

CALIOPE: SISTEMA DE PRONÓSTICO OPERACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE PARA EUROPA Y ESPAÑA

José M^a Baldasano^{1,2}, Oriol Jorba¹, Santiago Gassó^{1,2}, M^a Teresa Pay¹, Gustavo Arevalo¹.

¹Barcelona Supercomputing Center–Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS)

c/ Jordi Girona 29, Edificio Nexus II, 08034 Barcelona e-mail: jose.baldasano@bsc.es

²Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Resumen

En las últimas décadas Europa ha presentado un claro progreso en la reducción de las emisiones antropogénicas. Sin embargo, la contaminación atmosférica continúa siendo un problema para la salud, especialmente en ambientes urbanos. El material particulado (PM), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono troposférico (O₃) son los principales contaminantes con problemas en Europa y España. La directiva europea 2008/50/EC establece la posibilidad de usar técnicas de modelización que permitan incrementar el conocimiento sobre el transporte y la dinámica de contaminantes en la atmósfera para asegurar el cumplimiento de la legislación e informar a la población acerca de sus niveles. En este sentido, el sistema de pronóstico de la calidad del aire CALIOPE lleva trabajando en modo operacional ofreciendo pronósticos de la dinámica de la contaminación atmosférica en Europa y España desde octubre de 2006. CALIOPE incorpora el estado actual de conocimiento sobre la modelización de la física y química de la atmósfera, así como un modelo de emisiones específicamente desarrollado para España (HERMES). En este trabajo se describen las principales características actuales del sistema de pronóstico de calidad del aire CALIOPE en cuanto a su configuración, utilidad y funcionamiento como herramienta de pronóstico.

Introducción

La contaminación atmosférica es el factor ambiental con un mayor impacto en la salud y es responsable del mayor número de enfermedades relacionadas con el medio ambiente (WHO, 2004; EEA, 2005). Las estimaciones de este último estudio indican que 20 millones de ciudadanos europeos sufren problemas respiratorios cada día. Las partículas (especialmente con un diámetro inferior a 2.5 micras, PM_{2.5}) se asocian con un incremento de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y cardiopulmonares. El coste social del asma se estima en 3 billones de euros por año. Las personas asmáticas y, en especial los niños, son sensibles a la calidad del aire y

numerosos estudios muestran su fuerte asociación a una exposición, tanto crónica como aguda, a la contaminación atmosférica.

La Directiva Marco 2008/50/CE de Calidad del Aire regula los principios básicos de la estrategia común europea para fijar objetivos de calidad del aire. Señala la necesidad de desarrollar acciones que permitan aumentar los conocimientos sobre el transporte y dinámica de contaminantes para asegurar el cumplimiento de la legislación e informar a la población sobre los niveles de contaminación a los que se ve sometida. Exige, cuando se sobrepasan determinados valores límites, un diagnóstico detallado de las áreas territoriales donde se producen los excesos y la previsión de la evolución de los niveles de inmisión. También establece la posibilidad de usar técnicas de modelización para evaluar la calidad del aire.

Actualmente existen varios sistemas de pronóstico de calidad del aire funcionando en modo operacional en Europa (Menut and Bessagnet, 2010). Entre ellos, CALIOPE es el único que proporciona un sistema de evaluación del pronóstico en tiempo casi real con una resolución temporal de una hora tanto en Europa como en España.

En este trabajo se describe el sistema CALIOPE de pronóstico de la calidad del aire para España y Europa (<http://www.bsc.es/caliope>), operado por el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) y financiado su desarrollo por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (CALIOPE 441/2006/3-12.1, A357/2007/2-12.1, 157/PC08/3-12.0) (Baldasano et al, 2008a).

Configuración del sistema CALIOPE

El sistema integra los siguientes modelos WRF-ARW/HERMES/CMAQ/BSC-DREAM8b (Figura 1). El modelo de pronóstico WRF-ARW v3.2.1 proporciona la información meteorológica (www.wrf-model.org). Las emisiones se derivan del modelo HERMES (High Elective-Resolution Modelling Emission System) (Baldasano et al,

2008). CMAQ v4.5 es el modelo de transporte químico usado para la dispersión y transformación de los contaminantes (www.cmaq-model.org). El sistema también considera la contribución de polvo natural y su aportación al material particulado (PM) a partir del modelo BSC-DREAM8b (Pérez et al., 2006a,b).

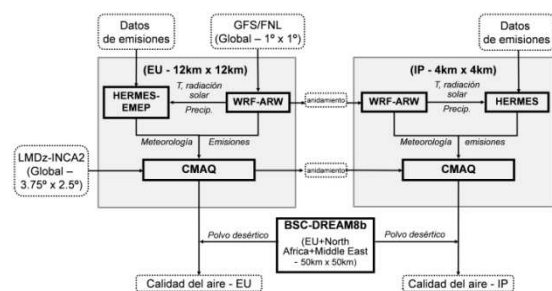


Fig. 1.- Esquema del sistema de pronóstico de la calidad del aire CALIOPE.

El sistema proporciona pronósticos de la calidad del aire a 24 y 48 horas para los dominios de Europa y España con una resolución horizontal de malla de 12 y 4 km x km, respectivamente, y una resolución temporal de 1 hora (Figura 2). Calcula la concentración horaria de O_3 , NO_x , CO , SO_2 , PM_{10} y $PM_{2.5}$. Se configura como una herramienta básica para los gestores de la calidad del aire y los ciudadanos para el conocimiento de los valores de la calidad del aire, y para conocer su dinámica, tanto espacial como temporal, a nivel europeo y peninsular. El sistema está en funcionamiento desde octubre del año 2006 a través de la web www.bsc.es/caliope.

Una de las componentes más importantes en un modelo de calidad del aire son las emisiones. En CALIOPE se ha desarrollado un modelo específico de emisiones de alta resolución para España: High Elective-Resolution Modelling Emission System (HERMES). El modelo gestiona sus bases de datos en un entorno SIG y la parte de cálculo está programada en C++. El modelo computa las emisiones de gases y material particulado. El sistema calcula las emisiones antropogénicas (tráfico rodado, marítimo y aéreo en puertos y aeropuertos, sector industrial, generación eléctrica, y sector doméstico y comercial) y biogénicas; puede calcular las emisiones en escala horaria, diaria, mensual y anual, desde una resolución espacial de 1 km x 1 km.

Evaluación operacional del sistema

El sistema también consta de un módulo de evaluación en tiempo quasi real (Near Real Time, NRT), donde se usan diferentes estadísticos, con las

medidas de más de 400 estaciones de calidad del aire, y se aplica un proceso de corrección del bias (diferencia entre observación y modelo) mediante la aplicación del filtro de Kalman (KF) siguiendo el trabajo de Sicardi et al. (2012). El modelo meteorológico es también evaluado en NRT.

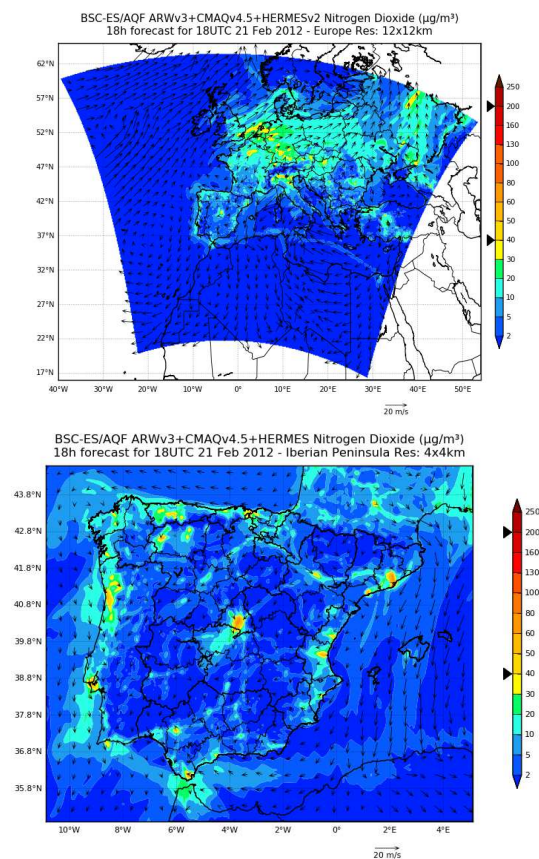


Fig. 2.- Pronóstico de NO_2 para Europa (arriba) y España (abajo) para el 22 de febrero de 2012 a las 18UTC.

El sistema CALIOPE genera de manera operativa los siguientes productos de evaluación al acceder a cada estación:

- *Fichas de evaluación*, que proporciona un análisis integrado de la evaluación por estación en la cual se incluyen todos los contaminantes medidos. Es una ficha dinámica pues se va actualizando de manera operativa con los últimos datos recibidos.
- *Series temporales* (observación frente modelo) de los últimos 15 días de pronóstico y mensuales para cada contaminante (ej. Figura 3).

Además del sistema de evaluación en continuo, el sistema se ha evaluado en modo diagnóstico en base al año 2004 y en modo pronóstico en base a los años 2009 y 2011. En la Tabla 1 se detallan los estudios publicados al respecto.

Dominio	Modo	Referencia
Europa	Diagnóstico	Pay et al. (2010, 2012a)
	Diagnóstico	Basart et al. (2012)
Portugal	Pronóstico	Borrego et al. (2011)
España	Diagnóstico	Baldasano et al. (2011)
	Diagnóstico	Pay et al. (2011, 2012b)
	Diagnóstico	Sicardi et al. (2012)

Tabla 1. Lista de estudios de evaluación del sistema CALIOPE

Los resultados de la evaluación anual del sistema CALIOPE para el año 2011 en base horaria se resumen en la Tabla 2. El O_3 es el contaminante con mejores estadísticos, si tenemos en cuenta que es el que presenta mayor nivel de concentración. La media de coeficientes de correlación es de 0.68, con un sesgo medio de $1 \mu\text{gm}^{-3}$ y un error de $20.7 \mu\text{gm}^{-3}$. Los peores resultados se obtienen para el SO_2 , este comportamiento está influenciado por la variabilidad de las emisiones de este contaminante. Los niveles de fondo de SO_2 son bajos ($\sim 4\text{-}5 \mu\text{gm}^{-3}$ para las estaciones disponible en 2011), pero en las proximidades de centrales térmicas o refinerías el SO_2 se transporta en forma de penachos de alta concentración. Un fallo en la dirección de este penacho o de caracterización de la emisión penaliza fuertemente el valor del estadístico, especialmente el del coeficiente de correlación.

	#N	Obs	Mod	r	MB	RMSE
O_3	280	57.0	58.0	0.68	1.0	20.7
NO_2	314	21.3	20.9	0.49	-0.4	14.6
SO_2	212	5.6	8.6	0.09	3.0	14.2
PM10	201	23.4	21.6	0.38	-1.8	18.2
PM2.5	28	16.0	14.1	0.35	-1.9	11.1

Tabla 2. Estadísticos anuales de CALIOPE 2011 por contaminante en las estaciones de calidad del aire de España disponibles. #N, número de estaciones; Obs, media observada en μgm^{-3} ; Mod, media del modelizada en μgm^{-3} ; r, media de coeficientes de correlación; MB, bias medio en μgm^{-3} ; RMSE, error cuadrático medio en μgm^{-3} .

En general, para todos los contaminantes, por tipo de estación se obtiene que en función del área, los mejores resultados de evaluación se obtienen en estaciones rurales, seguidas de las urbanas y suburbanas. En función de la emisión, la evaluación muestra que los mejores resultados se obtienen en estaciones de fondo, seguidas de las estaciones industriales y tráfico. Sin embargo, hay estaciones urbanas de tráfico que presentan un buen comportamiento, como es el caso de los dos grandes núcleos de Madrid y Barcelona (Baldasano et al., 2011).

CALIOPE también se ha evaluado siguiendo los criterios de rendimiento propuestos por la directiva 2008/50/CE en términos de Error Relativo (ERD, Error Relativo según Directiva), que se define como la interpretación matemática de la incertidumbre o error de la modelización. El ERD se calculado para las concentraciones máximas diarias 8h de O_3 , concentraciones horarias de NO_2 y concentraciones diarias de PM10. Los resultados muestran que CALIOPE cumple los criterios marcados por la directiva, con un ERD $< 50\%$ para el 98% de las estaciones de O_3 y el 92% de las estaciones de NO_2 y PM10.

En cuanto a la fiabilidad del sistema desde el punto de vista operativo, el sistema funcionó sin problemas en un 95% de los días del 2011. Este porcentaje indica que en tan sólo 18 días (de 365) el sistema tuvo problemas técnicos para lanzar los pronósticos de calidad del aire.

Pronósticos de episodios de contaminación

Las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona representan los núcleos urbanos más importantes de España, por tanto los episodios de contaminación son de especial preocupación por sus efectos directos en la población. Ambas zonas muestran diferentes patrones topográficos y de emisión lo que determina diferentes dinámicas atmosféricas bajo las mismas situaciones meteorológicas. Por un lado, Madrid es un área continental con una compleja topografía (Sistema Central localizado al noroeste que alcanza 2500 m y valle del Tajo al sur) que determina un régimen de vientos específico. Por otro lado, Barcelona es una ciudad costera que también presenta una compleja topografía, (varios valles perpendiculares a la línea de costa, dos sistemas montañosos: costero de 500 y pre-litoral de 100-1700 m) la cual induce una dinámica dominada por fenómenos de recirculación mesoescalar debido a brisas marinas y flujos de montaña. Además, las principales fuentes de emisión que afectan a ambas ciudades son diferentes. Mientras que Madrid está principalmente bajo la influencia de emisiones del área urbana (5.8 millones de habitantes) y de la red de carreteras que conecta la ciudad con las áreas industriales y áreas urbanas circundantes; en Barcelona la contribución urbana (3.1 millones de habitantes) están acompañada de emisiones generadas por la actividad industrial y de generación de energía, la red de carreteras y el puerto de la ciudad.

El periodo del 4 al 12 de febrero de 2011 representó un episodio típico de contaminación en invierno generado por una situación meteorológica de altas

presiones sobre la Península Ibérica la cual favorece el desarrollo de fenómenos de mesoescala. La Figura 3 muestra la concentración horaria de NO₂ pronosticada por CALIOPE y medida en dos estaciones, Escuelas Aguirre (Figura 3, arriba) y Eixample (Figura 3, abajo) en Madrid y Barcelona, respectivamente, para el episodio de contaminación citado. Las series temporales muestran una remarcada variación del ciclo diario, pues ellas son representativas de ambientes urbanos de tráfico. En Madrid y Barcelona, el tráfico rodado constituye la principal fuente de contaminantes primarios. El 75% de las emisiones de NO_x son producidas por el tráfico rodado, mientras que en Barcelona corresponde a un 57%.

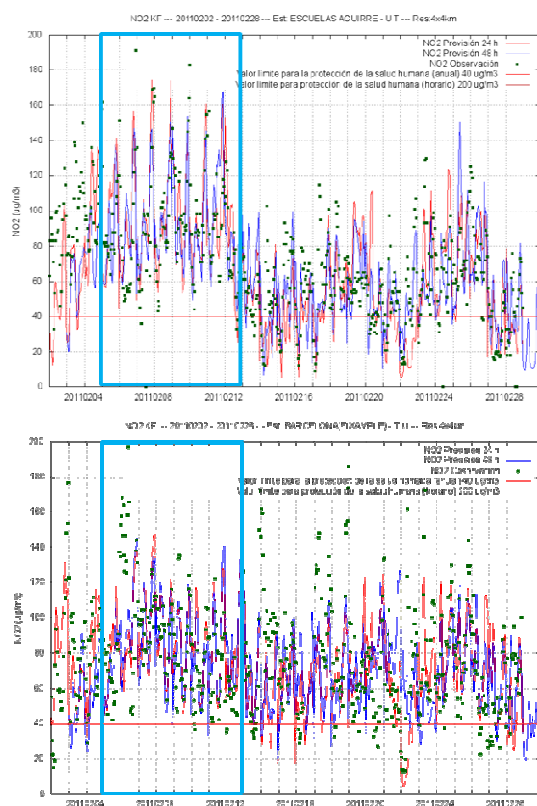


Fig. 3.- Series temporales de NO₂ en base horaria: pronóstico 24h (línea roja) y 48h (línea azul); y observaciones de calidad del aire (cuadros verdes) para las estaciones urbanas de tráfico Escuelas Aguirre en Madrid (arriba) y Eixample en Barcelona (abajo). El cuadro azul indica el episodio de contaminación del 4 al 12 de Febrero de 2011.

Fuera del episodio de contaminación de febrero, las concentraciones de fondo de NO₂ se mantienen por lo general más elevadas en Barcelona que en Madrid (~40 µg m⁻³ vs. ~20 µg m⁻³). Las brisas marinas y los vientos de montaña contribuyen a acumular y recircular las masas de aire perpendicularmente a la costa de Barcelona, lo que

contribuye a mantener casi constantes los niveles de fondo.

Durante el episodio de contaminación de febrero, los máximos horarios y las concentraciones de fondo en ambas ciudades aumentan. La variabilidad diaria de las concentraciones horarias de NO₂ es mayor en Madrid que en Barcelona. Las estaciones de Madrid presentaron concentraciones máximas > 140 µg m⁻³, y mínimas de ~60 µg m⁻³; mientras que en Barcelona las máxima horarias están entre 100 y 140 µg m⁻³, y las mínimas ~70 µg m⁻³.

La Figura 4 muestra las concentraciones máximas horarias de NO₂ para el día 8 de febrero de 2011. Durante este episodio, las altas presiones sobre la Península Ibérica y el limitado desarrollo de la capa límite planetaria, que presenta una altura máxima de 600 m a las 12:00 UTC, no favorecen la dispersión de los contaminantes. Las mayores concentraciones se encuentran a lo largo de los penachos urbanos de Madrid y Barcelona. En Madrid la dispersión de NO₂ sigue una dirección de suroeste a noreste, condicionado por la barrera del Sistema Central y canalizado por el valle del Tajo (al sur) y alcanzando Guadalajara (este) siguiendo la canalización del río Henares. En Barcelona, la dinámica de las concentraciones de NO₂ sigue un patrón diferente; el NO₂ se dispersa perpendicular a la línea de costa. La topografía compleja del litoral induce fenómenos de mesoescala que controlan el flujo superficial de vientos. Las brisas marinas y los vientos de montaña contribuyen a la acumulación y recirculación de las masas de aire, ayudado a la vez por las cadenas montañosas que actúan de barrera recirculando el flujo de NO₂ hacia el Mediterráneo canalizado por los valles de los ríos.

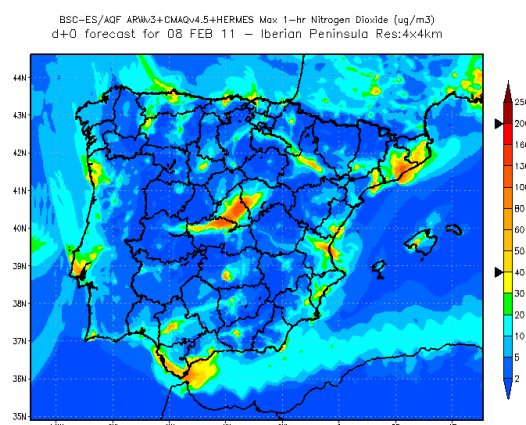


Fig. 4.- Pronóstico de las máximas concentraciones de NO₂ para el 8 de febrero de 2011 a las 18UTC.

De la misma manera, la Figura 5 muestra la concentración horaria de PM₁₀ pronosticada por CALIOPE y medida en dos estaciones, Escuelas

Aguirre (Figura 5, arriba) y Eixample (Figura 5, abajo) en Madrid y Barcelona, respectivamente. Como en el caso de NO_2 , las concentraciones horarias de PM_{10} presentan un marcado ciclo diario, condicionado por las emisiones de tráfico rodado, con importante contribución de los procesos de combustión y resuspensión de partículas. Las series temporales indican que, fuera del episodio de contaminación de febrero, las concentraciones de PM_{10} de fondo en Barcelona son mayores que en Madrid. Mientras que en Madrid son $< 10 \mu\text{g m}^{-3}$, en Barcelona se mantienen $\sim 10 \mu\text{g m}^{-3}$. Como se comentó anteriormente, los fenómenos de mesoescala contribuyen a acumular y recircular las masas de aire perpendicularmente a la costa de Barcelona, lo que contribuye a mantener casi constantes los niveles de fondo.

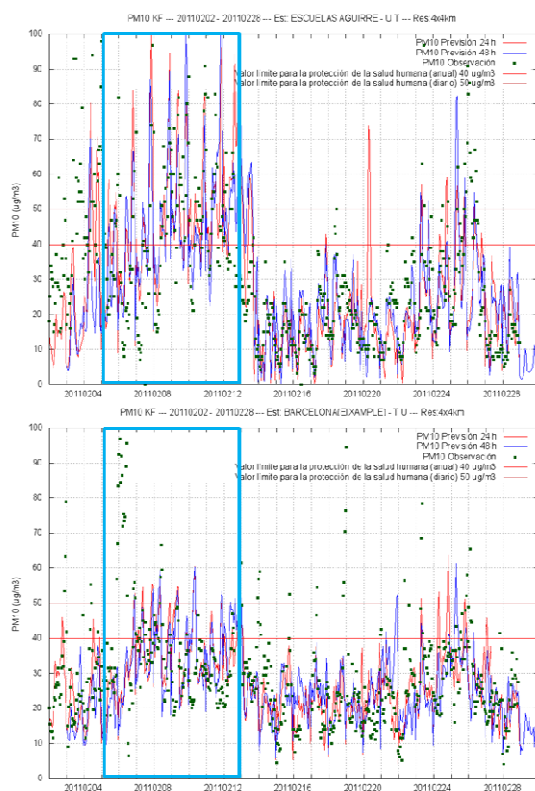


Fig. 5.- Series temporales de PM_{10} en base horaria: pronóstico 24h (línea roja) y 48h (línea azul); y observaciones de calidad del aire (cuadros verdes) para las estaciones urbanas de tráfico Escuelas Aguirre en Madrid (arriba) y Eixample en Barcelona (abajo). El cuadro azul indica el episodio de contaminación del 4 al 12 de Febrero de 2011.

Durante el episodio de febrero claramente las concentraciones de fondo aumentan en las dos ciudades. En Barcelona aumentan hasta $\sim 20 \mu\text{g m}^{-3}$, mientras que en Madrid presentan una tendencia creciente, superando las concentraciones de Barcelona. La variabilidad diaria de las

concentraciones de PM_{10} es mayor en Madrid que en Barcelona, mientras que en Madrid la concentración máxima diaria es $> 50 \mu\text{g m}^{-3}$ en Barcelona permanecen entre ~ 40 - $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Este hecho es debido a que el episodio de contaminación estuvo acompañado de una intrusión de polvo procedente del Sahara (Figura 6), transportado indirectamente por un sistema de bajas presiones localizado sobre el océano Atlántico en frente de Portugal, moviéndose de noroeste a sureste sobre la Península Ibérica, que no llegó a afectar a la ciudad de Barcelona.

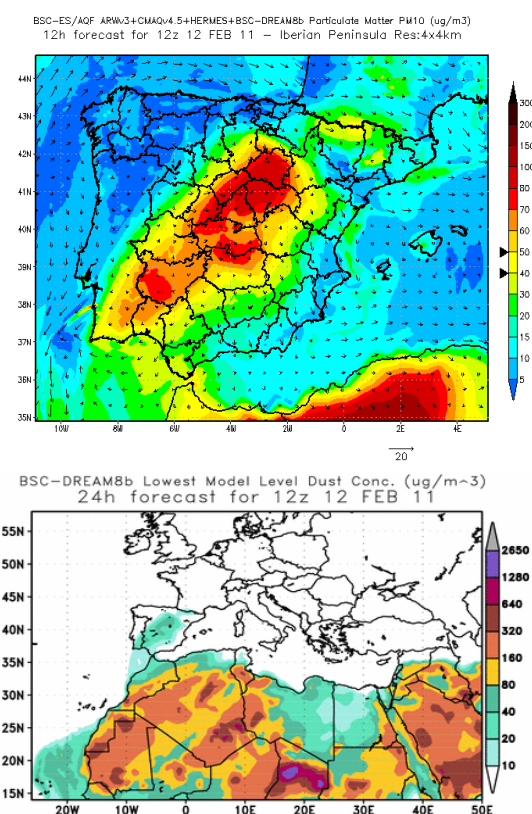


Fig. 6.- Pronóstico de CALIOPE para la concentración de PM_{10} en superficie (arriba) y pronóstico de BSC-DREAM8b para la concentración de polvo sahariano en superficie (abajo), ambos para el 12 de febrero de 2011 a las 12UTC.

Conclusiones

El sistema CALIOPE es una herramienta útil para el pronóstico de calidad del aire en España. Para aumentar la confianza de los usuarios de CALIOPE en los pronósticos generados, el sistema es evaluado en tiempo casi real frente a estaciones de calidad del aire disponibles pertenecientes a la Red de calidad del aire de España. Esta evaluación en tiempo real es accesible a través de diferentes productos de evaluación operacional (series

temporales, estadísticos discretos, diagramas XY, etc.).

La aplicación de CALIOPE como herramienta de pronóstico de episodios de contaminación es útil en el caso de los principales núcleos urbanos de España, Madrid y Barcelona. El análisis realizado sobre el episodio de contaminación del 4 al 12 de febrero indica que las diferentes características topográficas y patrones de emisiones en ambas ciudades determinan diferente dinámica atmosférica de la contaminación. En Madrid el penacho urbano se dispersa en dirección suroeste a noreste, condicionado por el Sistema Central y el valle de Tajo y el Henares. En Barcelona, el penacho urbano se desplaza perpendicular condicionado por las brisas marinas y los flujos de montaña.

Este trabajo ha demostrado que CALIOPE es un sistema robusto, tanto por la calidad de sus pronósticos de calidad del aire para O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}, como por su fiabilidad técnica para generar los pronósticos horarios cada día.

Referencias

- Baldasano J.M., P. Jiménez-Guerrero, O. Jorba, C. Pérez, E. López, P. Güereca, F. Martín, M. García-Vivanco, I. Palomino, X. Querol, M. Pandolfi, M.J. Sanz and J.J. Diéguez (2008a). CALIOPE: An operational air quality forecasting system for the Iberian Peninsula, Balearic Islands and Canary Islands- First annual evaluation and ongoing developments. *Advances in Science and Research*, 2: 89-98.
- Baldasano J.M., L. P. Güereca, E. López, S. Gassó, P. Jiménez-Guerrero (2008b) Development of a high resolution (1 km x 1 km, 1 h) emission model for Spain: the High-Effective Resolution Modelling Emission System (HERMES). *Atmospheric Environment*, 42: 7215-7233 doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.026
- Baldasano J.M., M.T. Pay, O. Jorba, S. Gassó and P. Jiménez-Guerrero (2011) An annual assessment of air quality with the CALIOPE modeling system over Spain. *Science of the Total Environment* 409: 2163–2178 doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.01.041.
- Basart, S., Pay, M.T., Jorba, O., Pérez, C., Jiménez-Guerrero, P., Schulz, M., Baldasano, J.M. (2012). Aerosol in the CALIOPE air quality modelling system: validation and analysis of PM levels, optical depths and chemical composition over Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3363-3392.
- Borrego, C., Monteiro, A., Pay, M.T., Ribeiro, I., Miranda, A., Basart, S., Baldasano, J.M. (2011). *Atmos. Environ.*, 45, 6629-6664.
- EEA (2005). Environment and Health. European Environment Agency, European Commission, Joint Research Centre, Report 10/2005, 40 pp.
- Menut, L., Bessagnet, B. (2010). Atmospheric composition forecasting in Europe. *Ann Geophys*, 28, 61-74.
- Pay, M.T., Piot, M., Jorba, O., Basart, S., Gassó, S., Jiménez-Guerrero, P., Gonçalves, M., Dabdub, D., Baldasano, J.M. (2010). A full year evaluation of the CALIOPE-EU air quality system in Europe for 2004: a model study. *Atmos. Environ.*, 44, 3322-3342. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.050140.
- Pay, M.T., Jiménez-Guerrero, P., Baldasano, J.M. (2011). Implementation of resuspension from paved roads for the improvement of CALIOPE air quality system in Spain. *Atmos. Environ.*, 45, 802-807. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.10.032.
- Pay, M.T., Jiménez-Guerrero, P., Baldasano, J.M. (2012a). Assessing sensitivity regimes of secondary inorganic aerosol formation in Europe with the CALIOPE-EU modeling system. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.01.027.
- Pay, M.T., Jiménez-Guerrero, P., Jorba, O., Basart, S., Pandolfi, M., Querol, X., Baldasano, J.M. (2012b). Spatio-temporal variability of levels and speciation of particulate matter across Spain in the CALIOPE modeling system. *Atmos. Environ.*, 46, 376-396, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.09.049.
- Pérez C., S. Nickovic, J.M. Baldasano, M. Sicard, F. Rocadenbosch, and V. E. Cachorro (2006a) A Long Saharan Dust over the Western Mediterranean: Lidar, Sun Photometer Observations and Regional Dust Modelling. *Journal of Geophysical Research* 111, D15214, doi: 10.1029/2005JD006579
- Pérez C., S. Nickovic, G. Pejanovic, J.M. Baldasano and E. Ozsoy (2006b) Interactive Dust-radiation Modeling: A Step to improve Weather Forecast. *Journal of Geophysical Research* 111, D16206 doi:10.1029/2005JD006717
- Sicardi V., J. Ortiz, A. Rincón, O. Jorba, M.T. Pay, S. Gassó, J.M. Baldasano (2012) Assessment of Kalman filter bias-adjustment technique to improve the simulation of ground-level Ozone over Spain. *Science of the Total Environment*, 416: 329–342 doi:10.1016/j.scitotenv.2011.11.050.
- WHO (2004) Health Aspects of Air Pollution. Document E8 3080 (www.who.int)