

# PREDICCIONES OPERATIVAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA EN AEMET

Alberto Cansado Auría <sup>(1)</sup>, Juan Ramón Moreta González <sup>(1)</sup>, Jon Arrizabalaga Ibarzabal <sup>(1)</sup>, Isabel Martínez Marco <sup>(1)</sup>

(1) AEMET, Servicio de Modelización de la Calidad del Aire,  
C/Leonardo Prieto Castro 8, 28040 Madrid,  
e-mail: [acansadoa@aemet.es](mailto:acansadoa@aemet.es)

## 1. Introducción

Durante los últimos decenios, la contaminación atmosférica debida a actividades antropogénicas ha experimentado un creciente interés por parte de las autoridades sanitarias y relacionadas con el medio ambiente, así como entre los medios de comunicación y el público en general. Resulta conocido desde hace tiempo que las sustancias contaminantes emitidas a la atmósfera cuando se combinan con unas determinadas condiciones meteorológicas pueden dar lugar a situaciones en las que la salud, e incluso la vida, de las personas puede verse comprometida. Como ejemplo tenemos el episodio conocido como *the big smoke* o *the great smog* de Londres de diciembre de 1952. La niebla (smog) era tan densa que los autobuses apenas podían circular y eran escoltados por agentes de policía con linternas.

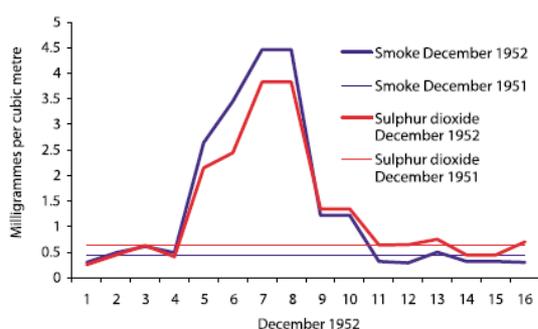


Fig. 1. Gráfica que muestra cómo aumentaron los niveles de partículas (smoke) y de SO<sub>2</sub> en 1952 frente a los niveles del año anterior. Fuente: London County Council. 1953.

Según los informes médicos esta niebla asesina en sólo 4 días (entre los días 5 y 9) acabó con la vida de más de 4000 personas, aunque algunas estimaciones más recientes elevan esta cifra a más de 12000. También se habla de más de 100000 afectados con enfermedades serias del sistema respiratorio.

Las gráficas de mortalidad muestran un pico en los decesos coincidente con el episodio de elevada contaminación por smog. Las causas de las muertes de acuerdo con los registros de las autopsias realizadas concluyen que la mayoría fueron causadas por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

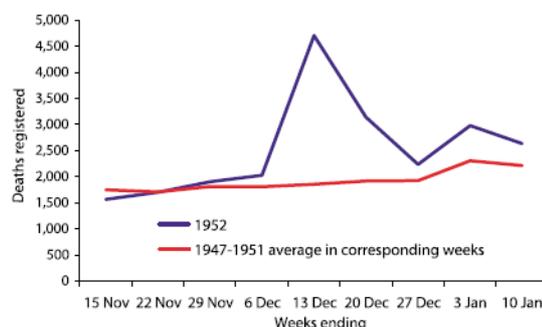


Fig. 2. Muertes semanales registradas en Londres durante el episodio de 1952 y las semanas siguientes (azul) frente al promedio del periodo 1947-1951 (rojo). Fuente: Ministry of Health. 1954.

Se considera que éste ha sido el episodio de contaminación más grave de la historia del Reino Unido, y marcó un hito puesto que dió lugar a una legislación medioambiental pionera con medidas para reducir la contaminación atmosférica: la llamada *Clean Air Act* de 1956.

Episodios como *the great smog* mostraron que la contaminación del aire podía llegar a convertirse en un problema de salud pública de primera magnitud.

La Unión Europea siempre se ha mostrado preocupada por la calidad del aire en nuestro continente. En la década pasada la Comisión Europea puso en marcha el programa CAFE (*Clean Air For Europe*) que intenta analizar el impacto que la contaminación atmosférica tiene en la salud de las personas y reducirlo promoviendo las medidas legislativas necesarias para ello. Para ello ha encargado la realización de estudios cuyas conclusiones son sorprendentes desde el punto de vista de que son capaces de cuantificar el impacto en

pérdida de esperanza de vida por la exposición de la población a determinados contaminantes como el material particulado menor de 2.5  $\mu\text{m}$  y ponen de manifiesto que el impacto es mayor de lo que, a priori, podríamos pensar. (Ver Fig. 3)

Loss in life expectancy attributable to exposure to fine particulate matter - 2000

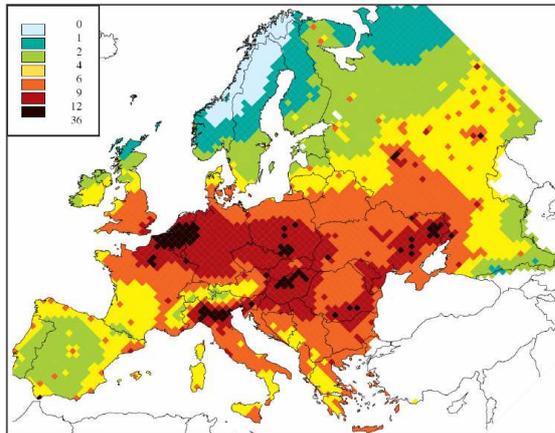


Fig. 3. Reducción de esperanza de vida (en meses) atribuible a la exposición de los ciudadanos europeos a material particulado menor de 2.5  $\mu\text{m}$ .

En cuanto a legislación sobre contaminación atmosférica en España podemos citar la Ley 38/1972 de protección del ambiente atmosférico. En su momento fue una legislación innovadora y, junto al amplio desarrollo reglamentario posterior, constituyó, hasta 2007, el marco en el que se inscribían todas las medidas para el control de la contaminación atmosférica en España.

Junto a la legislación propia, a partir de 1986, momento en el que España se incorpora a la Unión Europea, se fueron transponiendo a la legislación nacional las numerosas directivas europeas en materias relacionadas con la calidad del aire que se han venido desarrollando desde los años 60, así como los tratados internacionales relacionados firmados por nuestro país, como el Protocolo de Montreal (1987) para la protección de la capa de ozono o el Protocolo de Kyoto (1997) para combatir el cambio climático.

En el año 2007 se aprueba la Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera, que es la que actualmente se encuentra en vigor. Se trata de una ley más moderna, diseñada para dar respuesta a nuevos problemas y retos que han surgido desde la aprobación de la anterior Ley y con una flexibilidad que permite adaptarse a nuevas necesidades conforme estas vayan apareciendo o trasponer normas europeas.

## 2.- La calidad del aire en AEMET

La Agencia Estatal de Meteorología surge en el marco de la Ley 28/2006 de Agencias Estatales. En la disposición adicional tercera de la misma se prevé, entre otras, la creación de la Agencia Estatal de Meteorología.

El 14 de febrero de 2008 se publica el Estatuto de la Agencia Estatal de Meteorología, con lo que desapareció el Instituto Nacional de Meteorología y sus funciones son heredadas por la nueva Agencia. Entre las competencias y funciones que, de acuerdo con su Estatuto, aprobado por RD 186/2008 de 14 de febrero de 2008, tiene la Agencia Estatal de Meteorología se encuentra: "El mantenimiento de una vigilancia continua, eficaz y sostenible de las condiciones meteorológicas, climáticas y de la estructura y composición física y química de la atmósfera sobre el territorio nacional".

Esta misión de mantenimiento de una vigilancia de la composición química de la atmósfera resultó novedosa desde el punto de vista de las funciones que hasta ese momento venía realizando el antiguo Instituto Nacional de Meteorología. Sin embargo, es cierto que en los últimos años, la preocupación por los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de las personas ha sido creciente tanto a nivel político como a nivel ciudadano y esto se ha traducido en legislaciones más restrictivas para los niveles de contaminantes presentes en superficie a nivel europeo, nacional y autonómico y que la población desee conocer los datos precisos de su exposición a especies químicas contaminantes o niveles de material particulado.

También es cierto que, aunque la misión de monitorizar y predecir el estado químico de la atmósfera no ha sido una misión tradicional de los servicios meteorológicos nacionales, durante los últimos años se ha venido incluyendo la predicción de "tiempo químico" entre los productos que proporcionan los servicios meteorológicos nacionales de países de nuestro entorno.

A este respecto, el antiguo INM ya había iniciado algunos contactos para intentar llegar a algún acuerdo para la utilización de un modelo de transporte químico. Se establecieron en 2007 conversaciones con Météo-France que finalmente fructificaron en el acuerdo de colaboración entre AEMET y Météo-France en virtud del cual Météo-France cede el modelo de transporte químico MOCAGE para su utilización en predicciones operativas, de seguridad para los bienes y personas y fines de investigación en AEMET.

Igualmente el INM, por aquel momento, ya había recuperado la gestión de la red de observación de contaminación de fondo EMEP/VAG. Los datos de

esta red están disponibles en la página web de AEMET <http://www.aemet.es> en tiempo real, así como estadísticas mensuales.

También la observación de parámetros relacionados con la radiación solar, ozono total en columna y aerosoles había sido impulsada durante la segunda mitad de la pasada década con la instalación de una red de fotómetros solares CIMEL y el desarrollo de software para el análisis de los datos recogidos por la red radiométrica nacional y la red de espectrofotómetros BREWER, su análisis en tiempo real y publicación inmediata, inicialmente en la página web interna de AEMET y posteriormente en la web externa a disposición de todos los ciudadanos.

Finalmente, y en relación con la calidad del aire, cabe destacar que el apoyo a las políticas medioambientales y de seguridad del Gobierno de España figura explícitamente como uno de los objetivos estratégicos de la Agencia Estatal de Meteorología.

### 3. Descripción del modelo MOCAGE

La herramienta para realizar predicciones de composición de la atmósfera son los llamados modelos de transporte químico. El modelo de transporte químico utilizado en AEMET es MOCAGE (MOdèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle). MOCAGE es un modelo tridimensional global a  $2^\circ \times 2^\circ$ , con capacidad para trabajar con hasta 3 dominios anidados adicionales (Dufour et al, 2003). El modelo tiene 47 niveles verticales. La coordenada vertical es híbrida ( $\sigma, P$ ). La primera capa tiene un espesor de alrededor de 40 m. Los pasos de tiempo son de 1 hora para la advección y de 15 minutos para los procesos subrejilla.

MOCAGE, además, puede ser utilizado como herramienta para el estudio de la dispersión de materiales pasivos y radioactivos. Esto nos permite utilizar el modelo MOCAGE como herramienta para atender emergencias. Como se ha mencionado MOCAGE ha sido desarrollado por MeteoFrance. Una descripción detallada de las principales características del modelo puede encontrarse en Josse et al (2004).

Las principales características de MOCAGE son las siguientes:

- Su dominio vertical se extiende desde el suelo hasta la estratosfera ( $\sim 5\text{hPa}$ ). De esta forma es posible simular fenómenos como la formación y evolución de los procesos de adelgazamiento de la capa de ozono (el conocido como agujero de ozono) sobre la

Antártida al comienzo de cada primavera austral.

- Puede ser utilizado para integraciones largas en modo climático (aunque este modo no ha sido probado en AEMET).
- Al ser un modelo global genera sus propias condiciones de contorno, lo que evita incoherencias entre diferentes modelos.
- MOCAGE funciona en AEMET como un modelo off-line. La dinámica está gobernada por predicciones meteorológicas de modelos de predicción numérica del tiempo (IFS/ECMWF, ARPEGE and HIRLAM) que MOCAGE utiliza como datos de entrada.
- Posibilidad de asimilación variacional de datos: 3DVAR y 4DVAR.
- Esquema de advección semilagrangiana (Williamson and Rasch, 1989)
- Difusión turbulenta de Louis (Louis, 1979)
- Esquemas de convección de Tiedtke o de Kain-Fritsch-Bechtold (Bechtold et al, 2001)
- Deposición seca de Wesely (Wesely, 1989)
- Tratamiento separado de la deposición húmeda para precipitación convectiva y de gran escala.

El esquema químico utilizado se denomina RACMOBUS. RACMOBUS es una fusión del esquema de química troposférica RACM (Stockwell et al, 1997) y del esquema de química estratosférica REPROBUS (Lefèvre et al, 1994). El esquema RACMOBUS comprende 119 especies y 372 reacciones químicas.

Es un modelo que tiene una resolución vertical muy buena (47 niveles híbridos) comparada con los estándares de los modelos de transporte químico. Posee más de 20 niveles en la estratosfera y alrededor de 7 dentro de la capa límite planetaria. Esto, junto al esquema químico utilizado, le permite una descripción correcta de procesos que se producen tanto próximos a la superficie como a nivel de la estratosfera.

En cuanto a las emisiones, MOCAGE puede utilizar diferentes inventarios de emisiones dependiendo del dominio espacial (global, regional, alta resolución) en el que nos encontremos. En cualquier caso, las emisiones son un punto clave en los resultados obtenidos por los modelos de transporte químico, por lo que estos deben ser elegidos de forma cuidadosa y estar lo más actualizados posible.

#### 4.- La configuración operativa de MOCAGE en AEMET

Una vez vistas las características más importantes del modelo de transporte químico utilizado en AEMET para realizar las predicciones de tiempo químico, vamos a describir la configuración operativa de MOCAGE.

Dicha configuración operativa en AEMET consta de un dominio global a 2° de resolución horizontal sobre el que se anida un dominio europeo a 0.5° y finalmente un dominio peninsular a 0.1°. Las islas Canarias no están todavía incluídas en el dominio de mayor resolución.

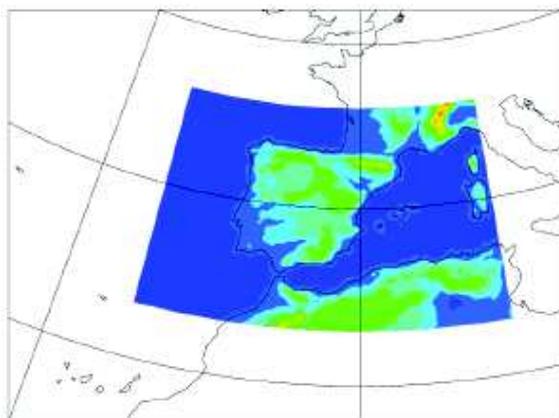
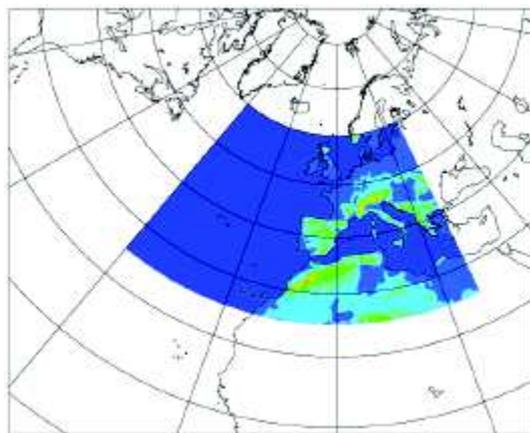


Fig. 4. Dominios europeo (0.5°) y peninsular (0.1°) de la configuración operativa de MOCAGE en AEMET. Al modelo global a 2° se anida el continental a 0.5°. Al continental se anida el peninsular a 0.1°.

Los forzamientos meteorológicos globales provienen del modelo IFS del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF) y de ARPEGE de Météo-France (superficiales). Los forzamientos para los dominios de 0.5° y 0.1°, tanto en superficie como en altura, provienen del modelo HIRLAM HNR de AEMET de 0.05° para el dominio peninsular (0.1°) y del HIRLAM ONR de AEMET de 0.16° para el dominio europeo (0.5°).

Las emisiones utilizadas sobre tierra en el dominio de mayor resolución (0.1°) son las generadas por la empresa holandesa TNO para el proyecto GEMS con una resolución nativa de 0,125° x 0,0625°. Sobre mar y para el resto de los dominios se han utilizado las emisiones EMEP de 50 km de resolución y del IPCC.

MOCAGE, siendo un modelo global, tiene la ventaja de no necesitar condiciones de contorno laterales. La información para cada dominio anidado proviene de aquel sobre el que se anida. MOCAGE funciona como modelo off-line, lo que implica que necesitamos introducir en el modelo forzamientos meteorológicos. Esencialmente son información de viento, temperatura, humedad en todos los niveles y de presión en superficie. Esta información genera ficheros de forzamientos en altura trihorarios que constituyen datos de entrada de MOCAGE (FM). Además se incluye información de parámetros de superficie en los ficheros diarios (1 al día) de forzamientos superficiales (SM) que contienen datos como el albedo, características del suelo (espesor del suelo, proporción de arena o arcilla,...), tipo de vegetación dominante o rugosidad entre otros. Adicionalmente son necesarias las velocidades de deposición de las especies consideradas, que son calculadas en el software que construye los ficheros de entrada con la información de superficie y son incluídas en estos mismos ficheros. Igualmente, las emisiones válidas para el día son generadas e incluídas en el fichero que contiene los forzamientos superficiales (SM).

Desde el mes de noviembre de 2011, MOCAGE se ejecuta operativamente en AEMET 2 veces al día con forzamientos de la pasada de 12 y de 00 UTC, con el mismo periodo de predicción. El alcance actualmente es de 24 horas.

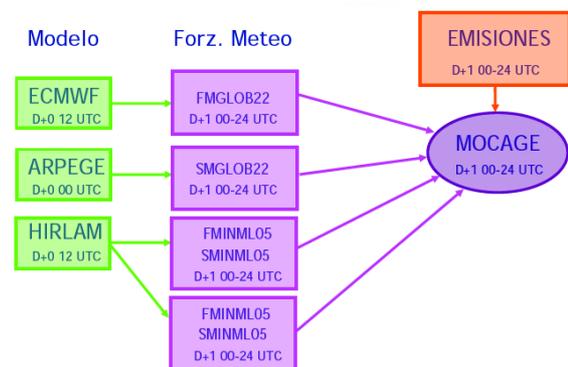


Fig. 5a. Esquema de la primera pasada de MOCAGE con datos de las 12 UTC de IFS y HIRLAM (00 D ARPEGE). La pasada está disponible en torno a las 19 h UTC.

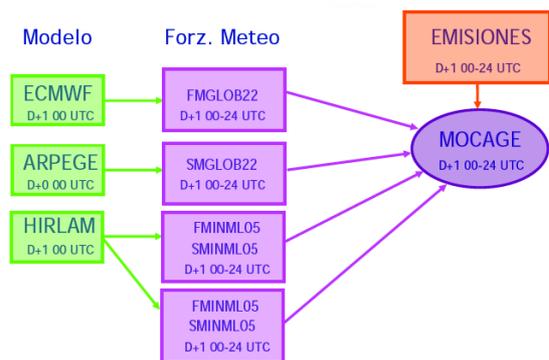


Fig. 5b. Esquema de la segunda pasada (actualización) de MOCAGE con datos de las 00 UTC de IFS y HIRLAM (00 D-1 ARPEGE). La pasada está disponible en torno a las 07 h UTC.

El propósito de realizar dos pasadas con el mismo periodo de predicción es utilizar unos forzamientos meteorológicos más actualizados. Sin embargo, las emisiones y los forzamientos de superficie globales son exactamente los mismos en los dos casos. La actualización tiene un alcance útil de sólo 17 horas, ya que el alcance de la predicción de 24 horas está limitado por la hora a la que está disponible (sobre las 07 h aproximadamente)

En cuanto a las limitaciones en la predicción tenemos dos principalmente: La principal es el tiempo de cálculo de MOCAGE en el ordenador de AEMET. Una predicción de 24 h viene a tardar algo menos de 2h. En tanto no dispongamos de mayores recursos de supercomputación en AEMET esta limitación será bastante importante. Por otra parte HIRLAM HNR tiene un alcance de 36 h. Dado que nuestros forzamientos meteorológicos del dominio peninsular a 0.1° provienen de la pasada HNR de HIRLAM, esto nos limitará a un alcance máximo teórico de 36 h.

Los resultados son publicados en la página web de AEMET (<http://www.aemet.es>) para las especies siguientes: NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO en el nivel de superficie, así como el Total de Ozono en Columna (TOC).

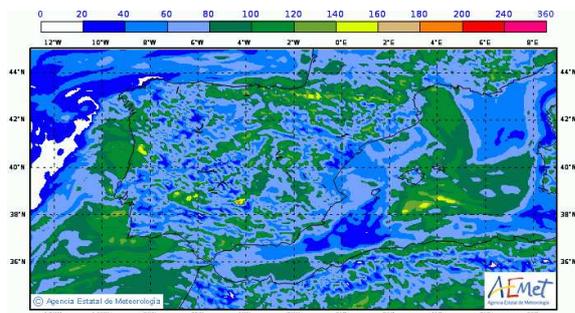


Fig. 6 Predicción H+18 para O<sub>3</sub> en superficie, tal y como se publica en la página web externa de AEMET.

En la figura 6 se presenta un ejemplo de salida de predicción de calidad del aire. En este caso es un H+18 para el ozono en superficie.

Entre los problemas observados se encuentra que el inventario de emisiones de alta resolución (GEMS-TNO) utilizado data de 2003. Esto hace que no se recojan en él de forma adecuada los descensos en la emisión de ciertas especies químicas a la atmósfera en nuestro país, algunos de los cuales han sido especialmente notables, como es el caso del dióxido de azufre. En consecuencia, se sigue trabajando para poder utilizar un inventario de emisiones actualizado que recoja de la forma más fiel posible la situación actual y permita realizar predicciones de “tiempo químico” más precisas.

### Conclusiones

La Agencia Estatal de Meteorología, desde su fundación en 2008 ha integrado entre sus funciones la monitorización de la composición química de la atmósfera, recogiendo el impulso que ya en los últimos años del antiguo Instituto Nacional de Meteorología se había dado a este campo.

AEMET ha puesto en operación el modelo MOCAGE y genera predicciones de tiempo químico que se publican diariamente a través de su página web.

Se continúa trabajando para poder proporcionar un producto cada vez de mayor calidad y fiabilidad, dentro de las capacidades operativas de AEMET.

### Agradecimientos

A Météo-France por su apoyo, que ha sido fundamental para lograr poner en operación el modelo MOCAGE en AEMET y especialmente a Vincent-Henri Peuch y Béatrice Josse.

A las personas de AEMET que creyeron que para conseguir un servicio meteorológico moderno y que no quedara atrás respecto al resto de SMNs era necesario dar un paso adelante e iniciar esta nueva línea de trabajo: Beatriz Navascués y Antonio Labajo.

A los que después han continuado apoyando y trabajando para que siguiera adelante: José Antonio García-Moya.

A todos los que, de una manera u otra, han colaborado con nosotros.

### Referencias

Bechtold, P., Bazile, E., Guichard, F., Mascart, P and Richard, E. (2001), A mass flux convection scheme for regional and global models. Q.J.R. Meteorol. Soc., 127, 869-886.

Dufour, A., Amodei, M., Ancellet, G. and Peuch, V.-H. (2005), Observed and modelled “chemical weather” during ESCOMPTE. Atmos. Res. 74, 161-189.

Josse, B., Simon, P. and Peuch, V.-H. (2004), Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE. Tellus B, 56: 339-356.  
doi: 10.1111/j.1600-0889.2004.00112.x

Lefèvre, F., Brasseur, G.P., Folkens, I., Smith, A.K., Simon, P. (1994), Chemistry of the 1991-1992 stratospheric winter: three-dimensional model simulations. J. Geophys. Res. 99 (D4), 8183-8195.

Stockwell, W.R., Kirchner, F., Khun, M., Seefeld, S. (1997) , A new mechanism for regional atmospheric chemistry modelling. J. Geophys. Res., 102, 25,847-25,879

Visschedijk, A.J.H., Zandveld, P.Y.J., Denier van der Gon, H.A.C. (2007), A High Resolution Gridded European Emission Database for the EU Integrate Project GEMS. TNO-report 2007-A-R0233/B, Apeldoorn, The Netherlands.

Wesely, M. L. (1989), Parameterizations of surface resistance to gaseous dry deposition in regional-scale, numerical models, Atmos. Environ., 23, 1293-1304.

Williamson, D.L. And Rasch, P.J., (1989), Two-dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation. Monthly Weather Rev. 117, 102-129.

Greater London Authority (2002). 50 years on: The struggle for air quality in London since the great smog on December 1952. Published by Greater London Authority.

Información sobre el big smoke de 1952 en Londres puede obtenerse, por ejemplo, en:  
<http://www.metoffice.gov.uk/education/teens/case-studies/great-smog>