

El modelo MOCAGE

PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SIMULACIÓN DE NUBES TÓXICAS

ISABEL MARTÍNEZ MARCO, ALBERTO CANSADO AURÍA, MARÍA ALLÚE CAMACHO, JUAN RAMÓN MORETA GONZÁLEZ, ESTHER LÓPEZ SANCHÉZ, JON ARRIZABALAGA IBARZABAL

AEMET, MADRID

La Agencia Estatal de Meteorología tiene entre las competencias y funciones que le asigna su Estatuto, aprobado por RD 186/2008 de 14 de febrero de 2008: "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 y esto se ha traducido en legislaciones más restrictivas para los niveles de contaminantes presentes en superficie a nivel europeo, nacional y autonómico.

AEMET llegó a un acuerdo de colaboración con Météo-France para la utilización del modelo de transporte químico MOCAGE para predicciones operativas y de seguridad para los bienes y personas y para fines de investigación.

1. INTRODUCCIÓN

MOCAGE (*Modélisation de la Chimie Atmosphérique Grande Echelle*) (Josse et al., 2004) es un modelo tridimensional de transporte y química atmosférica desarrollado por Météo-France, de reconocido prestigio, y cuyo uso ha sido cedido a AEMET a través de un acuerdo de colaboración entre ambas instituciones, tanto para investigación como para aplicaciones operacionales en el campo medioambiental.

MOCAGE es un modelo de transporte químico que proporciona simulaciones numéricas de las interacciones entre los procesos dinámicos, físicos y químicos en la atmósfera (troposfera y baja estratosfera). En concreto simula la evolución de las especies químicas en la atmósfera debido a los fenómenos de transporte (advección, difusión turbulenta y convección), a las transformaciones químicas que puedan sufrir y a su eliminación por mecanismos de deposición seca y húmeda o por decaimiento radiactivo.

MOCAGE presenta la posibilidad de poder ser ejecutado en modo *on-line*, acoplado de forma interactiva a un modelo de circulación general para obtener directamente los campos meteorológicos, de uso por ejemplo en estudios climáticos. También puede usarse en modo *off-line*, opción implementada en AEMET, en la cual es forzado externamente por los campos generados por un modelo meteorológico ejecutado independientemente (ECMWF, HIRLAM, ARPEGE,...).

Por último, es importante mencionar la incertidumbre asociada a estas predicciones debida a factores tales como la necesidad de disponer de datos reales para inicializar el modelo, la disposición de un inventario actualizado o la complejidad de la interacción de los procesos químicos con los procesos físicos de la atmósfera, etc. Como consecuencia, en su versión actual, las salidas de estos modelos son representativas de fenómenos a gran escala y pierden precisión conforme descienden a nivel local. No son por tanto válidos para determinar una posible superación de los valores legislados pero sí contribuyen a conocer mejor la previsión en términos cualitativos.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

MOCAGE es un modelo global con la opción de hasta tres niveles de anidamiento, lo cual permite que se pueda ejecutar al mismo tiempo para varios dominios, cada vez más reducidos pero con una mayor resolución espacial. Este modelo proporciona simulaciones numéricas de las interacciones entre los procesos dinámicos, físicos y químicos en la troposfera y la estratosfera, tanto para gases como para aerosoles. Tiene una resolución vertical de 47 niveles híbridos que se extienden desde la superficie hasta 0.1hPa (aproximadamente 60Km), con 8 niveles por debajo de 2km, siendo el espesor de la capa más cercana al suelo de 40 metros (ver Figura 1).

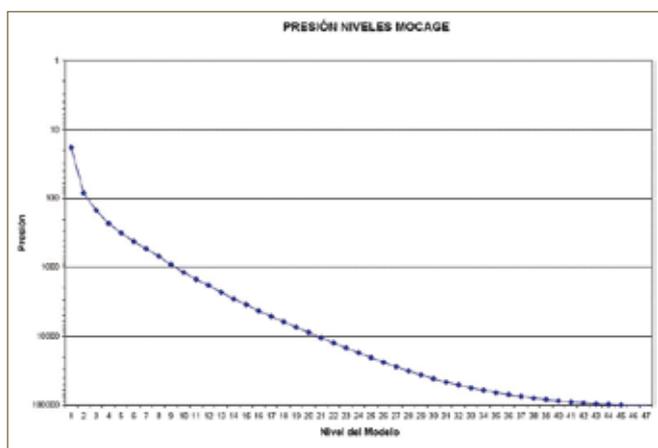


Figura 1. Distribución vertical de los 47 niveles híbridos usados en MOCAGE.

El esquema químico usado es RACMOBUS que comprende 119 especies y 372 reacciones y fotólisis. Este esquema es una combinación del esquema de RACM para la química troposférica (Stockwell et al., 1997) y el esquema REPROBUS (Lefèvre et al., 1994) para las reacciones relativas a la química estratosférica.

Las parametrizaciones físicas de MOCAGE comprenden los siguientes esquemas relativos a procesos físicos: esquema de advección semi-lagrangiano (Williamson y Rash, 1989), difusión turbulenta mediante el esquema de difusión de Louis (Louis, 1979) y procesos convectivos mediante el esquema KFB (Kain-Fritsch-Bechtold) (Bechtold et al., 2001).

También incluye los procesos de eliminación de especies químicas siguiendo el esquema de Wesely para deposiciones secas, basado en un método de resistencias superficiales (Wesely, 1989), y procesos de deposición y eliminación húmeda, tanto para nubes convectivas (Mari et al., 2000) como para nubes estratiformes (Giorgi y Chameides, 1986).

El inventario de emisiones es un punto crucial a la hora de calcular predicciones de calidad del aire. Las emisiones de los componentes químicos se estiman mediante el inventario de emisiones global del IPCC / EMEP con una resolución de 50km, y con el inventario de GEMS-TNO, generado por la empresa holandesa TNO para el proyecto europeo GEMS (precursor del actual proyecto MACC) para la zona continental europea con una resolución horizontal aproximada de 7km, estimando en ambos casos emisiones únicamente en superficie. Las especies químicas consideradas son CH₄ (metano), CO (monóxido de carbono), NH₃ (amoníaco), NO_x (óxidos de nitrógeno), SO₂ (dióxido de azufre) y los NMVOC (Compuestos Orgánicos Volátiles No-Metánicos). Debido a la disminución de las emisiones de las diferentes especies químicas en los últimos años, este inventario puede producir una sobrestimación en la predicción de la calidad del aire.

Las concentraciones de los componentes químicos en las condiciones iniciales se obtienen a partir de las predicciones

a H+24 generadas por el propio modelo en la pasada del día anterior, aunque cabe mencionar que el modelo dispone de la posibilidad de incluir la asimilación de datos para esta inicialización de los datos químicos. Esta opción no se encuentra implementada en AEMET actualmente.

3. PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN AEMET

La configuración desarrollada en AEMET consiste en el uso de MOCAGE como modelo global con una resolución de 2° (alrededor de 200km en nuestras latitudes), dominio Global, con forzamientos dinámicos provenientes de las salidas del modelo del ECMWF (para forzamientos en altura) y forzamientos en superficie del modelo ARPEGE de Météo-France.

Anidado al anterior, se ejecuta una segunda configuración correspondiente a un dominio denominado Continental (ver Figura 2) que abarca gran parte de Europa y parte del Atlántico Norte (40W-26E, 24N-60N), con una resolución de 0,5° (~50km), usando como forzamientos dinámicos las salidas del modelo HIRLAM ONR de AEMET que corre a una resolución de 0,16° (~16km).

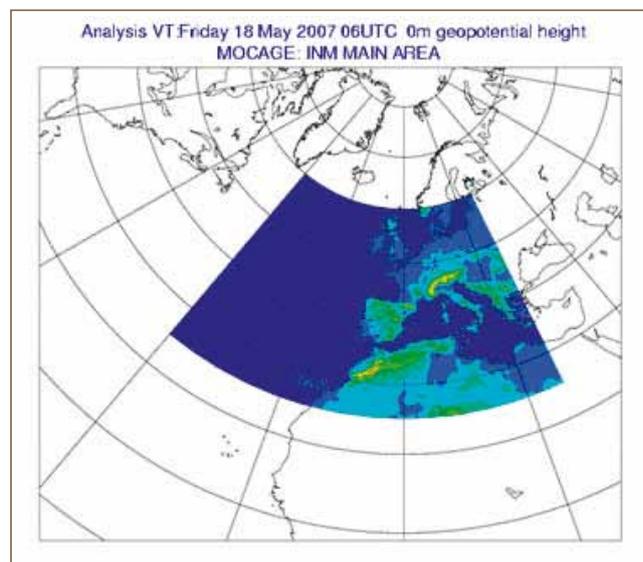


Figura 2. Dominio Continental de 0,5° usado para el modelo MOCAGE en AEMET

Por último, anidado al anterior dominio, se ejecuta una tercera configuración correspondiente a un dominio denominado Regional (ver Figura 3) que abarca la Península Ibérica (15W-10E, 33N-46N), con una resolución de 0,1° (~10km). Para este dominio, los forzamientos dinámicos provienen de las salidas numéricas del modelo HIRLAM HRN de AEMET, con una resolución de 0,05° (~5km).

Esta última configuración es la que se utiliza para la elaboración de los mapas de pronóstico de calidad del aire que

El modelo MOCAGE

PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SIMULACIÓN DE NUBES TÓXICAS

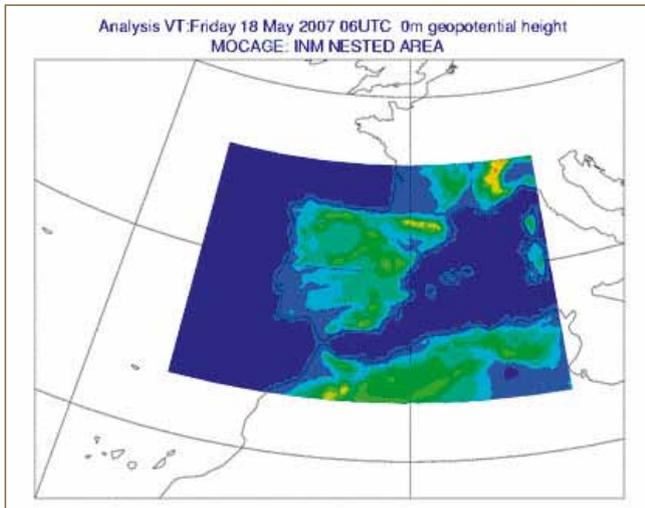


Figura 3. Dominio Regional de 0,1º usado para el modelo MOCAGE en AEMET

se publica en la página web de AEMET (http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/calidad_del_aire).

No se ha desarrollado una versión operativa del modelo MOCAGE equivalente que cubra las Islas Canarias porque no existe un inventario de emisiones sobre Canarias con la adecuada calidad y resolución espacial. Los inventarios de emisiones son un factor capital en la bondad de las predicciones de un modelo de composición química de la atmósfera. Se procederá a poner en marcha un sistema similar al actual, particularizado para las Islas Canarias, cuando exista un inventario de emisiones de la debida resolución horizontal.

Los productos generados, a partir del modelo MOCAGE que están disponibles en la página web de AEMET, corresponden a la configuración del dominio Regional (resolución 0,1º) y se ejecuta diariamente para la pasada de las 00 UTC, con un alcance de hasta 24 horas, generando sali-

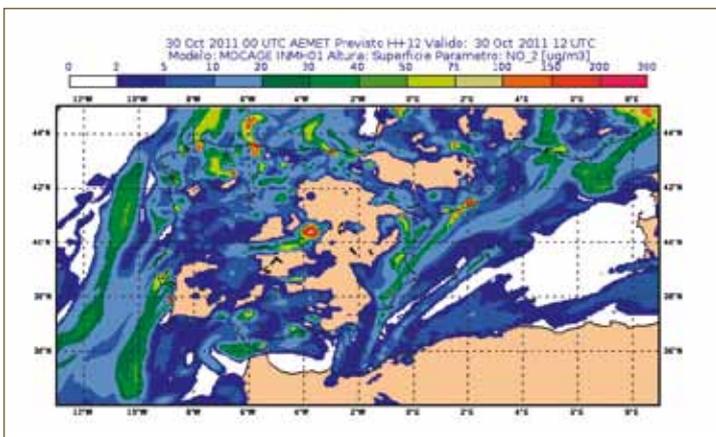


Figura 4. Concentraciones previstas en superficie de NO₂ (µg/m³) generados por MOCAGE en el dominio Regional para el día 30 de octubre de 2011 a las 12:00 UTC.

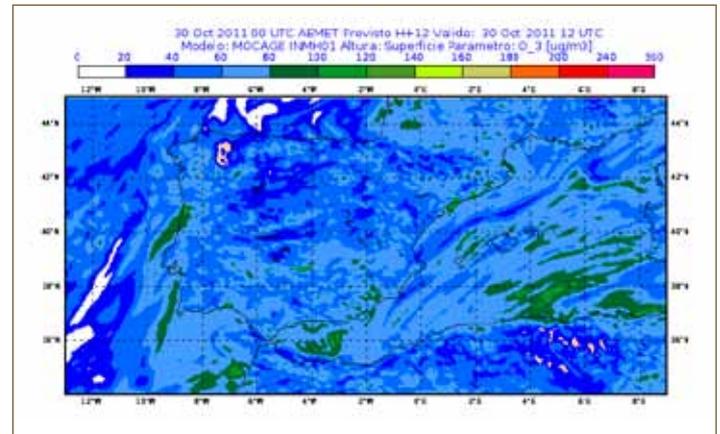


Figura 5. Concentraciones previstas en superficie de O₃ (µg/m³) generados por MOCAGE en el dominio Regional para el día 30 de octubre de 2011 a las 12:00 UTC.

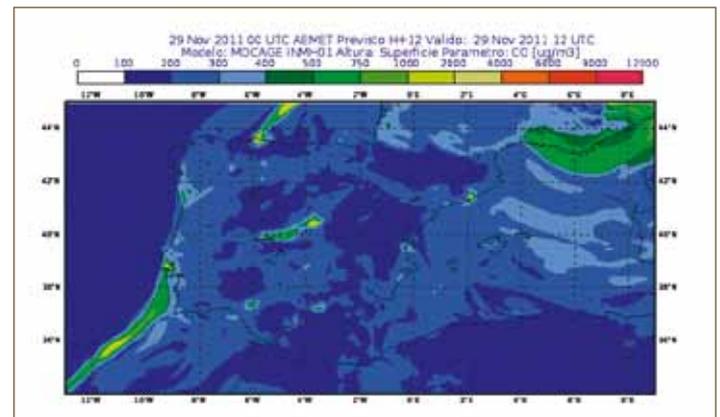


Figura 6. Concentraciones previstas en superficie de CO (µg/m³) generados por MOCAGE en el dominio Regional para el día 29 de noviembre de 2011 a las 12:00 UTC.

das gráficas horarias de las concentraciones en superficie de NO₂ (dióxido de nitrógeno), O₃ (ozono) y CO (monóxido de carbono) expresadas en µg/m³, así como del contenido total de la columna de O₃ expresado en Unidades Dobson.

En las figuras 4 a 7 se muestran las salidas gráficas generadas por el modelo MOCAGE y que se publican diariamente en la web externa de AEMET para cada una de las especies mencionadas anteriormente.

Adicionalmente, dentro de los trabajos de desarrollo y mejora del modelo de calidad del aire, desde AEMET se realiza una verificación diaria casi en tiempo real de estas predicciones frente a los datos de contaminación obtenidos por la Red EMEP/VAG/CAMP (13 estaciones), estando en curso la ampliación de esta verificación a un mayor número de estaciones, pertenecientes a diferentes instituciones y organismos, repartidas por todo el territorio del estado español y que permitirá una mejor comprensión del funcionamiento del modelo.

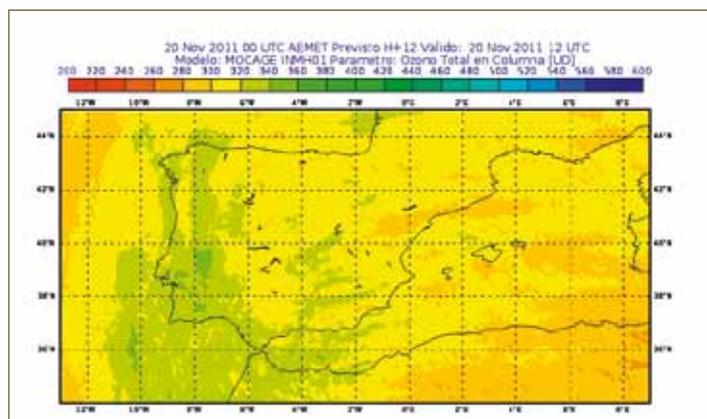


Figura 7. Previsión del contenido total de O_3 en columna (Unidades Dobson) generado por MOCAGE en el dominio Regional para el día 20 de noviembre de 2011 a las 12:00 UTC.

4. MOCAGE EN MODO ACCIDENTE: SIMULACIÓN DE NUBES TÓXICAS

En AEMET funciona una versión de MOCAGE en la que los módulos de química están desactivados. En dicha versión MOCAGE trabaja como un modelo de dispersión atmosférica y se utiliza principalmente en situaciones de emergencia por emisión accidental de material pasivo o radiactivo a la atmósfera en las que es necesario hacer un seguimiento de la nube de contaminante generada.

El objetivo es dar respuesta, en este tipo de situaciones, a los organismos e instituciones de la Administración del Estado o de las Comunidades Autónomas que la necesiten, aunque en muchos casos (cenizas volcánicas o emisiones de material radiactivo a la atmósfera), a nivel mundial, existen unos protocolos de actuación coordinados por la OMM y los Organismos Internacionales responsables, que incluyen la distribución de productos derivados de modelos de dispersión atmosférica por parte de determinados Servicios Meteorológicos designados al efecto.

MOCAGE en modo ACCIDENTE funciona con el módulo de química desactivado, teniendo en cuenta únicamente los

mecanismos de transporte, las deposiciones y, en su caso, el decaimiento radiactivo. No se tiene en cuenta información sobre emisiones superficiales continuas a la atmósfera sino únicamente la relativa a un número de fuentes puntuales (hasta diez), considerándose que el material emitido se distribuye uniformemente entre dos niveles verticales por encima de cada fuente.

Las concentraciones resultantes se pueden proporcionar en distintas unidades. Es frecuente que en accidentes con emisión de contaminante a la atmósfera se desconozcan las tasas reales de emisión de las fuentes simuladas. En estos casos, se utilizan tasas estándar y las concentraciones se proporcionan en términos relativos a un cierto valor de referencia, tratándose de una información cualitativa.

Desde su puesta en funcionamiento en AEMET, se ha trabajado en la implementación de distintas configuraciones de dominios anidados para poder realizar simulaciones con la mayor resolución posible en las áreas de interés para España, de acuerdo con los recursos computacionales y de acceso a la información necesaria, de que se dispone. Actualmente se encuentran disponibles cinco configuraciones de dominios y anidamientos que producen salidas en distintas áreas con distinta resolución, extensión horizontal y alcance temporal. Se han preparado varias configuraciones según la localización geográfica del punto emisor: una similar al MOCAGE para predicción de la calidad del aire ($2^\circ \rightarrow 0.5^\circ \rightarrow 0.1^\circ$) sobre la Península y Baleares, otra con un único dominio global a 1° , otra continental anidada sobre el global ($2^\circ \rightarrow 0.2^\circ$) y otra sobre Canarias ($2^\circ \rightarrow 0.5^\circ \rightarrow 0.1^\circ$ o 0.05°) con dos anidamientos en el modelo global. El motivo por el cual ha sido necesario implementar un número tan elevado de configuraciones distintas obedece a diversas causas entre las que podemos mencionar los problemas computacionales, la disponibilidad de datos meteorológicos o los tiempos de ejecución.

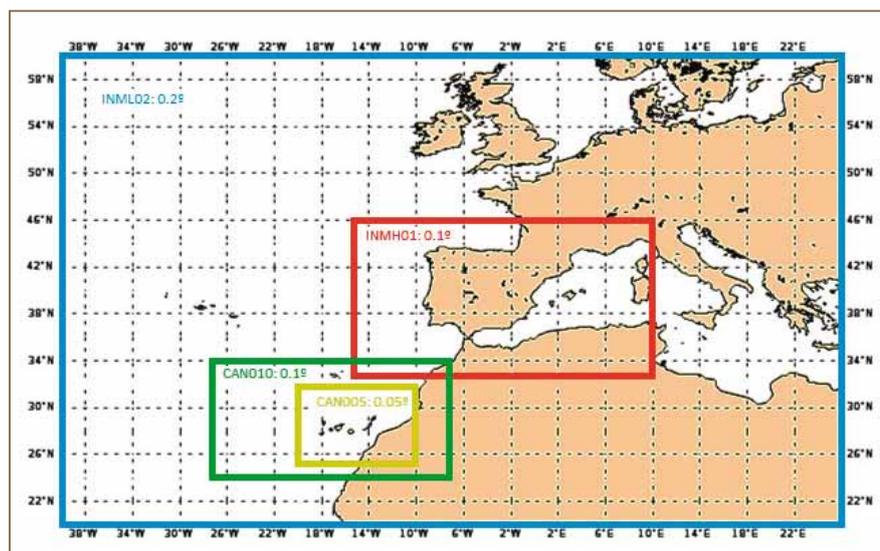


Figura 8. Áreas regionales de integración de MOCAGE-ACCIDENTE en AEMET.

Los forzamientos meteorológicos provienen del modelo del Centro Europeo para los dominios globales y del modelo HIRLAM para los dominios continentales y regionales. Se corre una versión diariamente a las 00UTC, sobre cada

El modelo MOCAGE

PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE Y SIMULACIÓN DE NUBES TÓXICAS

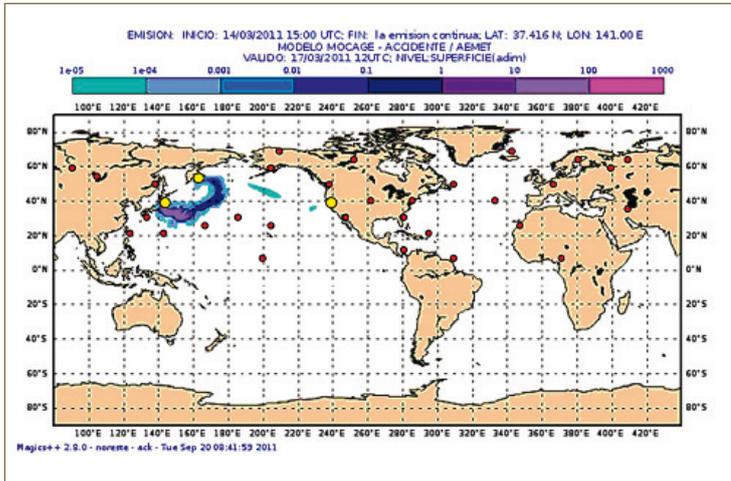
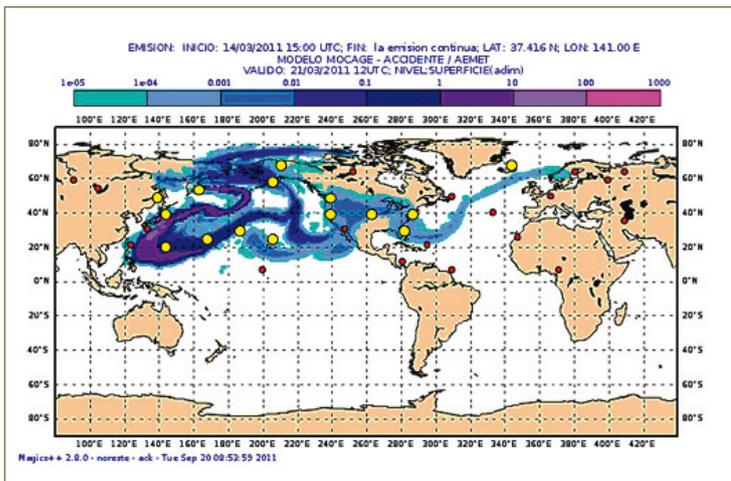


Figura 9. Mapas de dispersión válidos para el día 17 de marzo del 2011 a las 12:00 UTC (parte superior) y para el día 21 de marzo a las 12:00 UTC (parte inferior).



una de las centrales nucleares españolas, para calcular una posible dispersión de material contaminante, hasta un alcance de H+24 generando salidas gráficas horarias con el contenido relativo total en columna de la sustancia emitida con respecto a las concentraciones emitidas a la atmósfera. Actualmente, estamos trabajando en la puesta en explotación del sistema para atender cualquier posible emisión accidental, lo antes posible, en función de nuestros recursos de personas 24 horas y 7 días a la semana.

Desde su puesta en funcionamiento en AEMET, MOCAGE en modo ACCIDENTE se ha utilizado en diversas ocasiones para simular distintos eventos de emisión real o posible de material contaminante a la atmósfera. Cabe destacar el seguimiento que se hizo de la nube de cenizas volcánicas procedente del volcán islandés Eyjafjallajökull en 2010 y de la nube radiactiva procedente de la Central Nuclear de Fukushima en Japón en 2011 (figura 9). Si comparamos la simulación de la nube radiactiva del accidente japonés y las observaciones de la red mundial CTBO (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization*), podemos observar en la figura 9 la evolución de la nube junto a las estaciones en color amarillo que detectaron isótopos radiactivos. La evolución de la nube sigue la actividad de las observaciones de la red. La simulación comienza el día 14 de marzo de 2011 a las 15:00 UTC. En la medida de lo posible, los resultados de estas integraciones se han utilizado para verificar el buen funcionamiento del modelo cuando ha sido posible compararlos con observaciones reales de satélite o in situ o con los de otros modelos de dispersión. En otras ocasiones se simulaban escenarios posibles y no reales con fines preventivos, como en el caso del accidente en las instalaciones nucleares de Marcoule (Francia) o el volcán submarino de la isla de El Hierro (Islas Canarias).

REFERENCIAS

- | Bechtold, P., E. Bazile, F. Guichard, P. Mascart and E. Richard, A mass flux convection scheme for regional and global models, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 869-886, 2001.
- | Giorgi, F. and W. L. Chameides, Rainout Lifetimes of Highly Soluble Aerosols and Gases as Inferred from Simulations With a General Circulation Model, *J. Geophys. Res.*, 91(D13), 367-376, 1986.
- | Josse B., Simon P. and V.-H. Peuch, Rn-222 global simulations with the multiscale CTM MOCAGE, *Tellus*, 56B, 339-356, 2004.
- | Lefèvre, F., Brasseur, G. P., Folkins, I., Smith, A. K. and P. Simon, Chemistry of the 1991-1992 stratospheric winter: three-dimensional model simulations, *J. Geophys. Res.*, 99 (D4), 8183-8195, 2004.
- | Louis J.F., A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *B. Layer Meteor.*, 17, 197-202, 1979.
- | Mari, C., Jacob, D. J. and Bechtold, P., Transport and scavenging of soluble gases in a deep convective cloud, *J. Geophys. Res.*, 105, D17, 22, 255-267, 2000.
- | Stockwell, W.R. et al., A new mechanism for regional atmospheric chemistry modelling, *J. Geophys. Res.*, 102, 25847-25879, 1997.
- | Visschedijk, A. et al (2007) A high resolution gridded European emission database for the EU integrated project GEMS. TNO report 2007-A-R0233/B
- | Williamson, D. L. and P. J. Rash, Two-dimensional semi-lagrangian transport with shape preserving interpolation, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 102-129, 1989.
- | Wesely, M. L., Parameterization of surface resistance to gaseous dry deposition in regional numerical models, *Atmos. Env.*, 16, 1293-1304, 1989.

El Proyecto Europeo MACC

El proyecto MACC y su continuación el proyecto MACC-II (*Monitoring Atmospheric Composition & Climate - Interim Implementation*) son servicios atmosféricos preoperacionales del programa europeo GMES (Global Monitoring for Environment and Security). MACC suministró, durante los últimos años, el registro de datos de composición atmosférica utilizados para el seguimiento de las condiciones presentes y la predicción de la distribución de componentes clave. MACC-II combina el estado del arte de la modelización atmosférica con los datos de la observación terrestre para proporcionar servicios de información de la calidad del aire, de la composición global atmosférica, del clima y de las energías solar y ultravioleta.

El trabajo de AEMET en Madrid para el proyecto MACC, y su continuación el proyecto MACC-II, consiste en obtener una predicción en alta resolución para analizar casos de estudio de contaminación en la cuenca mediterránea dadas las especiales características de la dinámica y de la química atmosféricas en esta zona. Para ello se utiliza el modelo MOCAGE con un nuevo dominio, MACCH3, que abarca el este de la península Ibérica y el Mediterráneo occidental (longitud 5° W - 5° E y latitud 36° N - 44° N) con una resolución de 0.05° (~5km).

Las condiciones de contorno químicas para MOCAGE se toman de la media del ensemble de calidad del aire regional de MACC (MACC R-ENS) a 0.1° (~10km), interpolándose en AEMET a 0.05° (~5km) para las especies químicas NO₂ (dióxido de nitrógeno), O₃ (ozono), CO (monóxido de carbono) y SO₂ (dióxido de azufre) y para los niveles de superficie, 500m, 1000m y 3000m.

Se realiza una ejecución diaria del modelo con un alcance de predicción de 48 horas. Estas predicciones se almacenan en el sistema de almacenamiento masivo de AEMET y posteriormente, con la ayuda de los datos de observaciones de la red de contaminación de fondo EMEP/VAG, gestionada por AEMET y otras redes autonómicas y locales, se seleccionan situaciones interesantes y se comparan las salidas de MOCAGE de alta resolución con los miembros del ensemble regional de MACC y la media del ensemble.

Las predicciones diarias son enviadas en formato GRIB2 a Météo-France para su publicación en la página web de los proyectos MACC y MACC-II: <http://www.gmes-atmosphere.eu>

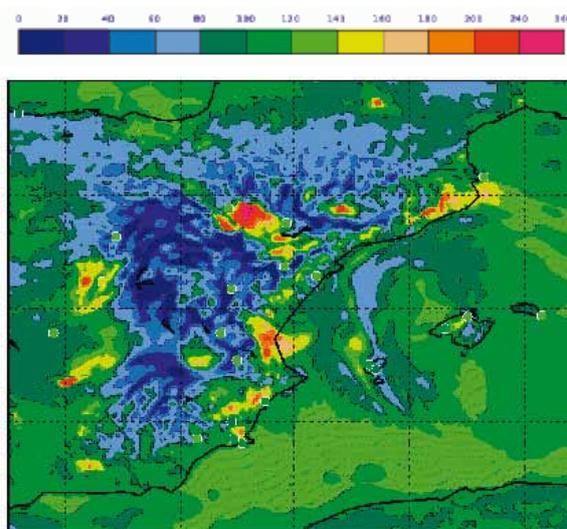


Fig 1.- Concentración de O₃ (µg/m³) para el 5 de julio de 2011 a las 12:00 UTC con las observaciones superpuestas en circunferencias blancas.

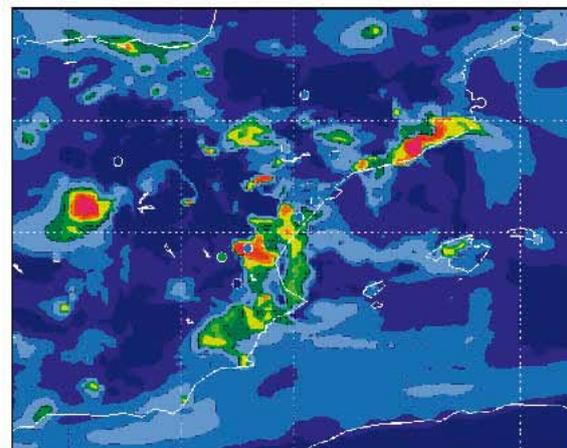
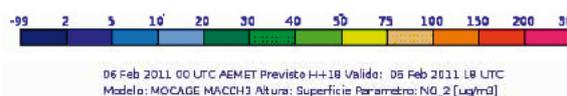


Fig 2.- Concentración de NO₂ (µg/m³) para el 6 de febrero de 2011 a las 18:00 UTC con las observaciones superpuestas en circunferencias blancas.