

# EL PROYECTO CALIOPE: SISTEMA DE CALIDAD DEL AIRE OPERATIVO PARA ESPAÑA. OBJETIVO Y ESTADO ACTUAL.

J.M. Baldasano (1,2), P. Jiménez-Guerrero (1), O. Jorba (1), C. Pérez (1), E. López (1), P. Güereca (1), F. Martín (3), M. García-Vivanco (3), I. Palomino (3), X. Querol (4), M. Pandolfi (4), M.J. Sanz (5), J.J. Diéguez (5)

<sup>(1)</sup>Earth Sciences Department, Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), Barcelona, SPAIN. [jose.baldasano@bsc.es](mailto:jose.baldasano@bsc.es)

<sup>(2)</sup>Environmental Modelling Laboratory, Technical University of Catalonia, Barcelona, SPAIN.

<sup>(3)</sup>Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, SPAIN.

<sup>(4)</sup>Instituto de Ciencias de la Tierra ‘Jaume Almera’ (CSIC-IJA), Barcelona, SPAIN.

<sup>(5)</sup>Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Paterna, SPAIN.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es el factor ambiental con un mayor impacto en la salud en Europa y es responsable del mayor número de enfermedades relacionadas con el medio ambiente según un estudio de la Unión Europea (EEA, 2005). Las estimaciones de este estudio indican que 20 millones de ciudadanos europeos sufren de problemas respiratorios cada día. El material particulado (especialmente las partículas con un diámetro inferior a 2.5 micras, PM<sub>2.5</sub>) se asocia 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 asmáticos, son sensibles a la calidad del aire y varios estudios muestran una fuerte asociación entre la exposición a contaminación atmosférica y el agravamiento del asma.

En Europa, la Directiva Marco 1996/62/CE de Calidad del Aire establece los principios básicos de una estrategia común europea para fijar objetivos de calidad del aire para evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos sobre la salud y el medio ambiente. Uno de los puntos en los que la Comisión Europea ha mostrado una mayor preocupación es en la necesidad de desarrollar acciones que permitan aumentar los conocimientos sobre el transporte y dinámica de contaminantes para asegurar el cumplimiento de la legislación vigente e informar a la población sobre los niveles de contaminantes a los que se ve sometida, especialmente antes del año 2010, fecha límite de entrada en vigor de la Directiva 1999/30/CE que regula las concentraciones por material particulado. La regulación es especialmente exigente cuando se sobrepasan determinados niveles umbral, en cuyo caso se demanda un diagnóstico detallado de aquellas áreas territoriales en las que se producen los excesos y la previsión de la evolución de los niveles de inmisión. De igual modo, la directiva establece, en sus artículos 4 y 6, la posibilidad de usar técnicas de modelización o de estimación objetiva para evaluar la calidad del aire.

En este contexto, el proyecto CALIOPE (Sistema de Calidad del Aire Operativo para España; <http://www.bsc.es/caliope/>) define como objetivo principal establecer un sistema operacional de predicción de la calidad del aire para España con una alta resolución espacial y temporal. El proyecto está financiado por el Ministerio de Medio Ambiente, y pretende diseminar productos relacionados con la calidad del aire que tengan utilidad para un amplio rango de usuarios finales y sirvan como información complementaria para la toma de decisiones en la reducción de los impactos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana. Para el desarrollo del proyecto se ha establecido un consorcio de cuatro instituciones de investigación españolas: Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), el Instituto de Ciencias de la Tierra ‘Jaume Almera’ del Centro Superior de Investigaciones Científicas (IJA-CSIC) y la Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). El consorcio se encarga de las tareas científicas y operacionales relacionadas con la modelización y predicción de la calidad del aire, y evaluar su grado de funcionamiento.

## SISTEMA DE MODELIZACIÓN

El proyecto CALIOPE enmarca el desarrollo, implementación y evaluación de un sistema integrado de predicción de la calidad del aire basado en modelos numéricos. El sistema está diseñado para trabajar a una resolución espacial de 12 x 12 km para un dominio europeo, a 4 x 4 km para España y con anidamientos a 1 x 1 km sobre las grandes ciudades de Madrid y Barcelona. El rango temporal de predicción se ha establecido hasta 72 h como objetivo final. El sistema se compone por una serie de modelos que consideran la contaminación atmosférica de origen antropogénico, biogénico, y contaminación natural de polvo mineral (Fig. 1). El sistema está compuesto por un núcleo meteorológico basado en el modelo WRF-ARW, dos modelos de

transporte químico (CTMs), CMAQ y CHIMERE, y el modelo de emisiones HERMES (p.e., Baldasano et al., 2008; Jiménez-Guerrero et al., 2007), desarrollado específicamente para España. Para tener en consideración la aportación de polvo natural al balance de contaminación por material particulado, el sistema CALIOPE se acopla con el modelo DREAM (Nickovic et al., 2001). Bajo el marco del proyecto CALIOPE se ha desarrollado una interfaz para acoplar el modelo CHIMERE con el modelo WRF-ARW (Jorba et al., 2008).

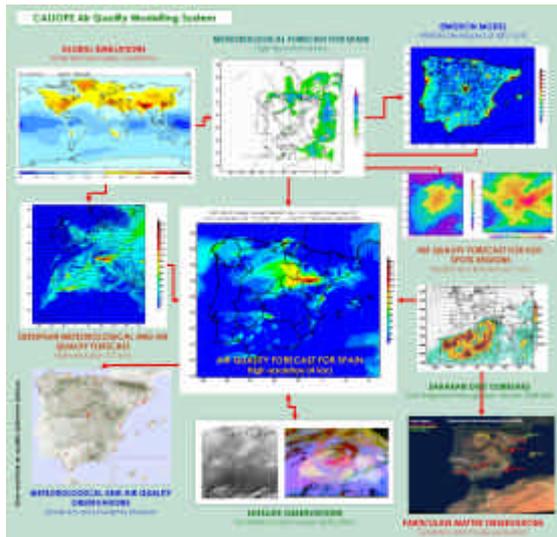


Fig. 1.- Esquema del sistema de modelización CALIOPE.

Los CTMs consideran especies gaseosas y aerosoles de origen primario y secundario inorgánicos y orgánicos. Incluyen material particulado primario, polvo mineral, sulfatos, nitratos, amoníaco, especies orgánicas secundarias y agua. El sur de Europa y especialmente España están altamente afectados por intrusiones de polvo del Sahara (p.e., Pérez et al., 2006ab). Para tener en cuenta este aporte, como se ha comentado, el sistema CALIOPE se acopla con el modelo DREAM que modela el aporte de polvo mineral a la península Ibérica y Europa. DREAM es un modelo acoplado on-line con el modelo meteorológico NCEP/Eta, y simula los procesos principales del ciclo atmosférico del polvo. La erosión del suelo causada por el viento se parametriza por tipo de suelo, cubierta vegetal, contenido de humedad del suelo y turbulencia atmosférica superficial. El acoplamiento de DREAM con el sistema CALIOPE se describe con detalle en Jiménez-Guerrero et al. (2008).

Por otra parte, se ha desarrollado el modelo de emisiones específico para España (HERMES) que permite calcular las emisiones con una elevada resolución espacial (1 x 1 km) y temporal (1 hora) (Fig. 2). HERMES considera distintos sectores de emisión: (1) plantas de generación eléctrica, (2) instalaciones industriales, (3) uso de combustible fósil en entornos doméstico y comercial, (4) uso de solventes en entornos doméstico y comercial, (5)

transporte rodado, (6) puertos, (7) aeropuertos y (8) emisiones biogénicas. Las emisiones se calculan siguiendo una aproximación bottom-up excepto para el uso de combustible fósil en entornos doméstico y comercial, donde se aplica una metodología top-down. Se siguen los criterios y metodologías de modelos de emisiones previos desarrollados para el este de España: EMICAT2000 (Parra et al., 2004; 2006) y EMIVAL2000 (Arévalo et al., 2004). El año de referencia seleccionado para construir la base de datos del modelo de emisiones es el año 2004. Los resultados generados por el modelo siguen la nomenclatura establecida por la Agencia Europea de Medioambiente para contaminación atmosférica (sectores SNAP). El diseño de HERMES permite presentar los resultados para instalaciones individuales, actividades industriales, clasificación de uso de suelo, o tipo de contaminante o proceso (emisiones fugitivas, evaporativas, calientes o frías).

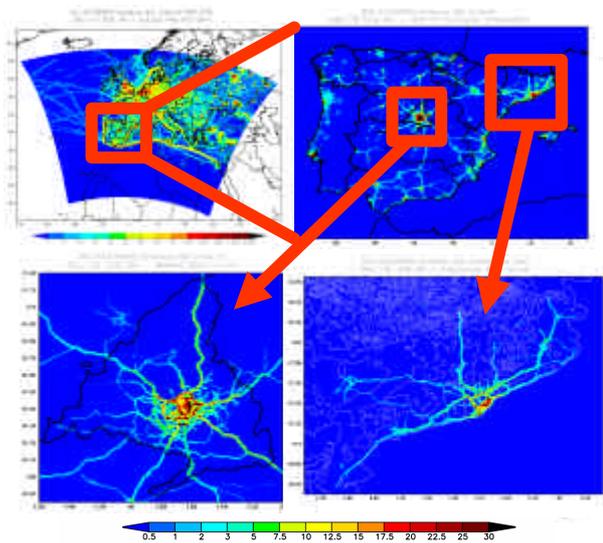


Fig. 2.- Resultados del modelo de emisiones antropogénicas y biogénicas HERMES basado en un sistema SIG. Resultados para Europa a 12 x 12 km, España a 4 x 4 km, y la comunidad de Madrid y Catalunya a 1 x 1 km.

El estado actual del proyecto se puede consultar en la página web <http://www.bsc.es/calioppe> donde se presentan los objetivos del proyecto, la metodología aplicada, y se muestran las predicciones experimentales que se están realizando con el sistema de modelización WRF-ARW/HERMES/CMAQ. En un futuro se complementarán estos resultados con el modelo CHIMERE.

## EVALUACIÓN ANUAL 2004 A BAJA RESOLUCIÓN

Como paso previo al desarrollo del sistema de alta resolución se ha realizado la evaluación de una simulación anual del año 2004. La selección del año viene condicionada por el modelo de emisiones, que

su primera versión se basa en una base de datos del año 2004. En este apartado se presentan los resultados de la evaluación de la simulación anual del dominio de la península Ibérica. Los resultados se han evaluado con las estaciones que se muestran en la Fig. 3. Las observaciones han pasado un control de calidad realizado por IJA-CSIC y CEAM, que ha permitido realizar una verificación de la modelización realizada con los modelos WRF-CMAQ y MM5-CHIMERE (operados por BSC-CNS y CIEMAT). El sistema de modelización se ha configurado a resoluciones medias de trabajo para la evaluación preliminar del sistema: (1) CMAQ: dominio Europeo a 50 x 50 km y un dominio de la península Ibérica a 18 x 18 km, con 12 niveles verticales; (2) CHIMERE: dominio Europeo de 0.5° x 0.5° de resolución y un dominio peninsular de 0.2°x0.2°, con 8 niveles verticales. Para esta simulación las emisiones de trabajo se obtienen de EMEP. Las condiciones iniciales y de contorno del sistema son: (1) WRF-ARW y MM5: análisis cada 6 horas NCEP/FNL; (2) CMAQ: perfiles climáticos basados en las guías U.S. EPA; (3) CHIMERE: climatologías mensuales del modelo LMDz-INCA (Hauglustaine et al., 2004) para concentraciones de gases y del modelo GOCART (Chin et al., 2002) para material particulado.



Fig. 3.- Localización de las estaciones EMEP empleadas para la verificación de la simulación de calidad del aire del 2004.

La Fig. 4 muestra la evolución anual de los errores medios diarios para el año 2004. El error normalizado medio (MNGE) y el bias normalizado medio (MNBE) se han calculado a partir de las estaciones EMEP disponibles en la península Ibérica (Fig. 3) en base diaria. Los modelos CMAQ y CHIMERE presentan un comportamiento similar para el ozono. El MNGE se mantiene por debajo del 15-20% durante el verano, donde los errores normalizados presentan los valores más bajos. En invierno el comportamiento de ambos modelos es más dispar. CMAQ tiende a subestimar las concentraciones de ozono, excepto durante algunos episodios, mientras que CHIMERE muestra una sobrestimación en general. De abril a junio, los

modelos reproducen mejor las observaciones, sin embargo CHIMERE muestra una tendencia a sobrestimar los valores diarios de fondo (MNBE por debajo del 15%), mientras CMAQ los subestima (MNBE alrededor de -15%). Este comportamiento cambia a partir de julio, cuando los dos modelos muestran una tendencia a sobrestimar los valores diarios con un MNBE variando entre 0 a 30%. En general, CMAQ muestra errores mayores comparado con CHIMERE. Esto se puede explicar por: (1) la distinta química, (2) condiciones iniciales y de contorno de ambos sistemas de modelización, y de la distinta evolución mensual de las condiciones de contorno, y (3) para algunos episodios en las diferencias entre la meteorología de WRF-ARW y MM5. Los perfiles de inicialización de CHIMERE parecen ser superiores que los de CMAQ durante invierno, mientras que se ajustan más en verano. Más allá, los resultados del periodo de verano muestran la dificultad de ambos modelos de reproducir la destrucción nocturna de ozono, aunque los valores diurnos no se reproducen en todos los casos. Resaltan dos episodios de agosto, donde los dos modelos muestran los mayores errores. Éstos están asociados a una subestimación de los modelos meteorológicos (WRF-ARW y MM5) de dos episodios de precipitación importantes sobre la península, que impactan negativamente durante los siguientes días en la simulación de ozono.

Las mayores diferencias entre modelos y los errores más importantes se observan en los resultados de material particulado. Los resultados de PM10, aunque se consideran preliminares, muestran la complejidad de modelar el material particulado en la península Ibérica. CHIMERE presenta una sobrestimación del PM10, especialmente en invierno (MNBE alrededor del 30% y MNGE del 50%), mientras que CMAQ en general lo subestima, con mayor grado en verano y presenta un MNGE por debajo del 30% en la mayoría de situaciones de invierno. La causa de este comportamiento dispar entre modelos se puede atribuir a la inclusión de los procesos de resuspensión y aerosol marino considerado en la configuración de CHIMERE empleada, los cuales no se han utilizado en CMAQ. Las parametrizaciones de resuspensión y de aerosol marino incluidas en CHIMERE muestran una tendencia a sobrestimar la emisión de aerosoles de este origen sobre la península y con ello contribuye a las elevadas concentraciones de PM10. En este sentido, CMAQ consigue controlar mejor el ciclo de PM10, considerando la componente antropogénica y solo la parte natural de intrusiones de polvo del Sahara siguiendo la metodología descrita en Jiménez-Guerrero et al. (2008), que muestra un comportamiento satisfactorio para los episodios de invierno. De toda la evaluación anual, destacan dos episodios de sobrestimaciones significativas de los modelos. Éstos están asociados a intrusiones de polvo Sahariano importantes sobre la península

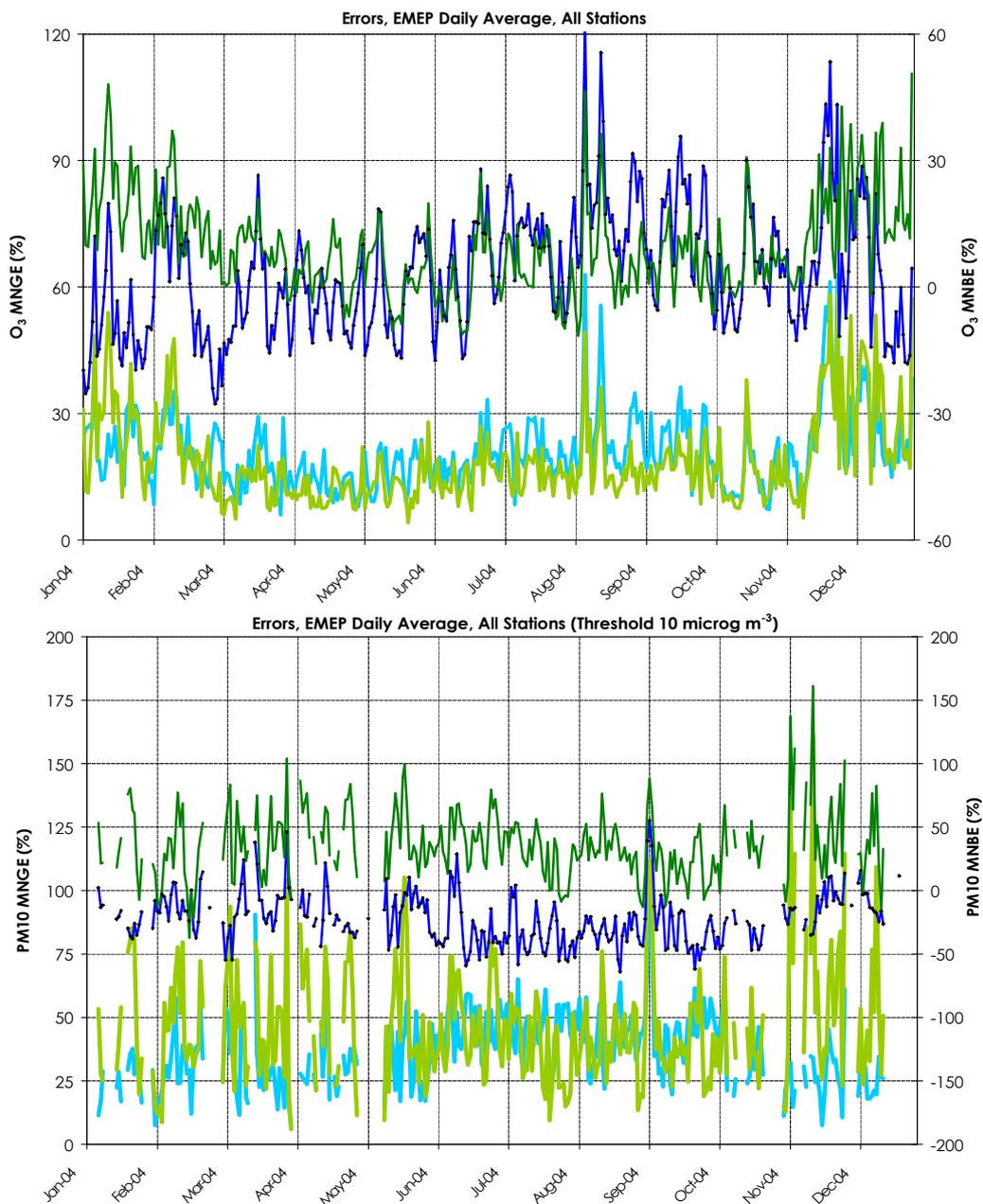


Fig. 4. Evolución anual del 2004 del error diario medio para CMAQ (azul) y CHIMERE (verde) para ozono (arriba) y PM10 (abajo): error normalizado (MNGE) (claro) y bias normalizado medio (MNBE) (oscuro).

Ibérica, 30 de marzo y 5 de septiembre. La sobrestimación se debe al forzamiento del modelo DREAM, cosa que indica la sensibilidad del sistema en la predicción de los niveles de PM10 con la capacidad del modelo DREAM de describir con detalle el transporte y la deposición de polvo mineral en la península Ibérica. Por último, en verano los errores MNGE presentan una variabilidad menor en CMAQ, aunque son elevados (alrededor del 45%), superiores a la media de los errores de verano. La subestimación de CMAQ durante el verano indica la necesidad de incluir la componente de resuspensión, aunque se debe calibrar con detalle para poder modelar de forma realista la contribución de este

proceso y mejorar el comportamiento del modelo como se ha visto con CHIMERE.

Los resultados de la simulación anual preliminar realizada para el año 2004 con los modelos configurados a resolución media permiten identificar los puntos a tener en cuenta para modelar satisfactoriamente la calidad del aire en la península Ibérica.

## CONCLUSIONES

El proyecto CALIOPE resulta de la cooperación de cuatro centros de investigación españoles, BSC, CIEMAT, IJA-CSIC y CEAM, que está permitiendo

la implementación de un sistema de predicción de la calidad del aire para España pionero a nivel estatal e internacional. La mejora de la resolución espacio-temporal que se logrará con el proyecto CALIOPE servirá para establecer una herramienta de predicción, y diagnóstico de los problemas asociados con la calidad del aire. El sistema representará una ayuda a las administraciones para poder informar a la población sobre la evolución de la calidad del aire, y poder actuar en caso necesario con antelación. CALIOPE complementa también a las redes de medida de la calidad del aire gestionadas por las administraciones locales y regionales, y puede resultar muy útil para la selección de nuevos emplazamientos para estaciones de medidas, o en el diseño de campañas experimentales de medida que se quieran realizar en un futuro para poder entender mejor la problemática de la calidad del aire tanto en entorno rural como urbano.

Los resultados de la simulación preliminar del año 2004 a baja resolución han permitido identificar varios puntos a trabajar para la mejora de la predicción de ozono y material particulado sobre la península Ibérica. La modelización del material particulado muestra una mayor dificultad, con la necesidad de caracterizar correctamente la componente natural para poder modelar el ciclo anual de PM10 en la península Ibérica.

El desarrollo del proyecto y las predicciones experimentales se pueden consultar a través de la web <http://www.bsc.es/caliope>. En ella se muestran actualmente las predicciones para el dominio Europeo, para la península Ibérica, con zooms en varias comunidades autónomas empleando el sistema WRF-ARW/HERMES/CMAQ. Las predicciones diarias se realizan con un alcance de 48 horas. Los resultados del sistema se pueden verificar frente a imágenes de satélite y estaciones de medida en superficie. El sistema se complementará con los resultados del modelo CHIMERE.

## Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto CALIOPE del Ministerio de Medioambiente (441/2006/3-12.1 y A357/200/2-12.1). Las simulaciones del sistema CALIOPE se realizan en el supercomputador MareNostrum gestionado por el Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación: (94.21 Teraflops de rendimiento teórico) 10240 procesadores PowerPC 970MP (2560 JS21 blades); 20 TB de memoria principal; 280 + 90 TB de capacidad de disco. La simulación anual CMAQ se ha realizado en MareNostrum y la de CHIMERE se ha realizado en el LINCE-CIEMAT (clúster PC con 26 procesadores y 5 Tb de disco).

## Referencias

Arévalo, G., Salvador, R., Gassó, S., Millan, M., and Baldasano, J.M.: Application of a high-resolution emission model in

- Valencia Community (Spain). In: Air Pollution 2004. Ed. WITpress, 31-40, Rhodes Greece, 2004.
- Baldasano, J.M., Güereca, P., López, E., Gassó, S., Jiménez-Guerrero, P., 2008. 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 (enviado).
- Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B., Duncan, B.N., Martin, R.V., Logan, J., Higurashi, A., and Nakajima, T.: Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements, *Journal of Atmospheric Physics*, 59, 461-483, 2002.
- EEA: Environment and Health. European Environment Agency, European Commission, Joint Research Centre, Report 10/2005, 40 pp, 2005.
- Hauglustaine, D.A., Hourdin, F., Walters, S., Jourdain, L., Filiberti, M.-A., Lamarque, J.-F., and Holland, E.A.: Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model: description and background tropospheric chemistry evaluation, *Journal of Geophysical Research*, 109, D04314, doi:10.1029/2003JD003957, 2004.
- Jiménez-Guerrero, P., Jorba, O., Pérez, C., Gassó, C., and Baldasano, J.M.: Enhancing high-resolution air quality forecasting in Marenostrum supercomputer. In: 11st International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. Cambridge, United Kingdom, July 2-5, 2007.
- Jiménez-Guerrero, P., Pérez, C., Jorba, O., and Baldasano, J.M.: Contribution of Saharan dust in an integrated air quality system and its on-line assessment, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03814, doi:10.1029/2007GL031580, 2008.
- Jorba, O., Loidan, T., Jiménez-Guerrero, P., Pérez, C., and Baldasano, J.M.: Development of a linkage between the Advanced Research Weather Research and Forecasting model and the CHIMERE Chemistry-Transport Model. *Environmental Modelling and Software*, 10.1016/j.envsoft.2008.02.002, 2008.
- Nickovic, S., Papadopoulos, A., Kakaliagou, O., Kallos, G.: Model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 106, 18113-18129, 2001.
- Parra, R., Gassó, S., and Baldasano, J.M.: Estimating the biogenic emissions of non-methane volatile organic compounds from the North western Mediterranean vegetation of Catalonia, Spain. *The Science of the Total Environment*, 329, 241-259, 2004.
- Parra, R., Jiménez, P., and Baldasano, J.M.: Development of the high spatial resolution EMICAT2000 emission model for air pollutants from the north-eastern Iberian Peninsula (Catalonia, Spain), *Environmental Pollution*, 140, 200-219, 2006.
- Pérez, C., Nickovic, S., Pejanovic, G., Baldasano, J.M., Özsoy, E.: Interactive dust-radiation modelling: a step to improve weather forecast, *Journal of Geophysical Research*, 111, D16206, doi:10.1029/2005JD006717, 2006a.
- Pérez, C., Nickovic, S., Baldasano, J.M., Sicard, M., Rocadenbosh, F., Cachorro, V.E.: A long Saharan dust event over the western Mediterranean: Lidar, sun photometer observations and regional dust modelling, *Journal of Geophysical Research*, 111, D15214, doi:10.1029/2005JD006579, 2006b.