superficie se han estabilizado en Europa y América del Norte, e incluso han empezado a disminuir en algunas zonas, tras haber estado creciendo durante todo el siglo XX (figura 1). Por otra parte, en las pocas estaciones de observación en superficie existentes en Asia Oriental, desde el año 2000 se ha observado un incremento continuo del ozono superficial. Además, el transporte atmosférico del ozono y sus precursores químicos a largas distancias ha hecho que en algunos emplazamientos de superficie de la costa occidental de América del Norte se observe también un incremento continuo de su concentración. Si bien los efectos del ozono para la salud y la vegetación se han vuelto menos graves en muchas regiones del mundo, las consecuencias a largo plazo, causadas por la concentración del ozono de fondo, siguen siendo preocupantes.

La detección de los cambios en los niveles de concentración de fondo requiere mediciones sistemáticas a largo plazo en emplazamientos que no estén directamente afectados por emisiones locales. Estas mediciones se suman a la vigilancia urbana, que es necesaria para investigar episodios de niveles altos de ozono y para verificar el cumplimiento de los reglamentos sobre la calidad del aire. Aunque se han realizado observaciones sistemáticas de las concentraciones de ozono de superficie en Europa y América del Norte desde la década de 1970, esas observaciones son escasas o inexistentes en muchas partes del mundo. El Informe de evaluación sobre el ozono troposférico (TOAR), reciente iniciativa internacional de investigación que cuenta con una contribución considerable del Programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG), contiene un análisis de los cambios en la distribución mundial de la concentración de ozono de superficie, que ha redundado en una evaluación de la carga de ozono troposférico.

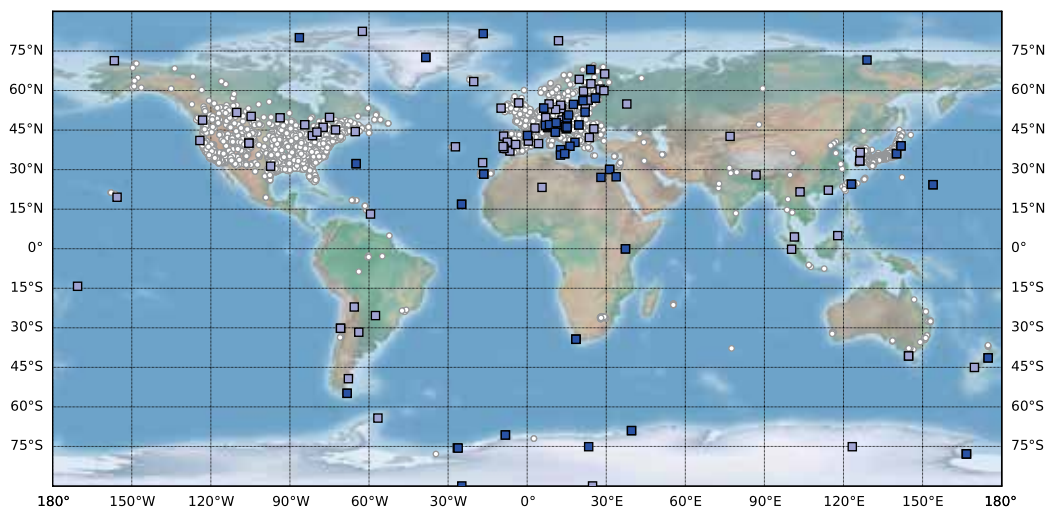


Figura 2. Cobertura mundial de las estaciones de observación del ozono de superficie. Los cuadrados oscuros (datos actualizados recientemente en el Centro Mundial de Datos sobre Gases Reactivos) y los cuadrados claros representan estaciones de la red VAG; los pequeños círculos blancos indican estaciones de otras redes incluidas en la base de datos del Informe de evaluación sobre el ozono troposférico.

El ozono en la troposfera

El ozono troposférico (O_3) es un contaminante atmosférico secundario y un gas de efecto invernadero perjudicial para la salud humana, los cultivos y la productividad de los ecosistemas. Se forma a partir de las reacciones químicas de los llamados precursores del ozono en presencia de la luz del sol. Los precursores principales son los óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO + NO_2$), el monóxido de carbono (CO), el metano (CH_4) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) distintos del metano (véase también el N° 1 del *Boletín de la OMM sobre los gases reactivos*). Aunque estos precursores también existen de manera natural, las contribuciones de las fuentes antropógenas, como las industrias o los motores de combustión interna, son las principales responsables de los altos niveles de concentración de ozono. El ozono, al igual que muchos de sus precursores, es un compuesto altamente reactivo y oxidante. El ozono también desempeña una función importante en la química atmosférica porque facilita la eliminación de otros contaminantes de la atmósfera. Por ejemplo, el ozono es la principal fuente troposférica del radical hidroxilo (OH), que actúa como “detergente” de la atmósfera al iniciar la reacción de oxidación de toda una serie de contaminantes y gases de efecto invernadero químicamente reactivos. Para entender estas complejas interacciones químicas, evaluar el impacto de los cambios de las emisiones en los niveles de contaminación, verificar simulaciones realizadas mediante modelización numérica [2] y cuantificar las interacciones entre los compuestos reactivos de vida corta y el cambio climático, es necesario realizar observaciones a largo plazo de gases reactivos en la troposfera [3].

En este número del *Boletín de la OMM* sobre los gases reactivos se presentan los efectos del ozono troposférico sobre la salud humana, la vegetación y el clima. Esta información se basa en conocimientos recientes armonizados a escala mundial obtenidos a partir de la red de observaciones.

La red mundial de observaciones a largo plazo

El ozono de superficie se empezó a observar en el siglo XIX. Las técnicas de medición han avanzado considerablemente, desde el método semicuantitativo utilizado en aquella época, y la porción observada del mundo ha aumentado [4]. Las observaciones permanentes empezaron a principios

de la década de 1970 en un número muy reducido de emplazamientos, incluidas las estaciones mundiales de la VAG, como las de Hohenpeissenberg (Alemania), Barrow (Alaska, Estados Unidos) o Mauna Loa (Hawái, Estados Unidos). El registro ininterrumpido de ozono más largo del mundo, que empezó en 1956, es producto de la combinación de los dos emplazamientos vecinos de Arkona y Zingst (distantes entre sí 60 km) en la costa septentrional alemana del mar Báltico. Tras la puesta en marcha de la VAG, en 1989, el número de estaciones de la red mundial de medición del ozono de superficie creció rápidamente. En el Informe de evaluación sobre el ozono troposférico se recopilaron varios miles de conjuntos de datos horarios procedentes de emplazamientos de medición en superficie de todo el mundo (tanto urbanos como no urbanos), y se proporcionaron estadísticas sobre la exposición al ozono que guardaban una coherencia a escala mundial [5]. En la figura 2 se muestra la red actual de medición de la VAG para el ozono de superficie y la red de estaciones que contribuyen al Informe de evaluación sobre el ozono troposférico.

Si bien las observaciones del ozono troposférico han evolucionado de mediciones esporádicas en unos pocos emplazamientos a redes nacionales extensas y bien calibradas con colaboración internacional formal, y se han complementado con ozonosondas, mediciones desde aeronaves y observaciones satelitales a escala mundial, las observaciones en superficie siguen sin ser ni completas ni uniformemente distribuidas [5].

Efectos del ozono troposférico

A continuación se explican los efectos directos e indirectos del ozono de superficie para la salud humana, la vegetación y el clima. El Informe de evaluación sobre el ozono troposférico aporta información y mapas concretos de cada uno de esos efectos, además de las evaluaciones basadas en los impactos que figuran en los siguientes análisis: TOAR-Salud [6], TOAR-Vegetación [7] y TOAR-Clima [8].

Salud humana

La vida en la Tierra como la conocemos no sería posible sin la capa de ozono estratosférico, que absorbe la radiación ultravioleta (UV) perjudicial que, de otro modo, llegaría a

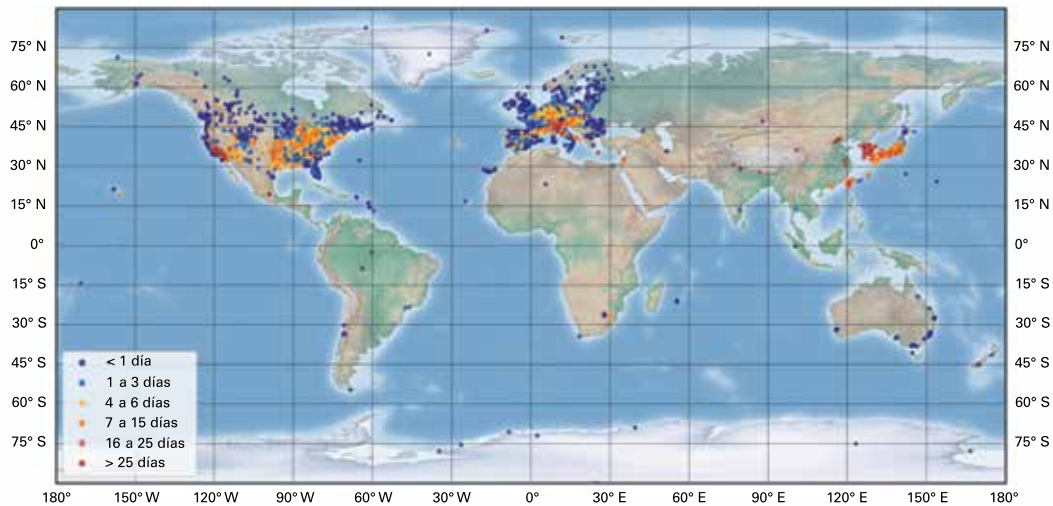


Figura 3. Exposición pico de corta duración expresada en número de días por año con niveles de concentración de ozono superiores a 70 ppmm (valor límite en los Estados Unidos), promediados a lo largo del período 2010–2014. Se usaron datos procedentes de 481 estaciones de la base de datos TOAR para efectuar análisis. (Fuente: Adaptado de Fleming y otros, 2018 [6], figura 4b).

la superficie terrestre. Sin embargo, en la troposfera, y en particular cerca de la superficie, en la llamada capa límite planetaria, el ozono actúa como un potente oxidante y puede perjudicar al funcionamiento de los aparatos respiratorio y cardiovascular humanos al reaccionar con la pleura y otras paredes de las vías respiratorias [9]. Cientos de miles de vidas se terminan prematuramente cada año a causa de los efectos de la contaminación por ozono antropógeno [10]. Son necesarias medidas intensivas de control de la calidad del aire para evitar la mortalidad prematura en zonas urbanas, que según las previsiones se duplicará para el año 2050 si el crecimiento demográfico y el desarrollo económico continúan al ritmo actual [11].

Muchos países han aplicado normas de calidad del aire para el ozono para proteger la salud humana mediante un límite de exposición basado en el valor máximo diario de la concentración media de ozono en 8 horas. A menudo se combina con el número de veces que se permite superar el límite antes de que se produzca una violación de la norma para el ozono. Por ejemplo, el valor umbral europeo es de 60 ppmm (Directiva 2008/50/CE). En los Estados Unidos, el valor umbral es de 70 ppmm, en China es de 75 ppmm y el que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 50 ppmm.

La exposición de corta duración a altos niveles de ozono es, en términos relativos, más frecuente en los emplazamientos urbanos que en los no urbanos. Entre las zonas en las que se dispone de medidas, los valores actuales de exposición pico de corta duración en verano (figura 3) son más altos en el este de Asia, el sur de Europa y la costa occidental de América del Norte. La evaluación de los valores pico de ozono en otras regiones es limitada debido a la falta de datos.

Desde la década de 1990, las emisiones antropógenas de precursores del ozono han disminuido gradualmente en América del Norte y Europa, y han aumentado en Asia Oriental ([12]). Por consiguiente, las concentraciones pico de ozono y, por lo tanto, la exposición humana, han disminuido en Europa y América del Norte y han aumentado en Asia Oriental [13]. Las medidas de control de las emisiones establecidas (por ejemplo en China en 2011) son demasiado recientes para haber tenido un efecto apreciable en la tendencia del ozono. Además de las emisiones antropógenas de precursores del

ozono, los cambios meteorológicos asociados a la variabilidad interanual y el cambio climático también pueden repercutir en la distribución del ozono [14].

En muchos lugares de Europa, los episodios de altos niveles de ozono muestran una tendencia descendente a pesar de que la media anual no ha descendido desde 1990 (figura 4), lo que pone de manifiesto el hecho de que los valores de exposición pico al ozono no se comportan necesariamente como la media anual, y deberían investigarse por separado al determinar la exposición de las personas al ozono.

En la tendencia generalmente decreciente de los episodios de altos niveles de ozono que se observa en la figura 4, destacan dos años extremos. Las altas concentraciones de ozono de esos años están relacionadas con las olas de calor que sufrió Europa en los años 2003 y 2006. Durante esos episodios, los niveles de concentración de ozono pueden alcanzar las 200 ppmm, como sucedió en Francia durante la ola de calor de 2003 [15]. La mortalidad durante una ola de calor es mayor a causa del estrés debido al calor. Sin embargo, no es solo el calor lo que afecta a las personas, también lo hacen los altos niveles de ozono; entre 225 y 595 muertes adicionales se atribuyeron a episodios de altos niveles de ozono en el Reino Unido durante la ola de calor de agosto de 2003 (véase también la sección llamada “¿Dónde y cuándo es más alta la exposición al ozono? – Variabilidad del ozono troposférico). En el contexto de un clima cambiante, se prevé que esas olas de calor sean cada vez más frecuentes.

Vegetación

La contaminación por ozono puede afectar a los principales servicios ecosistémicos proporcionados por las plantas terrestres, tales como la conservación de la biodiversidad, la producción de alimentos y de productos forestales, el secuestro de carbono y la regulación del agua. En la actualidad, se pierden 85 millones de toneladas de trigo al año a causa de la exposición al ozono [16], y los daños por ozono provocan pérdidas económicas del rango de entre 10 000 y 20 000 millones de dólares estadounidenses por sus efectos en los cultivos de alimentos básicos como el trigo, la soja y el maíz [17]. Además de esa reducción en el rendimiento de los cultivos, los altos niveles de ozono reducen la biomasa forestal y alteran la composición de las especies de las praderas y la vegetación seminatural [18].

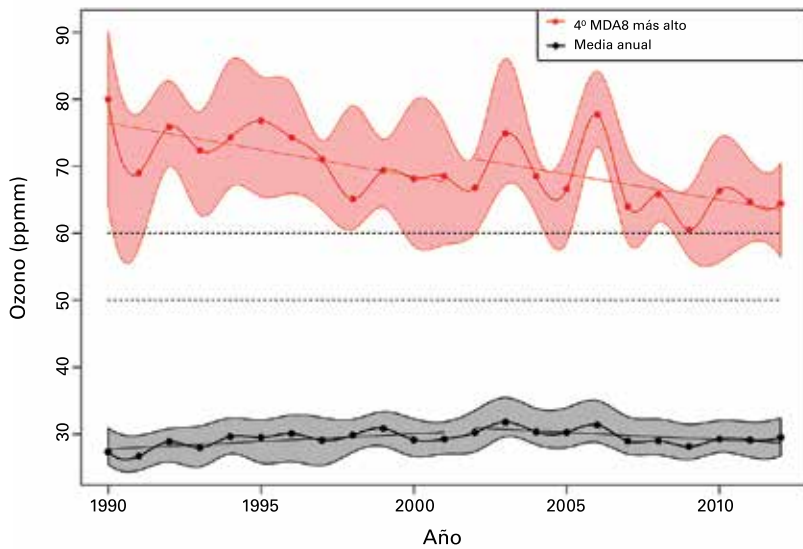


Figura 4. Mediana de la media anual (negro) y de los picos anuales (rojo) de la concentración de ozono en 55 emplazamientos rurales de vigilancia pertenecientes al Programa Europeo de Vigilancia de la Contaminación Ambiental (EMEP). El valor máximo diario de la concentración media de ozono en 8 horas (MDA8) representa el cuarto valor máximo diario de la media móvil de 8 horas. Las líneas discontinuas indican los valores establecidos en las Directrices sobre la calidad del aire de la OMS (50 ppmm) y el objetivo a largo plazo de la UE (60 ppmm). La línea gruesa es la mediana anual en toda la red, y los límites inferior y superior de las zonas sombreadas son los percentiles 25º y 75º. Las líneas rectas finas muestran la tendencia lineal en los períodos 1990-2001 y 2002-2012.

Los efectos directos del ozono sobre las plantas son específicos de cada especie e incluyen toxicidad directa y daño celular [18]. Las plantas son especialmente vulnerables a los episodios de alto nivel de ozono que duran varios días consecutivos y cuando los efectos acumulativos a largo plazo del ozono absorbido se producen durante una o varias fases vegetativas [17]. En la figura 5 se muestra un ejemplo del daño sufrido por una planta a causa del ozono y cómo empeora con el tiempo. La fisiología alterada de la vegetación también provoca la reducción de la captación de dióxido de carbono por parte de las plantas, que es una consecuencia indirecta del ozono en el clima [19].

La exposición al ozono puede ser alta tanto en climas húmedos como secos, y fríos o cálidos. La exposición más baja de las plantas al ozono está asociada a las condiciones de las zonas tropicales no contaminadas, aunque los emplazamientos de las regiones tropicales están insuficientemente representados [17]. Además de la concentración ambiental de ozono, la captación real de ozono también depende del grado de apertura de los estomas. Así, por ejemplo, algunos de los niveles de ozono más altos se encuentran en zonas de climas secos con bajo contenido de humedad en el aire y en el suelo (como las Grandes Llanuras de los Estados Unidos). Cuando se exponen a esas condiciones, las plantas tienden a cerrar sus estomas para limitar la pérdida de agua. Esto limita la captación de ozono y protege a la planta frente a los efectos nocivos de este. No obstante, también se reduce la eliminación de ozono de la atmósfera, con el consiguiente incremento de los niveles de concentración del ozono ambiental.

Cuando se utilizan sistemas de riego para paliar el déficit de humedad del suelo en climas secos, las plantas ya no tienen que

evitar la pérdida de agua y abren sus estomas. En consecuencia, captan el ozono y dejan de estar protegidas frente a los daños que este provoca [17]. En el caso del trigo, hasta un tercio de los beneficios del riego añadido podrían perderse a causa de la contaminación por ozono [16].

Clima

Los efectos del ozono troposférico o de cualquier otro gas de efecto invernadero en el clima se cuantifican por su contribución al forzamiento radiativo¹. En referencia al período preindustrial (1750), el forzamiento radiativo promedio mundial del ozono es similar al del metano, y cerca de un cuarto del que se atribuye al dióxido de carbono. A diferencia del dióxido de carbono y del metano, el período de vida atmosférico del ozono es mucho más corto y sus efectos en el clima se producen principalmente poco después de su formación. La evolución del forzamiento radiativo del ozono (figura 6) refleja la tendencia de las emisiones antropógenas de los precursores, con una tendencia a la aceleración destacable a partir de 1950 y una tendencia a la deceleración a partir de la década de 1990 [19]. En cuanto al ozono, un examen sistemático reciente de las mediciones históricas indica que los niveles de concentración del ozono en la era preindustrial eran algo mayores de lo que se suponía hasta ahora, y confirma las tendencias que se extraen de los modelos numéricos [4].

Además de su contribución directa al forzamiento radiativo, el ozono puede condicionarlo también de manera indirecta a través del daño que causa en la vegetación, que reduce la productividad vegetal y conduce así al descenso en la captación de dióxido de carbono, cuyo resultado es una



Figura 5. Las lesiones causadas por el ozono en hojas de judías (Black Turtle) aumentan cuando la exposición se prolonga: inicialmente los daños son leves (izquierda) y después van agravándose (centro y derecha).

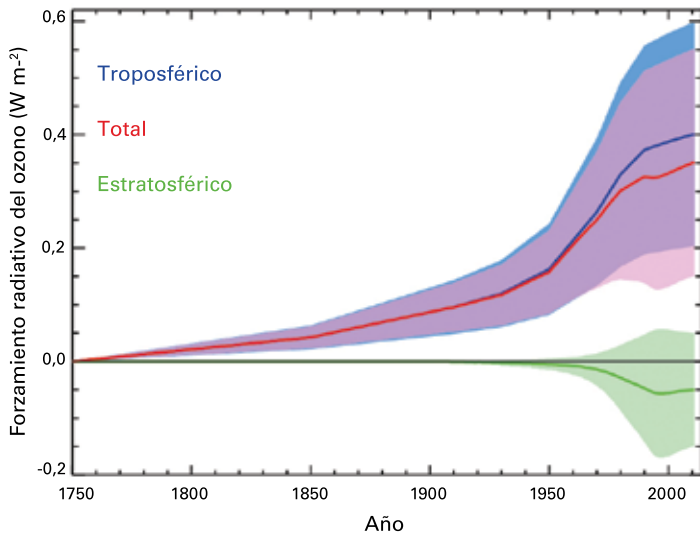


Figura 6. Evolución del forzamiento radiativo causado por el ozono troposférico y estratosférico desde 1750 hasta 2010.
Fuente: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2013) [19], figura 8.7.

mayor cantidad de este compuesto en la atmósfera [19]. Otro efecto indirecto del ozono en el forzamiento radiativo tiene el resultado opuesto: al aumentar la concentración de ozono aumenta también la producción del radical hidroxilo, lo que conduce a una reducción del tiempo de vida del metano en la atmósfera (véase la sección titulada “Ozono en la troposfera”).

A diferencia de lo que ocurre con la exposición de las personas y las plantas, el efecto del ozono sobre el clima es más difícil de calcular, ya que no se limita a la capa límite, sino que hay que tener en cuenta el ozono en toda la atmósfera. Para tener una imagen lo más completa posible hay que combinar distintas fuentes de datos. Para un análisis exhaustivo de las diferentes fuentes de datos, con sus ventajas y sus limitaciones, consulte TOAR-Clima y el próximo TOAR-Observaciones [4].

Las mediciones de ozono realizadas en las estaciones situadas en la cima de las montañas se utilizan para entender la variación del ozono en la troposfera libre, debido a la altitud sobre el nivel del mar de los emplazamientos, mientras que la distribución vertical del ozono se obtiene a partir de las ozonsondas y las mediciones desde aeronaves. Normalmente se han realizado lanzamientos rutinarios de ozonsondas con frecuencia semanal desde menos de 100 estaciones en todo el mundo que están distribuidas de manera irregular (consulte el Centro mundial de datos sobre el ozono y la radiación ultravioleta de la OMM - <https://woudc.org/>). Para obtener el contenido total de ozono en la troposfera se utilizan diversos instrumentos satelitales, aunque esa operación se ve dificultada por la presencia de la capa de ozono estratosférico [4].

Todos los productos de datos disponibles tienen ventajas y limitaciones, de manera que para asegurar el nivel de confianza en las tendencias observadas hay que analizar la concordancia entre las diferentes fuentes de datos, como se demuestra en TOAR-Clima.

¿Dónde y cuándo es más alta la exposición al ozono? – Variabilidad del ozono troposférico

En las regiones de latitudes medias y altas, el verano se considera la “estación del ozono”. En verano es más frecuente superar los umbrales normativos por diversas razones. Las altas temperaturas, la abundancia de luz solar, los días largos y la presencia de precursores del ozono, como los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV), favorecen la formación de ozono. Si bien los óxidos de nitrógeno son emitidos en gran medida a partir de la quema de combustibles fósiles, una fuente importante de COV, especialmente isopreno, son las plantas durante su etapa vegetativa. La contaminación atmosférica es particularmente persistente en condiciones de altas presiones estancadas, ya que la ausencia de precipitaciones y los vientos ligeros no favorecen la rápida eliminación de los contaminantes atmosféricos. Se ha calculado que, durante la ola de calor de agosto de 2003, un aumento de la temperatura de 10°C provocó un aumento del 5 % de los valores pico de ozono. El verano de 2003 se puede considerar un ejemplo de campo de la estrecha relación existente entre las condiciones meteorológicas y un contaminante secundario como el ozono [21]. Las condiciones de sequía asociadas con una ola de calor pueden llevar a las plantas a protegerse de la pérdida de agua. Esto impide la captación de ozono por parte de las plantas (consulte más detalles en la sección titulada “Vegetación”), de manera que

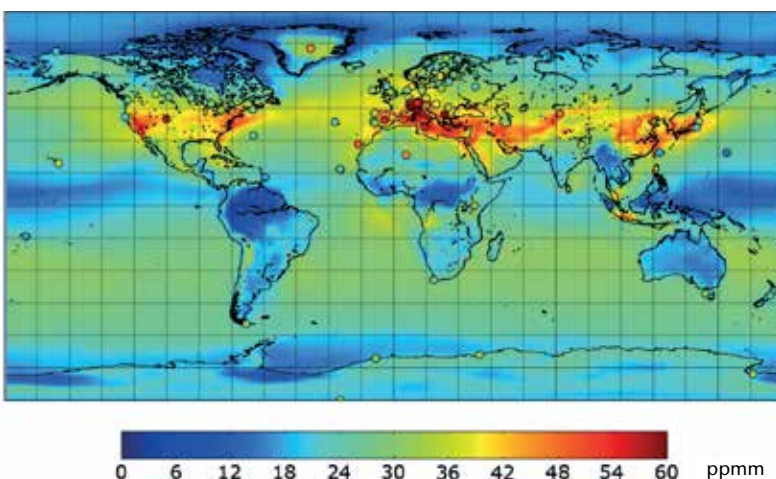


Figura 7. Distribución mundial de la concentración del ozono cerca de la superficie medida en las estaciones de la red VAG (2000-2009) superpuestas a la concentración de ozono simulada por modelos a partir del reanálisis del proyecto de Vigilancia de la Composición Atmosférica y el Clima (2003-2010). Media mensual para julio. Fuente: Informe de la VAG N° 209, 2013 [26].

se interrumpe un importante proceso de eliminación de ozono. Durante la ola de calor de agosto de 2003, este efecto aumentó la concentración de ozono aproximadamente entre 20 y 35 ppmm en el Reino Unido la mayoría de los días [22]. Normalmente las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de las plantas aumentan con la temperatura. Puesto que estas emisiones contribuyen a la producción de ozono, su incremento puede impulsar la producción de ozono cuando el tiempo es cálido, particularmente en verano. Por ejemplo, durante la ola de calor de 2003 en Europa, se midieron concentraciones de isopreno de hasta 1,2 ppmm en el sureste de Inglaterra, entre 3 y 6 veces más altas de las que se suelen observar [23].

Los niveles de concentración de ozono troposférico son generalmente mayores en el hemisferio norte que en el hemisferio sur (figura 7), y mayores sobre la tierra que sobre el océano, y aumentan con la altitud [24] (véase un ejemplo de diferentes altitudes en la figura 1). Como su ciclo de vida medio global es relativamente corto, (entre 20 y 25 días [25]), y aún más corto cerca de la superficie en verano, el ozono troposférico varía ampliamente tanto en el espacio como en el tiempo. En la figura 7 se muestra un ejemplo de la distribución espacial media típica del ozono, a partir de la modelización numérica para el mes de julio en el período de 2000 a 2009. Se ve claramente la alta concentración de ozono asociada a las emisiones urbanas e industriales en el hemisferio norte y a las regiones de quema de biomasa en África e Indonesia. En los océanos remotos los niveles de ozono son típicamente bajos.

El ozono troposférico y la Vigilancia de la Atmósfera Global

Cuantificar y comprender los cambios del ozono troposférico y sus precursores, así como las consecuencias ambientales de esos cambios son las tareas prioritarias previstas por el Grupo consultivo científico sobre gases reactivos del Programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global de la Organización Meteorológica Mundial. Las redes mundiales que tienen acuerdos sobre la normalización y la compatibilidad de los datos procedentes de diferentes plataformas y emplazamientos de observación son cruciales para la detección temprana de los cambios regionales y mundiales en la composición de la atmósfera, especialmente en lo tocante a los cambios en las emisiones antropógenas y el cambio climático.

El Informe de la VAG N° 209 aporta directrices detalladas sobre las mediciones del ozono troposférico [26]. Como se muestra en este Boletín, existen grandes lagunas en la red de observación global del ozono troposférico. Para llenar esas lagunas, se alienta a las estaciones existentes de la VAG que no realizan mediciones de gases reactivos a que añadan el ozono y sus precursores a su paquete de observaciones. La instalación de nuevos emplazamientos que se unan a la red de la VAG en regiones en las que los datos son escasos ayudaría a mejorar nuestra comprensión del ozono, sus precursores y otros gases abarcados por el Programa de la VAG.

Agradecimientos y enlaces

Los datos facilitados al Programa VAG por los Miembros de la OMM y las redes colaboradoras se han remitido al Centro Mundial de Datos sobre Gases Reactivos (CMDGR) (<https://www.gaw-wdcrg.org>), gestionado y mantenido por el Instituto Noruego para la Investigación Atmosférica (NILU). Las estaciones de la Vigilancia de la Atmósfera Global se describen en el Sistema de información de las estaciones de

la VAG (GAW SIS) con el apoyo de MeteoSwiss (<https://gawsis.meteoswiss.ch>). Los resultados del Informe de evaluación sobre el ozono troposférico (TOAR) que se citan en este Boletín están publicados como un número especial de la revista *Elementa* (<https://collections.elementascience.org/toar/>). Los datos del Informe de evaluación sobre el ozono troposférico también están disponibles en PANGAEA (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.876108>). La base de datos en tiempo real se puede consultar a través de la interfaz de la web interactiva de la Jülich Open Web Services Interface (JOIN; <https://join.fz-juelich.de>).

Referencias

- 1 Lefohn, A. S y otros, 2018: Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 6.
- 2 Young, P. J. y otros, 2018: Tropospheric Ozone Assessment Report: Assessment of global-scale model performance for global and regional ozone distributions, variability, and trends. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 6.
- 3 Monks, P. S. y otros, 2015: Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, volumen 15.
- 4 Tarasick, D. y otros: Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric ozone observations – How well do we know tropospheric ozone changes?. En preparación.
- 5 Schultz, M. G. y otros, 2017: Tropospheric Ozone Assessment Report: Database and Metrics Data of Global Surface Ozone Observations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 5.
- 6 Fleming, Z. L. y otros, 2018: Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day ozone distribution and trends relevant to human health. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 6.
- 7 Mills, G. y otros, 2018: Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day tropospheric ozone distribution and trends relevant to vegetation. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 6.
- 8 Gaudel, A. y otros, 2018: Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 6.
- 9 Oficina Regional de la OMS para Europa, 2006: *Air Quality Guidelines: Global Update 2005 – Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Copenhagen.
- 10 Anenberg, S. C, L.W. Horowitz, D. Q. Tong, y J. J. West, 2010: An Estimate of the Global Burden of Anthropogenic Ozone and Fine Particulate Matter on Premature Human Mortality Using Atmospheric Modeling. *Environmental Health Perspectives*, volumen 118, N° 9.
- 11 Lelieveld, J., J. S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki y A. Pozzer, 2015: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, volumen 525, N° 7569.
- 12 Zhang, Y. y otros, 2016: Tropospheric ozone change from 1980 to 2010 dominated by equatorward redistribution of emissions. *Nature Geoscience*, volumen 9, N° 12.

- 13 Chang, K.-L., I. Petropavlovskikh, O. R. Cooper, M G. Schultz, y T. Wang, 2017: Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring networks in eastern North America, Europe and East Asia. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 5.
- 14 Lin, M., L. W. Horowitz, R. Payton, A. M. Fiore y G. Tonnesen, 2017: US surface ozone trends and extremes from 1980 to 2014: quantifying the roles of rising Asian emissions, domestic controls, wildfires, and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, volumen 17, N° 4.
- 15 Fiala, J., L. Cernikovskiy, F. de Leeuw, y P. Kurfuerst, 2003: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2003 - Overview of exceedances of EC ozone threshold values during the summer season April–August*. Agencia Europea del Medio Ambiente.
- 16 Mills G. y otros, 2018: Ozone pollution will compromise efforts to increase global wheat production. *Global Change Biology*.
- 17 Avnery, S., D. L. Mauzerall, J. Liu y L. W. Horowitz, 2011: Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. *Atmospheric Environment*, volumen 45, N° 13.
- 18 Ainsworth, E. A., C. R. Yendrek, S. Sitch, W. J. Collins y L. D. Emberson, 2012: The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change. *Annual Review of Plant Biology*, volumen 63, N° 1.
- 19 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2013: *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. Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (Estados Unidos), Cambridge University Press.
- 20 Colette, A. y otros, 2016: *Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012*. Kjeller (Noruega), Instituto de Investigaciones Atmosféricas de Noruega.
- 21 Solberg, S. y otros, 2008: European surface ozone in the extreme summer 2003. *Journal of Geophysical Research*, volumen 113, N° D7.
- 22 Vieno, M. y otros, 2010: Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK. *Atmospheric Chemistry and Physics*, volumen 10, N° 16.
- 23 Lee, J. y otros, 2006: Ozone photochemistry and elevated isoprene during the UK heatwave of August 2003. *Atmospheric Environment*, volumen 40, N° 39.
- 24 Cooper, O. R. y otros, 2014: Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, volumen 2.
- 25 Young, P. J. y otros, 2013: Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, volumen 13, N° 4.
- 26 Galbally, I. E. y M. G. Schultz, 2013: Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere. *Informe N° 209 de la VAG*. Ginebra, Organización Meteorológica Mundial.
- 27 TOAR Surface Observation Database; estado de la edición 2018-07-23; re3data.org - Registry of Research Data Repositories. <http://doi.org/10.17616/R3FZ0G> last accessed: 2018-08-09.

Contactos

Organización Meteorológica Mundial

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

Centro Mundial de Datos sobre Gases Reactivos

NILU
Kjeller (Noruega)
Correo electrónico: kt@nilu.no
Sitio web: <http://www.gaw-wdcr.org/>

- 1 En química, un **precursor** es un compuesto que participa en una reacción química para producir otro compuesto.
- 2 La **concentración de fondo** de un gas traza es aquella que no es atribuible a fuentes de emisión locales sino que es representativa de una zona más grande. Obsérvese que, si bien técnicamente es incorrecto usar el término concentración para referirse a la relación de mezcla de partes por mil millones (ppmm) sin especificar las condiciones atmosféricas, en todo este Boletín se usa la palabra concentración para facilitar la comprensión de la información que contiene.
- 3 La **troposfera** es la parte inferior de la atmósfera, comprendida entre la superficie de la Tierra y los 6-15 km de altitud, según la latitud.
- 4 **Antropógeno** significa causado por la actividad humana o relacionado con ella.
- 5 En una **simulación mediante modelización numérica** se aproximan las leyes físicas del sistema terrestre (o, en principio, de cualquier otro sistema) mediante modelización matemática por ordenador.
- 6 Una **ozonosonda** es un instrumento instalado en un globo que mide ozono y magnitudes meteorológicas a diferentes altitudes a medida que el globo asciende, hasta que estalla (aproximadamente a 25 km de altitud).
- 7 La **estratosfera** es la segunda capa más baja de la atmósfera terrestre, y está situada justo encima de la troposfera y debajo de la mesosfera (rango de altitud: ~10–65 km).
- 8 La **capa límite planetaria** es la parte inferior de la troposfera y está fuertemente afectada por la turbulencia superficial.
- 9 Los **estomas** son los poros, por ejemplo en la superficie inferior de las hojas, que facilitan el intercambio de gases. A través de los estomas entra el aire para la respiración y la fotosíntesis y sale el vapor de agua.
- 10 El **forzamiento radiativo** o forzamiento climático es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía radiada de vuelta al espacio. Para analizar el impacto de un gas de efecto invernadero en el cambio climático durante un período determinado, se hace una estimación del forzamiento radiativo causado por los cambios en la concentración de ese gas entre un año de la era preindustrial (en este caso 1750) y un año posterior concreto [20].

Estaciones seleccionadas de la VAG que llevan a cabo observaciones de gases reactivos



La estación III Neumayer, que lleva el nombre del geofísico Georg von Neumayer, es la estación alemana de investigaciones antárticas explotada por el Instituto Alfred Wegener, Centro Helmholtz de Investigaciones Polares y Marinas. Está emplazada en la meseta de hielo Ekstöm, de unos 200 m de espesor (70,7°S, 8,3°W, 42 m snm). Durante todo el año hay investigadores viviendo y trabajando en la Neumayer III, de los cuales nueve permanecen allí todo el invierno. La Neumayer III y las anteriores estaciones Neumayer han sido el centro de investigaciones permanentes en química atmosférica, meteorología y geofísica desde 1981. En el vídeo (<https://youtu.be/HtjzTRWfBRU>) el meteorólogo está poniendo en marcha una ozonosonda para medir el ozono y otras variables meteorológicas a diferentes altitudes a medida que la sonda asciende, hasta que el globo estalla.

La estación mundial de la Vigilancia de la Atmósfera Global de Assekrem está situada en la cima (altiplano) del segundo punto más alto de la cordillera de Hoggar, en el desierto del Sáhara, en Argelia (23,3°N, 5,6°E, 2710 m snm). Es un emplazamiento remoto a 50 km de distancia de Tamarrasset. Las visitas turísticas en la zona están limitadas a unas pocas docenas de visitantes por día a causa de las dificultades de acceso. La vegetación es extremadamente escasa. En primer plano se puede ver por dónde capta el aire el analizador de ozono. El instrumento se encuentra en el interior del edificio y ha sido renovado recientemente. Al fondo se observan dispositivos de medición meteorológicos. La estación también forma parte de la red de "muestreo en frascos" de la División de Vigilancia Global de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA).



La estación mundial de la Vigilancia de la Atmósfera Global de Ushuaia está situada en un acantilado en la Isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina) (54,8°S, 68,3°W, 18 m snm), a solo 10 km al suroeste de la ciudad de Ushuaia, en una zona remota de la costa marina subantártica. Los vientos estacionarios soplan prevalentemente desde el sector de aire limpio (SW) bajo el canal Beagle. Tierra del Fuego y su área oceánica adyacente están bajo la influencia de los vientos del oeste. Unido al edificio está el espectrofotómetro Dobson. La entrada de aire y diversos instrumentos meteorológicos y de medición de la radiación están montados encima de la plataforma sobre el tejado. Además de la instalación principal, hay un emplazamiento de muestreo con una torre de 12 m situado en una isla remota llamada Isla Redonda, en el Canal Beagle, que se puede utilizar para proyectos especiales. La serie temporal de ozono de la estación empieza en 1994 y facilita el estudio de la composición atmosférica en una región con escasa cobertura por parte de las estaciones de vigilancia (figura 2).