



**SISTEMA INTEGRAL DE VIGILANCIA, PREDICCIÓN E INFORMACIÓN
DE LA CONTAMINACIÓN DE MADRID**

**La última tecnología para cuidar
el Medio Ambiente de Madrid**



**Área de Medio Ambiente
Ayuntamiento de Madrid**

Sistema de predicción de la contaminación atmosférica del Ayuntamiento de Madrid

Joaquín Fernández Castro

Dtor. de Servicios de Gestión de Residuos y Calidad Ambiental.

Área de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Madrid.

Profesor Doctor Roberto San José

Dtor. del Grupo de Modelos y Software para el Medio Ambiente.

Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid

En 1996 el Ayuntamiento de Madrid presentó para su financiación conjunta a la Unión Europea un proyecto llamado *Sistema Integral de Vigilancia, Predicción e Información de la Contaminación Atmosférica de la ciudad de Madrid*.

Dicho Proyecto fue aprobado por la Comisión y se desarrolló a partir de 1997. El proyecto, cuyo coste ha superado los mil trescientos millones de pesetas, (80% aportación del Fondo de Cohesión de la Unión Europea) incorporaba las actuaciones que se recogen en el presente artículo.

Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica

Integrada por 25 estaciones remotas capaces de medir todo tipo de contaminantes químicos, partículas en suspensión, radiación ultravioleta, niveles sonoros, además de parámetros meteorológicos como temperatura, humedad relativa, presión y velocidad del viento.

Las estaciones, conectadas continuamente en tiempo real, permiten conocer de forma precisa la situación del aire en diversas zonas de la capital.

Se complementa con una red meteorológica básica compuesta por

más de 30 estaciones. Los sondeos realizados ex profeso mediante equipo de sódar permiten conocer perfiles de temperatura y los componentes del viento hasta 2.000 m. de altitud.

El Inventario de Emisiones Contaminantes

En realidad, se trata de una contabilidad llevada a cabo individualmente para el conjunto de contaminantes, que describe todo lo que se emite a la atmósfera en todo el Término Municipal de Madrid. Las emisiones se agrupan en cuadrículas de

250m x 250m contabilizándose más de 10.000 cuadrículas. Proporciona además información detallada en lo que se refiere a la variación de emisiones en el tiempo. Estudia y considera todas las actividades emisoras y más de treinta contaminantes, ofreciendo una estimación de las emisiones anuales por contaminante, los ratios de emisión por habitante o por superficie, y las emisiones de vehículo por kilómetro recorrido. Es, sin duda, el Inventario más detallado de los realizados en Europa.

El Sistema de Información Medioambiental

Este es un servicio que permite a ciudadanos, empresas e instituciones tener acceso a la información que sobre medio ambiente dispone el Ayuntamiento de Madrid. Así, informa sobre planes, programas, niveles de contaminación, situaciones de alerta, actuaciones en parques y jardines, saneamiento de aguas, residuos, etc.

Dispone de diferentes instrumentos: centro de recepción de llamadas, 20 puestos de información, 40 paneles informativos, Internet y correo electrónico programado a medios de comunicación.

Su finalidad es cumplir con las Directivas de la Comunidad Europea referentes a información y acceso a la misma, así como la concienciación de la población.

Sistema de Predicción

Éste es realmente el objetivo del

presente artículo. El proyecto fue adjudicado mediante concurso público a la Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas, S.A., (S.I.C.E.), que contó para su realización con el



asesoramiento y colaboración del Grupo de Modelos y Software para el Medio Ambiente de la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid, cuyo titular es D. Roberto San José. Es una aplicación matemática que reproduce la dinámica del flujo atmosférico durante un tiempo determinado y permite conocer las concentraciones de los contaminantes gaseosos en el tiempo (24-72 horas) y en el espacio (hasta 1 Km de resolución espacial).

"El Sistema de Información Medioambiental es un servicio que permite a ciudadanos, empresas e instituciones acceder a la información que sobre medio ambiente dispone el Ayuntamiento de Madrid"

El presupuesto fue superior a los ciento cincuenta millones de pts.

El Sistema de Predicción de la Calidad del Aire del Municipio de Madrid

está basado y adaptado del denominado modelo OPANA. OPANA se corresponde con las iniciales en inglés: Operational Atmospheric Numerical Air Pollution Model for Urban and Regional Areas.

La figura muestra el logotipo del sistema para el Municipio de Madrid.

El modelo OPANA es un Sistema de Predicción de la Calidad del Aire que ha sido diseñado como una herramienta operacional para uso de las Oficinas de Medio Ambiente de los Municipios y Regiones en España

(y en todo el mundo) con el objetivo de predecir los niveles de concentración de diversos contaminantes en entornos urbanos y regionales, en entornos tridimensionales, y con un horizonte temporal de 24-48 horas. Existe abundante bibliografía científica que documenta extensamente las características de dicha aplicación. En el presente documento nos referiremos únicamente a las partes más importantes de dicha aplicación. Se recomienda al lector la revisión de los textos mencionados para mayores detalles.

Así, podemos destacar que el núcleo central del sistema está constituido por un modelo de diagnóstico y pronóstico de las diferentes variables meteorológicas, como: viento (vector), temperatura y humedad. Estas variables se calculan mediante la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales – sistema de Navier-Stokes – que permite – conocidos unos valores de dichas variables en un instante inicial (o eventualmente en diferentes instantes o incluso en el tiempo o en el espacio), que general-

mente se toman de un sondeo meteorológico o de las salidas de otros modelos meteorológicos que se ejecutan sobre dominios superiores (España, Europa, etc.)- conocer dichas variables en un dominio tridimensional – en nuestro caso un cubo de 6 Km de alto y 80 x 100 Km de base – y a lo largo de período de simulación que hemos determinado – en nuestro caso es de 120 horas -.

Cuando el modelo funciona como herramienta de predicción, la restricción más importante es el tiempo de ejecución y la arquitectura computacional sobre la que se ejecuta. El modelo meteorológico es el módulo esencial del sistema – junto con el módulo químico CHEMA -. El módulo meteorológico incluye la solución de la ecuación de transporte que esencialmente consta de un término de inercia (temporal), un término de advección (transporte) y un término de difusión (transporte). Dichos términos se deben igualar a los términos de emisión de sustancias (EMIMA), deposición de sustancias (DEPO, condición de contorno inferior de las ecuaciones de Navier-Stokes) y la producción y consumo de especies (CHEMA). El módulo meteorológico y de transporte se denomina REMEST y está basado en el modelo desarrollado en la Universidad de Karlsruhe (Alemania) en 1989 por T. Flassak y N. Moussiopoulos (MEMO) (Flassak T. and Moussiopoulos N. (1987), así como en el modelo MM5 (Grell G.A. et al. (1994)) desarrollado en la Universidad del Estado de Pensilvania (EE.UU.) en 1994. El modelo de deposición (DEPO) está basado en los trabajos de Wesely (1989) y San José et al. (1994, 1999). El sistema de predicción aquí descrito es de tipo Euleriano, lo que permite un seguimiento e identificación sobre coordenadas fijas de las concentraciones de los contaminantes en todo momento.

El modelo simula el flujo atmos-

férico sobre un dominio exterior amplio de 80x100 Km con 5 Km de resolución, y a continuación simula el flujo atmosférico para un dominio anidado al anterior que recoge íntegramente el área del Municipio de

"El modelo OPANA es un Sistema de Predicción de la Calidad del Aire que ha sido diseñado como una herramienta operacional para uso de las Oficinas de Medio Ambiente de los Municipios y Regiones, con el objetivo de predecir los niveles de concentración de diversos contaminantes "

Madrid (24 x 24 Km, con 1 Km de resolución). El Sistema de Predicción requiere además una información detallada y fehaciente de los tipos de usos del suelo – no sólo del Municipio sino también de su entorno -. Hemos utilizado información procedente del satélite LANDSAT-VII. Los usos del suelo son esenciales para los siguientes módulos:

1. Módulo meteorológico (vientos locales, influencia de terreno montañoso en el entorno, etc.)

2. Módulo de deposición: la de-

"El sistema de previsión de calidad del aire del Municipio de Madrid utiliza un novedoso sistema de incorporación de información meteorológica procedente de modelos de dominios superiores. "

posición de los contaminantes es un proceso extraordinariamente complejo. Depende al menos de tres importantes elementos: a) condiciones turbulentas de la atmósfera en los últimos metros del proceso de deposición, b) situación de cambio de es-

tado (gaseoso / sólido) y c) del tipo de vegetación o suelo que el contaminante encontrará en su proceso de deposición.

3. Módulo de emisiones: antropogénicas y biogénicas. Las emisiones biogénicas dependen del tipo de especie arbórea que se encuentra en la superficie, así como de la radiación solar y la temperatura. En la medida en que los usos del suelo reproduzcan lo más fielmente la realidad (olivos, árboles de hoja caduca, etc.) las emisiones biogénicas, extraordinariamente importantes para la modelización de contaminantes secundarios como el ozono, serán más y más precisas.

El módulo químico, CHEMA, es el segundo módulo fundamental del sistema: permite el cálculo de las especies secundarias (como el Ozono y el PAN –peroxiacetilnitrato-) que se producen por reacciones químicas en la atmósfera. Debido a que estas reacciones dependen de las variables meteorológicas correspondientes (temperatura y radiación solar), es necesario que CHEMA funcione como subrutina de REMEST mediante un conjunto de librerías creadas al efecto. Las reacciones químicas de nuestra aplicación son aquellas descritas por Gery et al. (1989) y conocidas como CBM-IV (versión simplificada) que utiliza 79 reacciones químicas y 39 especies. Para cada una de estas especies, así como para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales (ordinario en este caso), CHEMA utiliza el método SMVGEAR (Sparse Matrix Vector GEAR technique). SMVGEAR fue desarrollado por Jacobson M.Z. et al. (1994) en la Universidad de Los Angeles (EE.UU.) y es un método caro computacionalmente pero muy preciso (debido a que es un método implícito).

El modelo requiere esencialmente cinco fuentes de datos para su ejecución:

1) Sondeo inicial meteorológico

(obtenido cada 12 horas por el Instituto Nacional de Meteorología en el Aeropuerto Internacional de Madrid-Barajas);

2) Datos de la red de inmisión del área de estudio (en nuestro caso los datos de inmisión del Municipio de Madrid y de su entorno);

3) Usos del suelo del dominio de nuestra aplicación (en este caso más del 80 por ciento del tiempo de computación se dedica al transporte de un mapa de usos del suelo generado por imágenes LANDSAT-V (Dr. G. Smiatek, Fraunhofer Institute (Alemania), proyecto CORINE) y adaptado por el laboratorio para nuestra aplicación;

4) Modelo Digital del Terreno (DEM) (se utiliza un modelo generado por la base de datos GTOPO con 30" – aprox. 925 m x 709 m para la latitud de Madrid - de resolución para todo el mundo);

5) Emisiones de contaminantes en el área de estudio con al menos la resolución espacial de ejecución de la simulación y temporal de una hora (se utiliza el modelo EMIMA desarrollado en el Laboratorio y basándose en la metodología CORINE (Unión Europea). El modelo EMIMA es una herramienta para el cálculo de las emisiones antropogénicas y biogénicas en el área de Madrid. La versión EMIMO es una herramienta similar pero de propósito general –para aplicarse en cualquier dominio–.

Las emisiones biogénicas, por ejemplo, requieren de información georeferenciada de tipos de vegetación de elevada resolución espacial y temporal. Así, la herramienta EMIMA utiliza un conjunto amplio de ficheros de usos del suelo en función de las aplicaciones a que se destinen. El sistema de previsión de la calidad del aire utiliza información procedente

de un sistema de modelización de las emisiones EMIMO, que se adapta al dominio madre y anidado. En este caso, el modelo de emisiones incorpora aquellas producidas por la empresa AED para el Municipio de Madrid.

Desde el punto de vista de la previsión en sí, el sistema de previsión de calidad del aire del Municipio de Madrid utiliza un novedoso sistema de incorporación de información meteorológica procedente de modelos de dominios superiores y que por razones computacionales no se pueden ejecutar en tiempo real en la propia máquina del sistema. En este sentido, la aplicación incorpora información procedente del sistema americano MRF / AVN del NCAR / NOAA en los Estados Unidos.



El Modelo MRF/AVN se ejecuta diariamente de forma operativa sobre resoluciones de 181 y 110 Km sobre todo el mundo y con horizontes de pronóstico hasta de 12 días. El laboratorio extrae diariamente de INTERNET hasta 48 sondeos correspondientes con estas previsiones y los incorpora automáticamente a la inicialización del sistema de previsión de la calidad del aire del Municipio de Madrid. El sistema además incorpora un conjunto importante de visualizadores de la información para permitir al usuario de forma rápida acceder a la ingente cantidad de datos que diariamente genera un sistema de estas características. Así, el sistema incorpora el visualizador VIS5D, así como el visualizador FERRET, que permite observar las imágenes superficiales de las concentraciones de los diferentes contaminantes sobre el área del Municipio de Madrid.

Referencias

- *Flassak T. and Moussiopoulos N. (1989). Simulation of the sea breeze in Athens with an efficient non-hydrostatic mesoscale model. In: Man and his ecosystem., Vol. 3, Eds. L.J. Bras-ser and W.C. Mulder. Elsevier. Amsterdam. 189-195.*
- *Grell, G.A., Dudhia, J. And Stauffer D.R. (1994). A description of the fifth-generation Penn State / NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398-STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 138 pp.*
- *Jacobson M.Z. and Turco R.P. (1994) SMVGEAR: A sparse-matrix vectorized gear code for atmospheric models. Atmospheric Environment, 28, 273-284.*
- *San José R., Rodríguez L. and Moreno J. (1994). An application of the "Big Leaf" deposition approach to the mesoscale meteorological transport and chemical modelling in a three dimensional context. Proceedings of the EUROTRAC Symposium. Eds. Borrel P.M., Borrell P., Cvitas T. and Seiler W. 620.*
- *San José R., Rodríguez M.A., Pelechano A. and González R.M. (1999). Sensitivity studies of dry deposition fluxes. In Measuring and Modelling. Investigation of Environmental Processes. WITpress Computational Mechanics Publications. ISBN: 1-853125660. Ed. R. San José. 205-246.*
- *Wesely M. L. (1989). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmospheric Environment, 23, 1293-1304.*