

Implicaciones del cambio climático en la calidad del aire

por Guy P. Brasseur*

Introducción

Los cambios en la composición química de la atmósfera que se han producido como consecuencia de una industrialización masiva y de una agricultura y urbanización intensivas, y también a causa del tráfico rodado, marítimo y aéreo, han derivado directa e indirectamente en un incremento del forzamiento radiativo y, fruto del mismo, en futuros cambios en las temperaturas y en los ciclos hidrológicos del planeta.

La mayor aportación al forzamiento radiativo está originada por el aumento de las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, un producto derivado de la quema de combustibles fósiles. Las emisiones de otros gases de efecto invernadero, entre los que se incluyen el metano y el óxido nitroso, también se han elevado como consecuencia de las actividades del ser humano. El ozono es un gas reactivo que no solo es importante a la hora de protegernos de la perniciosa radiación ultravioleta, sino que también es un gas de efecto invernadero y, con altas concentraciones de smog, puede llegar a ser nocivo tanto para la salud de los seres humanos como para el mundo vegetal. Finalmente, la emisión a la atmósfera de dióxido de azufre, precursor de las partículas de aerosoles sulfatados, de carbono negro y de partículas orgánicas también ha afectado a la transferencia radiativa en la atmósfera, ocasionando impactos sobre el sistema

climático. Las partículas submicrónicas de aerosoles sulfatados tienden a impulsar de nuevo a la atmósfera una parte de la radiación solar recibida, mientras que las partículas de carbono negro absorben una cantidad importante de radiación solar de onda corta y afectan al flujo de la radiación terrestre de onda larga.

Además, los aerosoles proporcionan los núcleos de condensación que facilitan la formación de las gotitas de las nubes. Su presencia en la atmósfera ocasiona importantes cambios en el albedo de las nubes y en la vida de las mismas, con efectos indirectos sobre el clima del planeta. La presencia de grandes cantidades de aerosoles también puede afectar a la estabilidad vertical de la atmósfera y, al depositarse en la superficie, las partículas pueden reducir el albedo de la nieve originando, una vez más, consecuencias sobre el clima.

Estos fenómenos son muy difíciles de cuantificar, puesto que implican la aparición de complejos procesos microfísicos y químicos. Por consiguiente, el impacto climático de los compuestos químicos, y concretamente de la contaminación atmosférica, resulta complicado de calcular. Y aún es más difícil de evaluar, si cabe, el efecto del cambio climático sobre la composición química y, en particular, sobre la calidad del aire.

En este artículo analizaremos brevemente los procesos que determinan las interacciones del sistema climá-

tico y la composición química de la atmósfera a diferentes escalas. En concreto, examinaremos los diferentes procesos a través de los cuales los cambios esperados en términos de temperatura y precipitación debidos a la acción del hombre podrían afectar a la calidad del aire en el futuro.

Impacto del cambio climático en la composición química de la atmósfera de fondo

Se han empleado modelos climáticos (IPCC, 2007) para llevar a cabo proyecciones de la evolución del valor medio de la temperatura y de la precipitación durante los próximos siglos. Cuando se adopta un escenario cotidiano para realizar las simulaciones, el incremento previsto en la temperatura media de la superficie global para finales del siglo XXI es de 2,8 °C, con un calentamiento medio de 3,5 °C en tierra y de hasta 7 °C en el Ártico. Estos cambios, que se producirán a menos que se adopten medidas drásticas encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tendrán importantes consecuencias sobre el sistema acoplado físico, químico, biológico e hidrológico que gobierna la evolución del planeta con arreglo a escalas temporales que pueden ir de decenios a siglos.

Tal y como se pone de manifiesto en la Figura 1, las interacciones de los ecosistemas continentales y oceánicos, y de los sistemas hidrológi-

* Centro Nacional de Investigación de la Atmósfera, Boulder, Colorado (Estados Unidos)

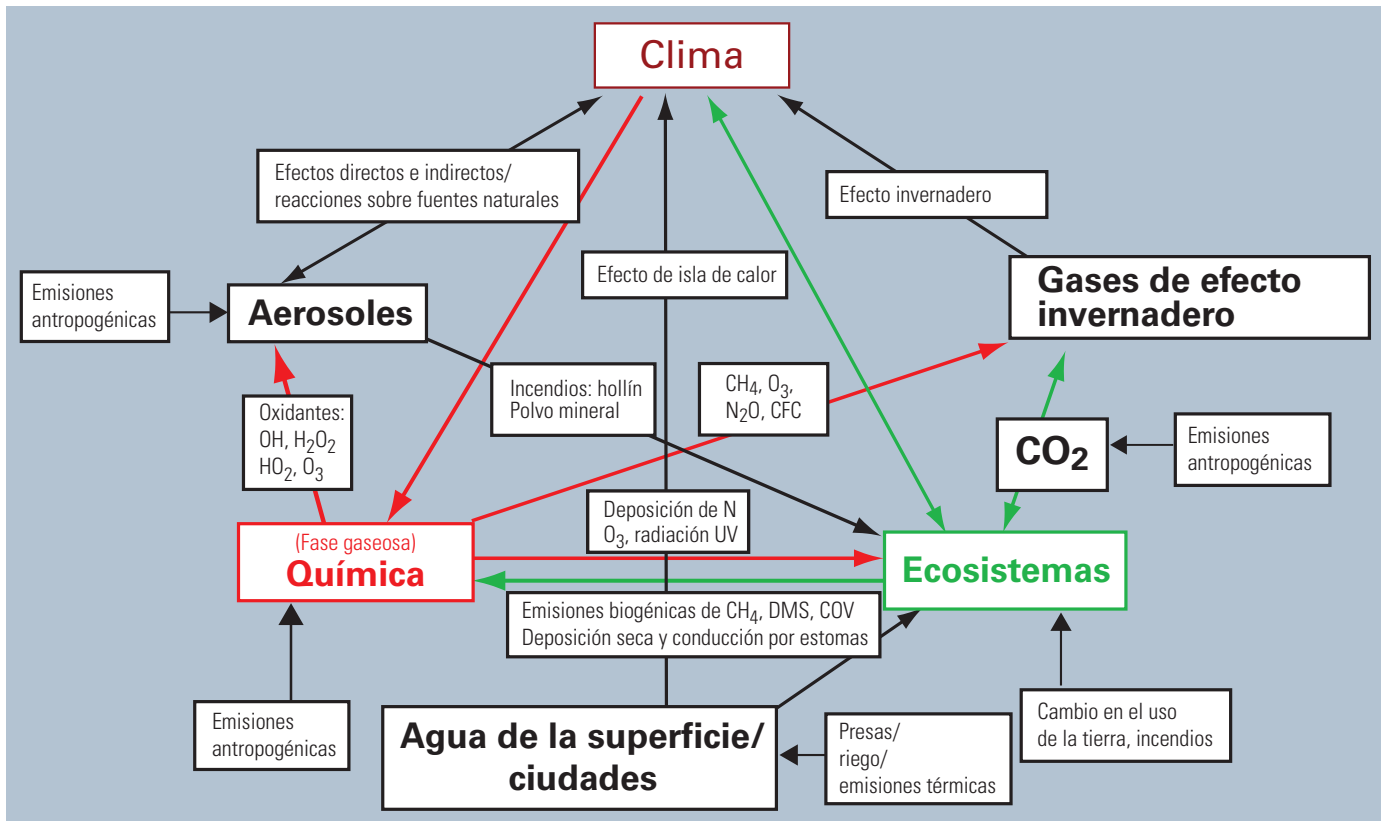


Figura 1 — Representación esquemática de las interacciones del clima, los gases atmosféricos reactivos, los gases de efecto invernadero, los aerosoles, los ecosistemas y el sistema hidrológico (de Cox, comunicación personal)

cos, biogeoquímicos, fotoquímicos, microfísicos y climáticos son muy complejas, por lo que su comprensión ha de pasar necesariamente por la investigación, la observación y la modelización en un laboratorio.

Concretamente, para la comunidad investigadora internacional resulta prioritario desarrollar sistemas exhaustivos de control, herramientas de asimilación de datos y modelos de predicción que integren un conjunto diverso de datos dentro de una estructura coherente. Los seres humanos perturban el sistema terrestre, no solo a través de la emisión de gases de efecto invernadero, sino también por la producción y emisión de compuestos reactivos y aerosoles, y al cambiar el uso de las tierras (por ejemplo, a través de la deforestación, el riego y la urbanización). Todas estas transformaciones antropogénicas y el cambio climático derivado de las mismas son susceptibles de modificar la composición química de la atmósfera.

El impacto del cambio climático en la abundancia atmosférica de gases reactivos y de aerosoles puede pro-

ducirse a través de diferentes mecanismos:

- los cambios en la temperatura atmosférica influyen en las velocidades a las que tienen lugar las reacciones químicas;
- los cambios en la humedad atmosférica afectan a la producción y destrucción químicas de especies químicas y, particularmente, al índice de pérdida de ozono troposférico;
- los cambios en la frecuencia e intensidad de las descargas eléctricas afectan a la producción atmosférica de óxido nítrico, con un efecto directo en el balance de ozono de la troposfera superior;
- los cambios en la nubosidad atmosférica influyen en la composición de la atmósfera al modificar el grado de penetración de la radiación solar y, por tanto, la actividad fotoquímica en la atmósfera; también resulta modificada la química acuosa y heterogénea asociada a la presencia de nubes;

- los cambios en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones como consecuencia del cambio climático afectan al ritmo de eliminación de la atmósfera de las sustancias solubles;
- los cambios en la temperatura en superficie y en las precipitaciones afectan a la emisión de compuestos químicos y a su depósito en la vegetación y en el suelo;
- los cambios en la temperatura del océano influyen en el intercambio de compuestos entre la atmósfera y los océanos, como por ejemplo el dimetil sulfuro, los cuales constituyen una fuente de aerosoles sulfatados;
- los cambios en la frecuencia e intensidad de las situaciones de estancamiento prolongado del aire afectan a la dispersión de contaminantes y aumentan la frecuencia e intensidad de los episodios de contaminación con consecuencias graves para la salud de los seres humanos;



más frecuentes o intensas conducirá a que el volumen de emisiones de productos derivados de la combustión, como el monóxido de carbono, el óxido nítrico, el hollín y otros compuestos, sea cada vez mayor, originando graves consecuencias sobre la calidad del aire a nivel regional e, incluso, global.

Finalmente, los incrementos en la frecuencia de las descargas eléctricas a causa del clima podrían ocasionar un mayor número de incendios de origen natural, sobre todo en las regiones boreales que experimenten un aumento en las emisiones a la atmósfera de compuestos químicos de naturaleza pirogénica. En todos los casos no solo se ve afectada la calidad del aire, sino también el forzamiento radiativo y, por ende, el sistema climático. Las reacciones positivas entre los sistemas químico y climático pueden identificarse, pero el papel que desempeñan sobre el conjunto del sistema terrestre podría verse relegado a un segundo plano por otras reacciones negativas y más intensas que mantengan el clima dentro de unos límites aceptables, al menos de cara al futuro previsto.

La cuantificación de los mecanismos de acoplamiento entre la química atmosférica y el clima requiere el desarrollo de complejos modelos relacionados con el sistema terrestre, que deberán tener en cuenta las interacciones conocidas de los procesos químicos y climáticos. Muchos grupos en el mundo están empleando actualmente estos modelos, por ejemplo, para evaluar el grado de recuperación del ozono estratosférico (tras la reducción progresiva de los halocarbonos de origen antropogénico) en el contexto de un clima cambiante. Una de las principales expectativas que suscitan estos modelos estriba en que también ofrecerán información acerca de la respuesta de la troposfera, concretamente por lo que se refiere al ozono y a los aerosoles, ante el futuro cambio climático.

Se han utilizado numerosos modelos químicos de transporte para evaluar la respuesta del ozono troposférico a los cambios climáticos durante el siglo XXI (véanse, por ejemplo, Breasseur y otros, 2006; Stevenson y otros, 2006). En el estudio de Stevenson y

- los cambios en la circulación general de la atmósfera influyen en el transporte a gran escala de agentes contaminantes de un continente a otro;
- los cambios en la actividad convectiva dan lugar a variaciones en el transporte vertical con respecto a la composición química de la troposfera superior;
- los cambios en el intercambio entre la estratosfera y la troposfera afectan a la abundancia de especies químicas, incluyendo el ozono, en la troposfera superior;
- los cambios en la intensidad del viento en superficie sobre los continentes modifican la movilización de partículas de polvo en las regiones áridas y, por tanto, afectan a la concentración de aerosoles en la troposfera;
- los cambios en la intensidad del viento en superficie sobre los océanos modifican los intercambios de gases traza en la interfase océano-atmósfera, y afectan a la emisión de partículas de sal marina en la capa límite atmosférica.

isopreno, un hidrocarburo biogénico liberado en grandes cantidades por la vegetación. Estas emisiones aumentan considerablemente con la temperatura de las hojas. Una vez liberado a la atmósfera, el isopreno se oxida, lo que contribuye a la formación de aerosoles orgánicos secundarios y, cuando el nivel de óxidos de nitrógeno es elevado, también a la producción de ozono. La mayor parte de los óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera se emiten como consecuencia de procesos de combustión.

De este modo, cabe esperar que el calentamiento climático aumente la emisión a la atmósfera de hidrocarburos biogénicos como el isopreno, lo que contribuirá a empeorar la calidad del aire a escala regional; se producirá de manera adicional ozono y aerosoles, lo que conllevará consecuencias directas sobre la salud y el cambio climático.

Un segundo ejemplo de interacción química entre el clima y la atmósfera puede percibirse en las emisiones de óxido nítrico por parte de bacterias presentes en el suelo terrestre; estas emisiones son sensibles a la temperatura y a la humedad del suelo, y pueden verse afectadas por el cambio climático. La multiplicación de los incendios forestales en las regiones donde las sequías son cada vez

Un ejemplo de interacciones del clima y de los sistemas químicos atmosféricos lo ofrece la acción del

otros se emplearon nueve modelos globales para evaluar cómo afectaría el cambio climático al ozono troposférico de cara al año 2030. Aunque los modelos presentan importantes diferencias, apuntan a que, en un clima más cálido, la concentración de ozono debería reducirse en la troposfera inferior conforme aumente la concentración de vapor de agua como consecuencia de una mayor evaporación en la superficie.

Al mismo tiempo, el ozono debería aumentar en las capas altas de la troposfera como resultado de una mayor entrada de dicho gas desde la estratosfera. A pesar de los últimos progresos alcanzados por medio de los estudios basados en estos modelos, aún no existen conclusiones en firme acerca de la magnitud de la retroalimentación entre el ozono y el clima, ni siquiera se sabe si es positiva o negativa. Asimismo, los cambios en la probabilidad de aparición de episodios relacionados con el ozono como consecuencia del cambio climático siguen siendo objeto de debate.

Los modelos acoplados químico-climáticos también han de tener en cuenta el papel de las partículas de aerosoles. El problema es complejo porque, aparte de los efectos de los aerosoles sulfatados, también hay que considerar el papel del hollín y de los aerosoles orgánicos. Estos últimos se producen en gran parte por la oxidación de gases orgánicos biogénicos, seguida por la condensación de moléculas orgánicas oxigenadas semivolátiles. Tal y como se ha señalado anteriormente, la vegetación libera una gran parte de componentes orgánicos gaseosos y las emisiones correspondientes presentan una fuerte dependencia de la temperatura. Por tanto, cabe esperar que el calentamiento climático origine un aumento de las emisiones de hidrocarburos biogénicos y, en consecuencia, derive en la producción de aerosoles orgánicos adicionales.

Los modelos climáticos modernos incluyen una representación simplificada de los procesos relacionados con los aerosoles, aunque estos distan mucho de aproximarse a la realidad a la hora de tratar dichos procesos y, concretamente, la formación de aerosoles orgánicos secundarios. El cambio climático afectará a las emisiones de los precursores de los

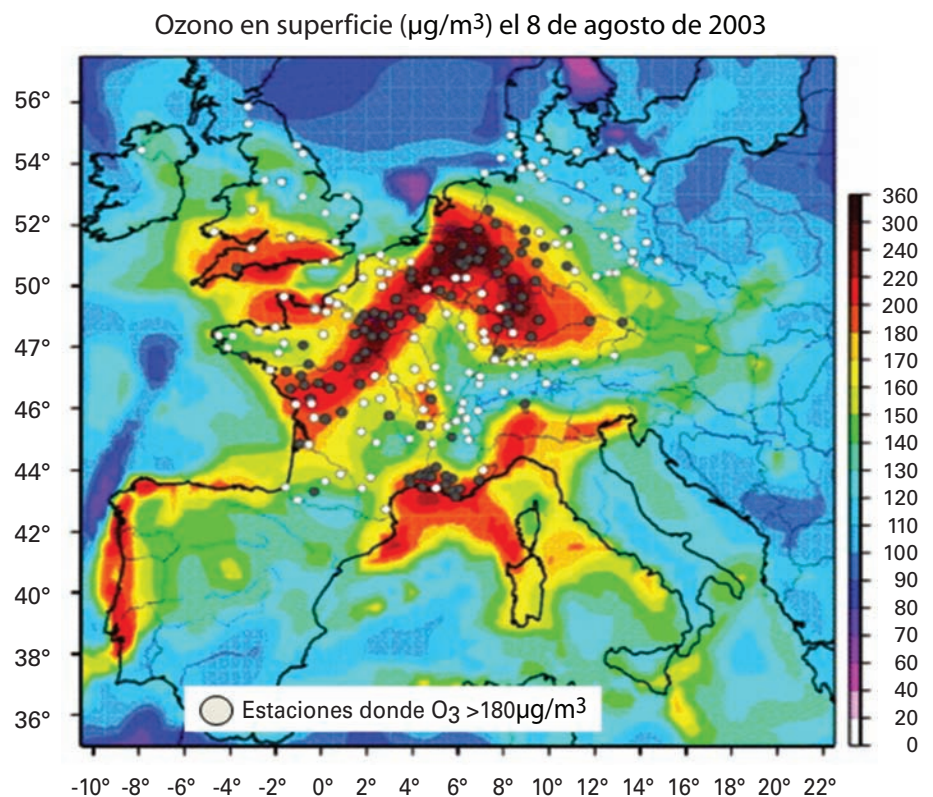


Figura 2 — Concentración de ozono en superficie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) el día 8 de agosto de 2003 (durante la ola de calor europea de 2003), calculada por Vautard y otros, 2005. Las estaciones que informaron de concentraciones de ozono superiores a $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aparecen indicadas (de Vautard y otros, 2005).

aerosoles, en particular, los compuestos orgánicos volátiles (COV) biogénicos. Las variaciones en el período e intensidad de los fenómenos climáticos como El Niño/Oscilación Austral (ENOA) en el Pacífico tropical afectarán a los regímenes de precipitación en diferentes partes del planeta. Durante los episodios de El Niño, en regiones como Indonesia, donde las precipitaciones desaparecen y la quema de biomasa es intensa, se intensifican las cantidades de partículas y las emisiones de gas.

Nuestro conocimiento en lo que respecta a los cambios en la calidad del aire a nivel mundial como consecuencia del cambio climático tiene aún muchas lagunas. Entre ellas, los posibles cambios que cabría esperar a partir de la modificación del transporte a grandes distancias, la ventilación de la capa límite y los intercambios a través de la tropopausa. Es preciso, asimismo, abordar mejor los posibles cambios a experimentar en las emisiones y deposiciones en superficie como consecuencia del cambio climático. Los estudios experimentales llevados a cabo en el laboratorio y sobre el terreno, así como los estudios efectuados a par-

tir de imágenes de satélite y modelos, ayudarán a resolver muchas de estas preguntas pendientes.

Efectos de las olas de calor sobre la calidad del aire a nivel regional

Las olas de calor ofrecen una forma de estimar cómo puede evolucionar la contaminación atmosférica en un escenario futuro de cambio climático. A este respecto, la ola de calor que tuvo lugar en Europa occidental y central en agosto de 2003 constituye un caso interesante sobre el que efectuar pruebas. Durante las dos primeras semanas del mes de agosto, la temperatura fue particularmente elevada en estas regiones de Europa, con máximas diarias que se situaban entre los 35 y los 40 °C en París, es decir, más de 10 °C por encima de la temperatura media climatológica para esta época del año. Se registraron tasas de mortalidad superiores en un 50 a 100% de la normal en muchos países de Europa. En total, se tuvo constancia de más de 30 000 muertes adicionales (15 000 en Francia, 5 000

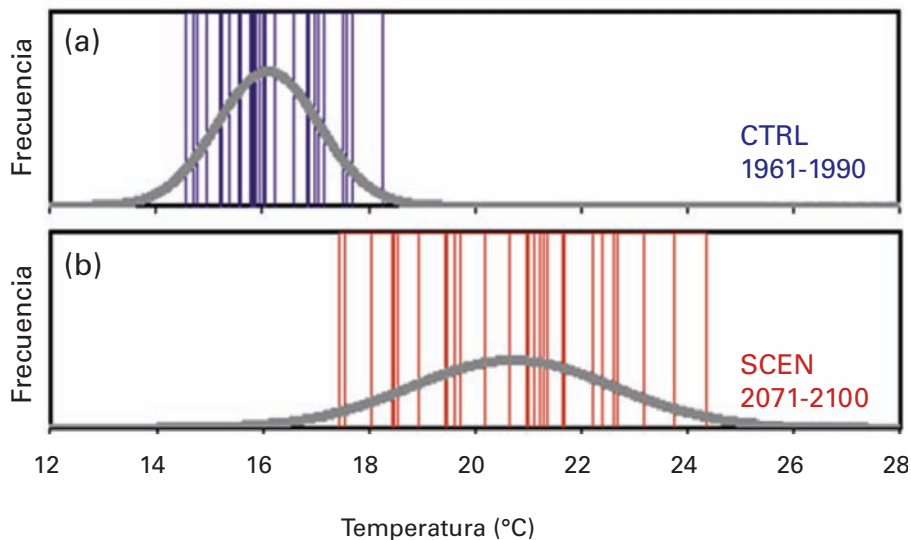


Figura 3 — Simulación a través del modelo climático de Schär y otros (2004) de la temperatura media y de su variabilidad en el norte de Suiza para los períodos 1961-1990 y 2071-2100 (escenario SRES A2), respectivamente. La probabilidad de que se produzcan olas de calor aumenta en el futuro.

en Alemania, 6 000 en España, 5 000 en Portugal y 5 000 en el Reino Unido) (Trigo y otros, 2005). Los daños a las cosechas, los deslizamientos asociados al deshielo de la tundra en latitudes elevadas, el brote de incendios forestales, etc., ocasionaron un importante daño a la economía.

Durante este período de temperaturas extraordinariamente elevadas, se registraron altos niveles de ozono producido de forma fotoquímica, sobre todo en la parte central de Francia y en el suroeste de Alemania. Así, por ejemplo, el 8 de agosto muchas estaciones informaron de concentraciones de ozono que superaban los $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nivel que se encuentra muy por encima de lo que se considera una calidad óptima del aire según las normas establecidas (véase la Figura 2). Se cree que cerca de un tercio de los fallecimientos registrados durante este período de tiempo estaban asociados a problemas de salud ocasionados por estas concentraciones excesivas de ozono.

Son muchos los factores que pueden explicar las elevadas concentraciones de ozono durante la ola de calor de agosto de 2003. En primer lugar, los aumentos de temperatura favorecieron la producción química de ozono en la troposfera. En segundo lugar, la baja humedad atmosférica redujo la destrucción de ozono, así como la producción del radical hidroxilo, que destruye muchos conta-

minantes atmosféricos, incluidos los precursores del ozono. En tercer lugar, la vegetación se vio afectada por las elevadas temperaturas y por la ausencia de precipitaciones, lo que condujo a una importante reducción en la eliminación por deposición seca del ozono y otros compuestos en la superficie de la Tierra. En cuarto lugar, la emisión de los precursores del ozono biogénico, como el isopreno, se vio notablemente fortalecida como consecuencia de las elevadas temperaturas. Se registraron incrementos del 60 al 100 por ciento en las emisiones de isopreno (Solberg y otros, 2008). Finalmente, una situación meteorológica estable, con cielos despejados y que se prolongó por espacio de dos semanas, propició unas condiciones favorables para la contención de agentes contaminantes en la capa límite y para la fotoquímica activa.

Además de estas condiciones locales, la sequía extrema que tuvo lugar en la parte meridional de Europa durante el mes de agosto favoreció la aparición de incendios forestales. Portugal, por ejemplo, fue testigo de una de sus peores temporadas de incendios. Hodzic y otros (2007) estimaron que se emitieron alrededor de 130 kilotonnes de partículas finas de aerosoles ($\text{PM}_{2,5}$) como consecuencia de los incendios en Europa durante el período de la ola de calor, lo que dio lugar a una concentración media en el suelo de partículas $\text{PM}_{2,5}$ de en-

tre el 20 y el 200% (hasta $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sobre el continente europeo. Estas minúsculas partículas de aerosoles, compuestas principalmente de materia orgánica y carbono negro, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio de los seres humanos y, por tanto, representan un importante riesgo para la salud. Hodzic y otros (2007) también confirmaron que la presencia de capas de humo elevadas sobre el continente europeo había alterado notablemente las propiedades radiativas de la atmósfera: los resultados de los modelos apuntaron a una reducción del 10 al 30% en los índices de fotólisis y a un incremento en el forzamiento radiativo de 10 a $35 \text{W}/\text{m}^2$ durante el período de fuerte influencia de los incendios a lo largo y ancho de gran parte de Europa.

Los episodios de contaminación atmosférica podrían tornarse más frecuentes e intensos en un escenario futuro de cambio climático. Los modelos climáticos muestran que la probabilidad de que se produzcan olas de calor podría aumentar de manera significativa durante el siglo actual. Los modelos empleados en Suiza apuntan, por ejemplo, a que la temperatura media del país no solo se incrementaría de forma notable, sino que la variación estándar de la temperatura se duplicaría a finales del siglo XXI (véase la Figura 3 y Schär y otros, 2004). Así pues, los veranos secos y calurosos serían más frecuentes y, por término medio, las olas de calor como la de 2003 podrían tener lugar en Europa una vez cada dos años. Los modelos globales (IPCC, 2007) muestran que la desviación típica en la temperatura y, en consecuencia, la probabilidad de que se produzcan olas de calor, aumentaría en muchas partes del mundo. Por tanto, cabría esperar la aparición de episodios de ozono más frecuentes, no solo en las regiones urbanizadas del hemisferio norte, sino también en los países emergentes (como China y Brasil), afectados ambos por la rápida industrialización y por una intensa combustión de biomasa. Aunque los países de Europa y de América del Norte traten de reducir las emisiones antropogénicas de contaminantes, la contaminación atmosférica podría volverse más resistente de lo esperado como consecuencia del cambio climático.

Conclusiones

En resumen, las elevadas concentraciones de ozono observadas en Europa durante la ola de calor de 2003 fueron consecuencia de una combinación de factores meteorológicos, químicos y biológicos. Es probable que estos episodios se produzcan con una mayor frecuencia en el futuro. Es necesario contar con una mejor comprensión de los vínculos existentes entre el clima, los ecosistemas y los ciclos biogeoquímicos, puesto que el acoplamiento entre estos sistemas afecta directamente a la calidad del aire.

Puesto que consideramos tanto los aspectos regionales como los globales de estas interacciones, resulta importante abordar la contaminación atmosférica desde una perspectiva centrada en el sistema de la Tierra. Los modelos del futuro tendrán que integrar procesos relacionados con:

- el clima físico, incluyendo la dinámica y la microfísica a todas las escalas;
- la química atmosférica (gases reactivos y partículas de aerosoles) y los ciclos biogeoquímicos (incluyendo los ciclos del carbono y del nitrógeno);
- los ecosistemas terrestres y los procesos hidrológicos (ecosistemas gestionados y no gestionados); y

- las interacciones de los sistemas naturales y sociales (energía, agricultura, sistemas costeros y otros sistemas humanos).

Uno de los desafíos intelectuales de cara al futuro no es solo comprender mejor el comportamiento de los diferentes componentes del sistema terrestre, sino desarrollar también una ciencia de acoplamiento, de tal forma que el destino de nuestro sistema planetario pueda simularse mejor a través de modelos numéricos integrales.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincera gratitud a Claire Granier, Alma Hodzic, Jean-François Lamarque y Christine Wiedinmyer, por su valiosa ayuda durante nuestras discusiones.

Referencias

BRASSEUR, G.P., M. SCHULTZ, C. GRANIER, M. SAUNOIS, T. DIEHL, M. BOTZET, E. ROECHNER and S. WALTERS, 2006: Impact of climate change on the future chemical composition of the global troposphere, *J. Climate*, 19, 3932-3951.

HODZIC, A., S. MADRONICH, B. BOHN, S. MASSIE, L. MENUT and C. WIEDINMYER, 2007: Wildfire particulate matter in Europe during summer 2003: Mesoscale modeling of smoke emissions, transport and radiative effects, *Atmos. Chem. and Phys.*, 7 (15), 4043-4064.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007: Climate Change 2007—The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment (S. SOLOMON, D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR and H.L. MILLER (Eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

SCHÄR, C., P.L. VIDALE, D. LÜTHI, C. FREI, C. HÄBERLI, M.A. LINIGER and C. APPENZELLER, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature*, 427, 332-336.

SOLLBERG, S., Ø. HOV, A. SVØDE, I.S.A. ISAKSEN, P. CODEVILLE, H. DE BACKER, C. FORSTER, Y. ORSILINI and K. UHSE, 2008: European surface ozone in the extreme summer 2003, *J. Geophys. Res.*, 113, D07307, doi: 10.1029/2007JD009098.

STEVENSON, D.S., F.J. DENTENER, M.G. SCHULTZ et al., 2006: Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 111, D8301, doi:10.1029/2005JD006338.

TRIGO, M.C., R. GARCÍA-HERRERA, J. DÍAZ, I.F. TRIGO and M.A. VALENTE, 2005: How exceptional was the early August 2003 heatwave in France?, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L10701, doi:10.1029/2005GL022410.

VAUTARD, R., C. HONORÉ, M. BEEKMANN and L. ROUIL, 2005: Simulation of ozone during the August 2003 heatwave and emission control scenarios, *Atmos. Environ.*, 39, 2957-2967.