

# SAGA: SISTEMA DE APOYO A LA DECISION PARA LA GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE

Marcos Hermida Mera <sup>(1)</sup>, José Antonio Souto González <sup>(1)</sup>, José Luis Bermúdez Cela <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela,  
c/ Lope Gómez de Marzoa, s/n, Campus Sur, 15782 Santiago de Compostela, España,  
jasouto@usc.es

<sup>(2)</sup> Sección de Medio Ambiente, UPT As Pontes, Endesa Generación S.A.  
Areosa, s/n, 15320 As Pontes de García Rodríguez, España

## RESUMEN

Desde la aplicación de los modelos de predicción meteorológica para la previsión del tiempo, la necesidad de simulaciones meteorológicas específicas para el cálculo de la dispersión y la transformación química de los contaminantes atmosféricos, unida a la complejidad de estos procesos, han retrasado el empleo de sistemas de predicción de la contaminación atmosférica basados en modelos físicos y químicos.

A partir de la experiencia adquirida con una de las primeras aproximaciones de modelización orientada al emisor aplicadas a la predicción de la contaminación atmosférica (Souto et al., 1996; Souto et al., 1998), se ha desarrollado un nuevo Sistema de Apoyo a la decisión para la Gestión de la calidad del Aire, SAGA, para proporcionar apoyo al personal de una central térmica para la generación de energía eléctrica. SAGA es un sistema operacional para la predicción de la contaminación atmosférica y el análisis de datos atmosféricos aplicable en el entorno de focos emisores puntuales. SAGA suministra predicciones a 1, 2 y 3 días de la evolución horaria de los parámetros locales más significativos para la calidad del aire, tanto meteorológicos como de los contaminantes atmosféricos; estos resultados se presentan mediante varios informes diseñados con el fin de proporcionar información útil al personal de la central térmica. Además, las medidas meteorológicas y de calidad del aire disponibles en el entorno local también están accesibles a través de SAGA, con el fin de confirmar o corregir las decisiones basadas en las predicciones adoptadas por el personal de la central térmica.

En este caso, debido al retardo que las decisiones que adopte la central térmica en su operación tiene en el mantenimiento de la calidad del aire en su entorno local dentro de los estándares permitidos, el análisis de medidas meteorológicas y de calidad del aire resulta insuficiente, por lo que las decisiones de la central térmica tienen que basarse en los resultados de los modelos meteorológicos y de calidad del aire incorporados en SAGA.

## INTRODUCCION

La Unidad de Producción Termoeléctrica As Pontes (UPT As Pontes) es una central térmica de carbón de 1400 MW ubicada al Norte de Galicia en Galicia, y que actualmente consume una mezcla de lignito local (hasta un 2 % de azufre) y carbón foráneo (con menos de un 0,1 % de azufre). Los gases de combustión se emitidos a través de una chimenea de 356 m de altura, con el fin de prevenir la existencia de episodios de contaminación atmosférica a nivel del suelo, episodios de inmisión. Sin embargo la compleja orografía y la influencia atlántica pueden favorecer la aparición de condiciones meteorológicas que originen un empeoramiento de la calidad del aire.

El desarrollo de sistemas de predicción de la contaminación atmosférica en la UPT As Pontes, basados en modelos orientados al foco emisor, comenzó en la última década del siglo XX. El principal objetivo de estos sistemas basados en modelos era el de predecir, con al menos 24 horas de antelación, la posible aparición de condiciones meteorológicas que favoreciesen el empeoramiento de la calidad del aire debido a las emisiones de SO<sub>2</sub> de la central térmica. Como resultado, se podían prevenir con al menos 24 horas de antelación las alertas por episodios de inmisión por SO<sub>2</sub> y planificar los cambios necesarios en la operación de la planta (reducción de producción, cambio de la mezcla de carbones).

El trabajo se inicio en 1990 con un estudio del estado del arte en materia de modelización meteorológica y de dispersión de penachos de contaminantes (Souto et al., 1994) que pudiesen ser aplicados de forma operacional para prevenir la calidad del aire en entorno local alrededor de una planta industrial, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo de cálculo existentes. Las primeras conclusiones fueron:

- Las predicciones meteorológicas operacionales disponibles no podían proporcionar campos meteorológicos suficientemente precisos en la capa límite atmosférica como para su acoplamiento a modelos dispersión de penachos, por lo que

se requería la aplicación de un modelo meteorológico a micro-mesoescala.

- Algunos modelos Lagrangianos de puffs avanzados, así como los modelos Lagrangianos de partículas, eran los más adecuados para la simulación de la dispersión de un penacho de contaminantes en un entorno local.
- La complejidad de los modelos empleados (especialmente, del modelo meteorológico) esta limitada por la capacidad de cálculo disponible y el tiempo de respuesta requerido en el marco operacional de una planta industrial. En aquel momento, la capacidad de cálculo se limitaba a una estación de trabajo UNIX en el entorno de 1 Mflop de potencia pico.

Con estas consideraciones, se desarrolló un sistema de predicción de la dispersión de penachos (Souto et al., 1996; Souto et al., 1998) que comenzó a operar en 1994 en la UPT As Pontes. Este sistema incluía un módulo de emisiones (basado en balances de material aplicados a la UPT As Pontes), un modelo meteorológico hidrostático acoplado a la predicción meteorológica numérica (HIRLAM 1°) del Instituto Nacional de Meteorología y una versión operacional del Adaptive Puff Model (APM, Ludwig y col., 1989) para la estimación de la dispersión del penacho. Los resultados de los modelos se analizaban mediante un interfaz gráfico (GUI) sobre entorno X-window, así como las series temporales y mapas meteorológicos y de calidad del aire obtenidos. El uso de este primer sistema y el análisis de sus resultados requería un buen conocimiento y experiencia tanto en GUI (sobre sistemas UNIX) como en modelos meteorológicos y de calidad del aire. En consecuencia, se hacía necesario que un experto en el uso del sistema proporcionase al personal de la central térmica las recomendaciones oportunas con el fin de prevenir posibles episodios de inmisión.

Con el incremento de la capacidad de cálculo de los ordenadores personales, se consideró la posibilidad de portar el sistema a entorno MS-Windows. Al mismo tiempo, la experiencia acumulada en el análisis de datos para la toma de decisiones en materia de calidad del aire permitiría seleccionar los conjuntos de datos meteorológicos y de calidad del aire más relevantes, con el fin de agruparlos en informes para la central térmica generados automáticamente. Sobre estas ideas se desarrolla SAGA, Sistema de Apoyo a la decisión para la Gestión de la calidad del Aire, que comienza a operar en pruebas en el año 2003.

En este trabajo se describe el paquete software SAGA y sus distintos módulos, incluyendo las posibilidades del SAGA para su adaptación a diferentes entornos y modelos numéricos. A modo de ejemplo, se presenta la adaptación del SAGA a al problemática ambiental de la UPT As Pontes en

materia de calidad del aire. Posteriormente, se incluyen otras propuestas de extensión de SAGA que permitirán abordar nuevos problemas relacionados con la calidad del aire en distintos entornos. Finalmente, se presentan las principales conclusiones de este trabajo.

## LOS MODELOS NUMERICOS EN SAGA

Como un sistema de apoyo a la decisión orientado a la gestión de la calidad del aire alrededor de un foco emisor puntual, SAGA está configurado por la combinación de tres tipos de modelos:

- a) Modelo de emisiones, que estima el caudal de gases y las emisiones procedentes del foco emisor puntual, dependiendo de la planificación operacional de la planta. En la UPT As Pontes, esto se basa en un modelo de combustión de carbón, que estima el caudal y composición de los gases de combustión en función de las mezclas de carbones previstas y la potencia eléctrica que se desea generar en los días siguientes.
- b) Un modelo meteorológico meso- $\beta$ , que proporciona una predicción meteorológica de alta resolución, con especial interés en los parámetros meteorológicos más directamente relacionados con la dispersión de penachos. En la UPT As Pontes se han ensayado dos modelos, ARPS (Balseiro et al., 2001) y MM5 (Grell et al., 1995). Actualmente ARPS es el modelo operacional, proporcionando una predicción meteorológica numérica de alta resolución con un horizonte de al menos 24 horas y abarcando un area de al menos 30 km alrededor de la central térmica. Recientemente, Saavedra y col. (2005) han comparado los resultados del modelo ARPS con mallas de 2 y 10 km de resolución horizontal, sin que se apreciase diferencias significativas en los parámetros meteorológicos de interés.
- c) Un modelo Lagrangiano de dispersión atmosférica, que estima la dispersión de contaminantes primarios alrededor del foco emisor. En la UPT As Pontes, la dispersión de las emisiones de SO<sub>2</sub> se puede estimar mediante dos modelos Lagrangianos distintos: Con SAGA se puede estimar la dispersión de contaminantes primarios mediante dos modelos lagrangianos distintos: Adaptive Puff Model 2 (APM2, Souto y col., 2000) y Lagrangian Particle Model (Souto y col., 2001; Penabad y col., 2002). Ambos modelos se encuentran en fase de prueba, por lo que sus resultados no son concluyentes para la operación de la central térmica.

Como resultados más significativos, cada modelo meteorológico proporciona predicciones con un horizonte de hasta 3 días (en valores horarios y medias de 6 horas) de los parámetros específicamente seleccionados sobre la localización del foco emisor y en otras localizaciones a su alrededor. Los parámetros seleccionados son:

Viento, temperatura, gradiente vertical de temperatura, radiación solar y cobertura nubosa. Además, los modelos Lagrangianos pueden suministrar predicciones de inmisión horaria a lo largo del día siguiente en localizaciones específicas alrededor del foco emisor.

## EL INTERFAZ SAGA

En lo que se refiere a su relación con el usuario, SAGA es un paquete software modular que consta de un sistema de almacenamiento de datos,

implementado sobre *oracle 8i*, y que proporciona el acceso a dicha información mediante dos vías:

- a) Interfaz de escritorio en plataforma MS-Windows, desde la cual además del acceso a los datos y la generación de informes, se permite la configuración de determinados parámetros de la operativa como la modificación de los caudales de emisiones, repetir las ejecuciones de los modelos.
- b) Interfaz web, que proporciona acceso remoto y directo a los informes diseñados específicamente según las necesidades del foco emisor.

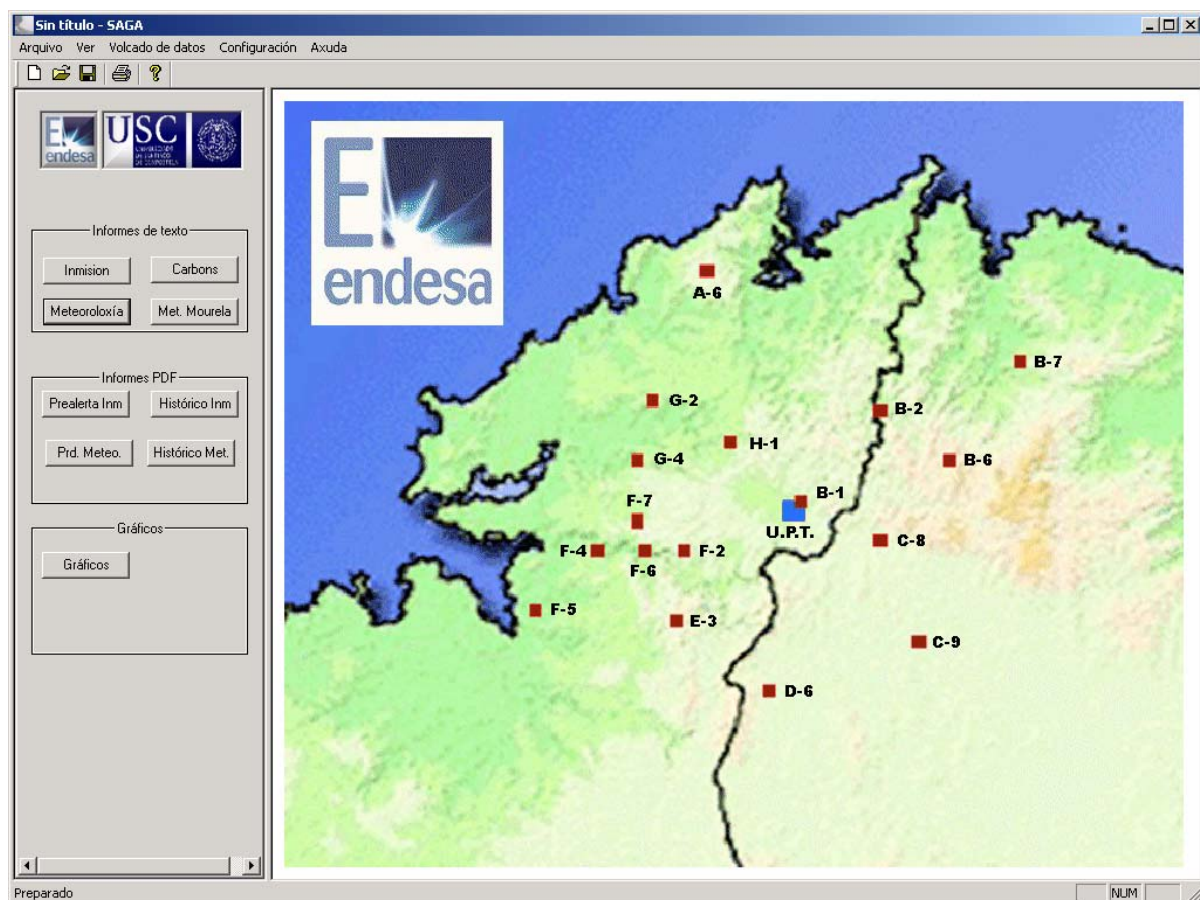


Fig. 1. SAGAwin: Ventana principal, incluyendo la Barra de Menu de MS-Windows, el Panel de Control, la Ventana Activa y la Barra de Estado.

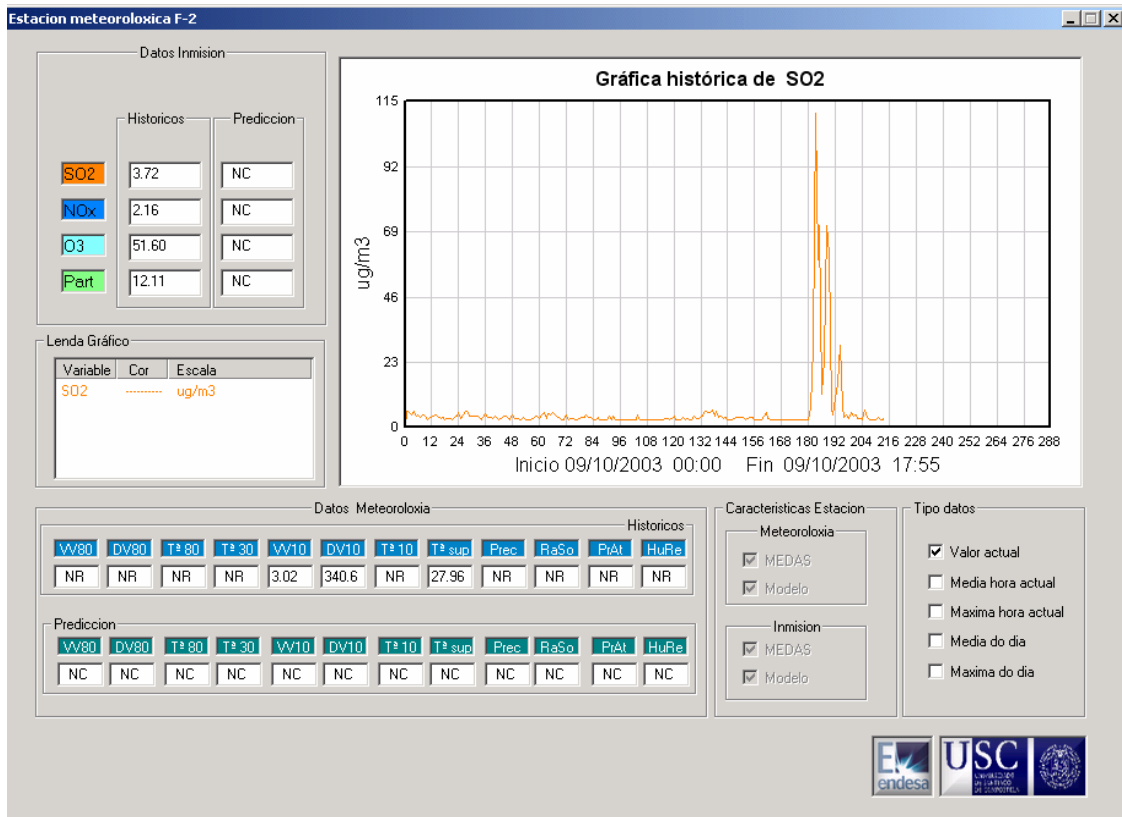


Fig. 2. SAGawin: Inmisión de SO<sub>2</sub> medida (promedios 5-minutales) en una estación durante el 9 de Octubre de 2003.

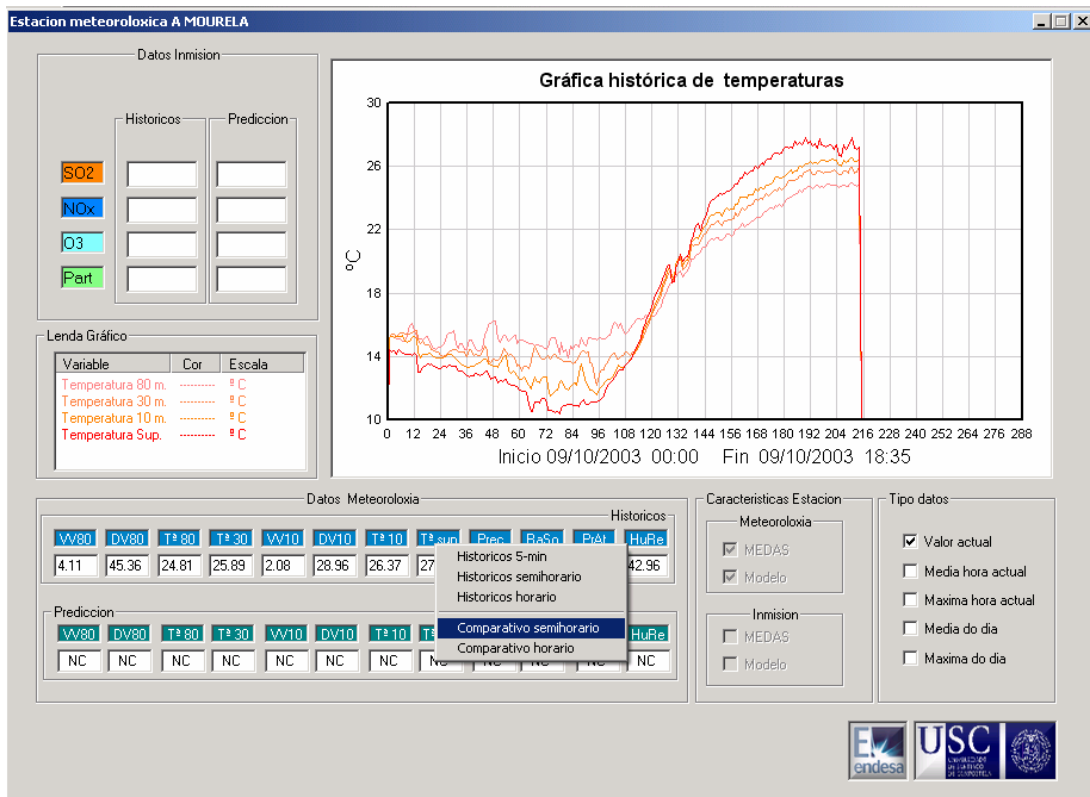


Fig. 3. SAGawin: Temperaturas medidas (promedios 5-minutales) en la torre meteorological de 80 m de A Mourela próxima a la UPT As Pontes, a cuatro niveles (2, 10, 30 y 80 m), durante el 9 de Octubre de 2003.

La fig. 1 muestra la ventana principal de SAGAwin, con el clásico menú MS-Windows, un Panel de Control para el acceso directo a informes gráficos o de texto, una Ventana Activa (con el entorno de la UPT As Pontes) para mostrar los informes que seleccione el usuario una Barra de Estado para mostrar cualquier incidencia. En el entorno de la UPT As Pontes se encuentran indicadas las ubicaciones de las estaciones de medida, tanto las

meteorológicas como las de calidad del aire (inmisión).

Los informes gráficos de SAGAwin permiten combinar tanto medidas como predicciones meteorológicas o de calidad del aire. En las figs. 2 y 3 se muestran ejemplos de estos informes, correspondientes a la inmisión de SO<sub>2</sub> medida en una estación y a las temperaturas medidas en cuatro niveles distintos de la torre meteorológica de 80 m ubicada en las proximidades de la UPT As Pontes.



Fig. 4. SAGAweb: Página principal, mostrando un Informe de Predicción Meteorológica en la estación A Mourela para el 21 de Junio de 2005 (obtenido el 20 de Junio). Informes análogos para los días 20 y 22 de Junio también están disponibles en hasta 6 localizaciones distintas alrededor de la UPT As Pontes.

En el caso de la UPT As Pontes (Souto et al., 2005), es la interfaz web la que puede emplear el personal de la central térmica para obtener la información que le sirva de apoyo a la decisión. De forma automática, se generan y publican en un servidor web privado (fig. 4) informes análogos sobre seis localizaciones previamente seleccionadas alrededor de la UPT As Pontes, para el día de hoy (día de publicación de la predicción), mañana y el tercer día. Estos informes están específicamente diseñados para servir de ayuda en la prevención de episodios de inmisión por SO<sub>2</sub> en el entorno de la UPT As Pontes, con el fin de evitar la aparición de los mismos.

## RESULTADOS

### La UPT As Pontes

Actualmente, la UPT As Pontes quema diariamente una mezcla de lignito local (con porcentajes de azufre de alrededor del 2 %) y carbón foráneo (con

menos de un 0,1 % de azufre). Sus emisiones se producen desde una chimenea de 356 m de altura, con el fin de reducir los episodios de inmisión, lo que supone una complejidad adicional en la estimación de la dispersión.

Cada día, la central térmica precisa evaluar la conveniencia de cambiar la mezcla de carbones para el día siguiente, teniendo en cuenta el riesgo de empeoramiento local de la calidad del aire (debido a la aparición de episodios de inmisión por SO<sub>2</sub>). Este riesgo de inmisión está relacionado con los siguientes parámetros meteorológicos que suministra SAGA:

**Velocidad del viento:** Vientos flojos favorecen la mezcla de una emisión a gran altura, como la producida en la UPT As Pontes, reduciendo el riesgo de inmisión. En consecuencia, vientos en superficie por encima de 9 m/s pueden condicionar un empeoramiento de la calidad del aire.

**Temperatura:** Una elevada temperatura superficie (respecto de la temperatura en altura) generalmente

favorece la formación de penachos convectivos, incrementando el riesgo de inmisión.

Nubosidad y radiación solar: Elevada radiación solar y cielo despejado son condiciones favorables para la formación de penachos convectivos, con el mismo resultado.

*Gradiente vertical de temperatura a baja altura:* El gradiente de temperatura entre 80 y 30 m constituye una medida directa de la estabilidad atmosférica a baja altura; dado que este parámetro se mide y analiza desde hace años en la UPT As Pontes, su personal puede aplicarlo a la identificación del riesgo de empeoramiento de la calidad del aire.

*Gradiente vertical de temperatura en altura:* El gradiente de temperatura entre 800 y 500 m constituye una medida directa de la estabilidad atmosférica en los estratos correspondientes a la altura efectiva de emisión del penacho de la UPT As Pontes. Junto con el gradiente de temperatura a baja altura, su valor puede ayudar en la identificación de la influencia de inversiones térmicas sobre la dispersión del penacho y, en consecuencia, sobre la calidad del aire local.

Antes de las 9 am la UPT As Pontes dispone de un nuevo Informe de Predicción Meteorológica (fig. 4), que abarca el mismo día, el siguiente y el tercer día. A partir de su análisis es posible planificar cambios en la operación de la central térmica para el día siguiente. Así, habitualmente la UPT As Pontes opera con una mezcla 70:30 de lignito pardo local y carbón subbituminoso foráneo, pero sus calderas están preparadas para operar con hasta el 100 % de carbón foráneo en períodos de unas horas. Sin embargo, el cambio de combustible debe realizarse de manera gradual, con el fin de prevenir fallos en los sistemas de combustión originados por las propiedades diferenciadas de ambos carbones (poder calorífico, inertes). De esta forma, se hace necesaria una planificación de estos cambios con varias horas de antelación, para que resulta de gran ayuda la predicción de las condiciones meteorológicas que pueden favorecer la aparición de episodios de inmisión.

#### *Extensión de SAGA*

Dado que SAGA actualmente está adaptado a su aplicación específica en la UPT As Pontes, se ha planteado la necesidad de dotarlo de una mayor portabilidad, en el sentido de una mejor adaptación a otras condiciones de operación de la propia central térmica y de otros focos diferentes que se puedan considerar. Así, la UPT As Pontes se encuentra actualmente en un proceso de transformación de sus instalaciones de combustión que le permitirá consumir el 100 % de carbón subbituminoso de forma rutinaria, con lo que las emisiones de SO<sub>2</sub> se verán drásticamente reducidas. Otros contaminantes atmosféricos, sin embargo, pueden resultar de interés en esta y otras instalaciones industriales.

En esta extensión del desarrollo de SAGA se ha realizado un análisis de requisitos de aplicación para, basándose en el mismo, diseñar una serie de módulos que permiten incorporar nuevos modelos y ampliar la diversidad de entornos de aplicabilidad de SAGA.

Dentro de este análisis se ha considerado la necesidad de incorporar a SAGA tanto modelos de inventarios de emisiones atmosféricas como modelos exhaustivos de calidad de aire, de manera que permitan la simulación del comportamiento de los contaminantes atmosféricos a las más diversas escalas y en múltiples entornos. Por otra parte, también se ha considerado el rediseño del sistema de almacenamiento de información de SAGA, de manera que permita georeferenciar los datos para su posterior visualización a través de una herramienta basada en GIS.

En lo que se refiere a la integración de nuevos modelos, se han realizado ensayos preliminares con:

- Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) (ENVIRON, 2005), que permite realizar simulaciones de la dispersión de contaminantes primarios y secundarios en un amplio rango de resoluciones espaciales.
- Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) (Vukovich et al., 2001), herramienta para la generación e integración de inventarios de emisiones, considerando tanto focos puntuales como de área, adaptada a su aplicación en modelos de calidad del aire.

En lo que se refiere al rediseño de los sistemas de almacenamiento, dado que actualmente se precisa un procesado de toda la información generada por los modelos antes de mostrarla al usuario final, se están desarrollando módulos de aplicación para su integración en el sistema. Es de reseñar en este punto la importancia de adoptar un formato único de la información para su posterior uso en SAGA, lo que permitirá una adaptación sencilla a diferentes entornos. Se ha adoptado como referencia el formato NetCDF (Network Common Data Form, <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/>), debido a su gran portabilidad y su fácil manejo, tanto para el volcado de información a la base de datos como para su posterior explotación mediante herramientas basadas en GIS.

La integración de nuevos modelos, junto al almacenamiento georeferenciado de la información, confieren a SAGA de las funcionalidades deseadas.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión para la gestión de la calidad del aire aplicado al entorno de un foco emisor puntual. Este sistema, denominado SAGA, es capaz de suministrar predicciones meteorológicas y de calidad del aire con al menos un día de antelación al personal de la UPT As Pontes, como foco singular

en el que se ha aplicado, a fin de les sirva de ayuda en la planificación de la operación de la Central.

Dentro de los diferentes informes elaborados por SAGA destaca por su utilidad un informe de predicción meteorológica específicamente adaptado a las necesidades del foco emisor. Los parámetros meteorológicos incluidos en este informe (relacionados con el transporte y dinámica del penacho local) pueden ser analizados por el personal de la Central con el fin de decidir sobre la mezcla de carbones a emplear al día siguiente. La programación de la mezcla permite reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> a fin de evitar posibles episodios de inmisión.

Aunque SAGA está actualmente desarrollado para gestionar la contaminación atmosférica primaria, se prevé incorporar modelos exhaustivos de calidad del aire que permitan al evaluación de contaminantes secundarios (como el ozono troposférico). Con el fin de dar respuesta a las necesidades de estos nuevos modelos, otras alternativas de software basadas en GIS para la gestión y visualización de los resultados de los modelos y la elaboración de informes, se han prevén incorporar a sucesivas versiones de SAGA. Además, estas nuevas versiones servirán como herramientas no solo operacionales sino también de análisis episódico para el estudio de situaciones históricas y la validación de modelos.

## REFERENCIAS

Balseiro, C.F., Souto, M.J., Pérez-Muñuzuri, V., Xue, M., Brewster, K., 2001. Operational numerical weather forecast in Galician Region (Spain) by using a non-hydrostatic numerical model. In: 26<sup>th</sup> EGS General Assembly, Nice (France), March 2001.

ENVIRON International Corporation, 2005. User's Guide – CAMx – Comprehensive Air Quality Model with Extensions. Novato, California. 2005.

Penabad, E., Pérez-Muñuzuri, V., Souto, J.A., Casares, J.J., Bermúdez, J.L., Ludwig, F.L., 2002. A comparison of Lagrangian dispersion models coupled to a meteorological model for high stack air pollution forecast. En: Air Pollution 2002, Segovia (Spain), 1-3 July 2002.

Souto, J.A., Pérez-Muñuzuri, V., de Castro, M., Souto, M.J., Casares, J.J., 1996. Forecasting and real-time simulation of plume transport around a Power Plant. En: V International Conference on Atmospheric Sciences and its Application to Air Quality, Seattle (USA), June 1996.

Souto, M.J., Souto, J.A., Pérez-Muñuzuri, V., Casares, J.J., Bermúdez, J.L., 2001. A comparison of operational Lagrangian particle and adaptive puff models for plume dispersion forecasting. Atmospheric Environment 35, 2349-2360.

Souto, J.A., Hermida, M., Casares, J.J. Bermúdez, J.L., 2005. SAGA: A Decision Support System for Air Pollution Management around a Coal Fired Power Plant. In: 3<sup>rd</sup> International Symposium on Air

Quality Management at Urban, Regional and Global Scales, Istanbul (Turkey), 26-30 September 2005.

Vukovich, J., McHenry, J., Coats, C. and A. Trayanov, 2001. Supporting Real-Time Air Quality Forecasting using the SMOKE modeling system. April 30-May 2, Denver, CO, EPA Emissions Inventory Conference.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo y aplicación del SAGA en la UPT As Pontes ha sido financiado por la Xunta de Galicia y Endesa Generación S.A., a través del proyecto PGIDT1C05E. Las predicciones meteorológicas del modelo ARPS son suministradas por MeteoGalicia.