

# LA SIMULACION METEOROLOGICA EN EL ESTUDIO DEL ORIGEN ALOCTONO DEL OZONO TROPOSFERICO EN ZONAS RURALES DEL NORTE DE GALICIA

<sup>(1)</sup>S. Saavedra, <sup>(1)</sup>J. A. Souto, <sup>(1)</sup>A.I. Quintana, <sup>(2)</sup>J.L. Bermúdez

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela, c/ Lope Gómez de Marzoa, s/n, Campus Sur, Santiago de Compostela, 15782 (A Coruña) España, +34 981 563 100 Ext. 16757, [jasouto@usc.es](mailto:jasouto@usc.es)

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

## 1. Resumen

La existencia de períodos con elevados niveles de ozono troposférico en el norte de Galicia durante situaciones anticiclónicas es un fenómeno relativamente común en la época estival. Se presenta el análisis de uno de estos episodios, a partir del estudio de las condiciones sinópticas y locales, con apoyo de simulaciones meteorológicas y datos históricos de calidad de aire.

## 2. Introducción

El ozono es uno de los constituyentes atmosféricos naturales, con una concentración promedio muy pequeña en la atmósfera, de unas 0.3 ppm. El 90% de este gas se encuentra en la estratosfera, a unos 20 km de altura, formando parte de la llamada "capa de ozono", mientras el resto forma parte de la troposfera, denominándose ozono troposférico.

El ozono estratosférico es imprescindible para la vida en el planeta, al atenuar fuertemente la radiación solar ultravioleta con longitud de onda inferior a 295 nm, perjudicial para los seres vivos (radiación eritemática). El ozono troposférico actúa como gas de efecto invernadero y, sobre todo, el ozono más próximo a la superficie (ozono superficial), es un gas tóxico en concentraciones elevadas, superiores a las naturales, actuando entonces como un contaminante atmosférico por sus efectos nocivos sobre el medio, dado su carácter oxidante, e incluso con repercusiones importantes sobre la salud humana, afectando principalmente al aparato respiratorio.

La presencia de ozono tiene orígenes diferentes en la estratosfera y en la troposfera. En la estratosfera se forma como resultado de la disociación del O<sub>2</sub> al incidir sobre él la radiación solar de onda corta, mientras en la troposfera tiene origen fotoquímico, a partir de precursores naturales y antropogénicos, aunque también hay una mínima contribución del transporte de la estratosfera a la troposfera [Altshuller, 1986].

El O<sub>3</sub> troposférico es por ello un contaminante secundario, no emitido directamente a la atmósfera, sino formado a partir de reacciones fotoquímicas (en presencia de luz solar) mediante contaminantes primarios, que sí se emiten directamente a la atmósfera. Estos precursores [Jacobson, 2002] son fundamentalmente óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), de origen biogénico (por ejemplo, por la vegetación boscosa) o antropogénico.

La formación fotoquímica cerca del suelo, junto con el transporte regional, representan la contribución más importante al ozono troposférico medido en una red de vigilancia, y constituye un problema común, especialmente en Europa meridional durante el verano [Castell et al, 2003], cuando las condiciones atmosféricas son más adecuadas (temperatura alta, flujos de radiación solar altos, ausencia de viento).

Galicia no es ajena a la tendencia ascensional experimentada por las concentraciones de ozono troposférico en Europa en los últimos 30 años [Logan, 1994], superándose en varias ocasiones a lo largo del año el umbral de información a la población (180 µg/m<sup>3</sup> horarios), generalmente bajo condiciones atmosféricas muy determinadas.

El objetivo general de este trabajo es la identificación y análisis de episodios de ozono troposférico en zonas rurales interiores del norte de Galicia, mediante la recopilación y estudio de la información disponible y la aplicación de modelos meteorológicos para el análisis de posibles trayectorias de O<sub>3</sub> y de sus precursores.

## 3. Descripción de la zona de estudio

La contaminación atmosférica en una escala local o regional está determinada por un gran número de variables, que pueden agruparse en tres grupos: orografía, meteorología y fuentes de precursores. La meteorología, intrínsecamente ligada a la orografía, juega un papel importante en la calidad del aire. La orografía definirá las zonas de

encauzamiento de la masa de aire y la deposición en el suelo. La influencia de las fuentes de precursores se da tanto en la cantidad de emisiones como en su localización. De este modo, la descripción de la zona de estudio, que engloba el Norte de las provincias de A Coruña e Lugo, deberá incluir estos tres grupos.

### *Orografía*

El área de estudio (fig. 1) considerada se caracteriza por un relieve muy accidentado, con grandes contrastes. El núcleo central estaría formado por la depresión de As Pontes, en dirección oeste-este, por la que circula el valle del río Eume. Esta depresión o llanura interior de pequeño tamaño se encuentra rodeada por el relieve suave de la costa atlántica al oeste y por la costa cantábrica al norte, de relieve más abrupto, mientras que al nordeste se sitúan las sierras septentrionales, como la sierra del Xistral, y al este las sierras centro-occidentales (Dorsal Gallega), con cotas que no superan los 1000 m de altura. Al sur el relieve se hace más suave y uniforme, en forma de llanuras elevadas. Por tanto, se trata de un terreno complejo, donde las sierras graníticas alternan con depresiones y valles fluviales.

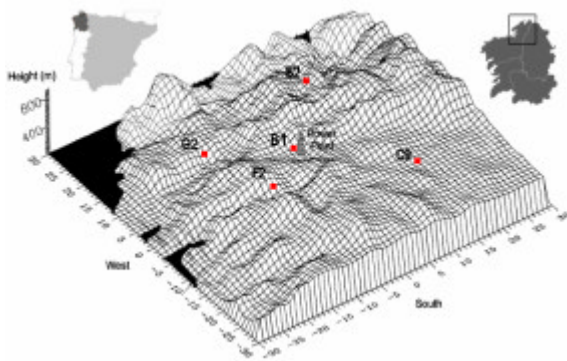


Figura 1: “Representación 3D de la topografía del área de estudio en la caracterización de episodios de ozono y situación de las estaciones de la Red de Vigilancia de Endesa-As Pontes. Las horizontales están en kilómetros”

### *Meteorología*

La región se caracteriza por las abundantes lluvias durante todo el año, estando el volumen anual de precipitaciones entre 1000 y 1600 mm, siendo más intensas desde el otoño a la primavera, y esporádicas en verano, pero no infrecuentes, presentándose generalmente bajo la forma de tormentas aisladas en las tardes. Los veranos son suaves, ya que la brisa marina refresca las áreas costeras y la altitud regula la temperatura en las montañas del interior. Los días estivales son soleados principalmente, con bajo nivel de humedad y temperaturas que alcanzan entre 20 y 30 °C. Por otro lado, las olas de calor son poco

frecuentes en verano y duran solamente algunos días, ya que la cercanía de la costa mantiene las máximas en un nivel entorno a los 20-25 °C, aunque los valles interiores registran frecuentemente temperaturas más cálidas, alrededor de 30 °C.

Los vientos predominantes son del SO y NO en invierno y otoño, con condiciones ciclónicas, mientras en situaciones anticiclónicas propias del verano domina la componente NE. Las interacciones atmósfera-relieve son muy importantes en este ámbito geográfico, destacando las barreras orográficas, con efectos esenciales en la captación de lluvias, y el accidentado relieve litoral, que favorece el sistema de brisas [Martínez Cortizas et al, 1999].

### *Fuentes de precursores de ozono*

Se consideran como precursores principales de ozono troposférico los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles.

Las fuentes de estos precursores situadas en la zona de estudio pueden dividirse en puntuales (industriales) y difusas. Dentro de las fuentes industriales destacan el cinturón industrial del arco ártabro (situado en el litoral oeste, e incluyendo las ciudades de A Coruña y Ferrol), con sectores como refino de petróleo, energético (centrales térmicas y de cogeneración), madera, alimentario y transformación de metal. Existen otras fuentes emisoras más dispersas en la zona de estudio, como centrales térmicas, industrias de gestión de residuos, etc. Como emisiones difusas destacan las emisiones de tráfico y las emisiones biogénicas, producidas por explotaciones ganaderas y, sobre todo, por cultivos forestales (eucalipto, pino, etc).

Sin embargo, al existir transporte de ozono a gran distancia, es necesario tener en cuenta no sólo las fuentes de precursores próximas, sino también aquellas mucho más alejadas, como las existentes en regiones limítrofes (Asturias, Castilla-León, Portugal) e incluso más lejanas.

## **4. Datos recopilados**

El análisis de los episodios requirió el uso de datos de diversa índole, en concreto información meteorológica a escala sinóptica (regional) y local, y datos de calidad de aire.

### *Datos de calidad de aire*

El punto de partida para la selección y análisis de escenarios es la recogida de información de calidad de aire y de parámetros meteorológicos útiles para su interpretación.

Los datos históricos de calidad de aire empleados son las concentraciones horarias de inmisión de O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y NO<sub>2</sub>, a lo largo del trienio 2002-2004.

Estos datos se obtuvieron inicialmente de 10 estaciones incluidas en la Red Gallega de Calidad del Aire, para realizar la identificación y el análisis preliminar de episodios. La mayoría de las estaciones usadas para la identificación son estaciones rurales con influencia industrial o de fondo. Posteriormente, y ante la posible influencia del transporte de ozono alóctono hacia Galicia, se amplió el número de estaciones, incluyendo registros de las regiones limítrofes: 19 estaciones de la Rede de Calidade do Ar de Portugal, 18 estaciones de la Red de Contaminación Atmosférica de Castilla-León y 19 estaciones de la Red de Calidad de Aire de Asturias (sólo datos diarios, en este caso).

Además de los registros experimentales de las redes anteriores, también han sido empleadas las predicciones de inmisión (específicamente NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> y partículas) realizadas por el modelo EURAD (European Air Pollution Dispersion Model), de la Universidad de Colonia [<http://www.eurad.uni-koeln.de> ; Memmesheimer et al., 2001], para facilitar el estudio de la evolución de los niveles de ozono troposférico y óxidos de nitrógeno, sobre todo a efectos comparativos y para aquellas zonas en las que no se disponía de datos.

#### *Datos meteorológicos*

El análisis a escala regional de los episodios se realizó mediante mapas sinópticos, que permitieron caracterizar las situaciones sinópticas que tienen mayor influencia para los episodios de inmisión de ozono troposférico, dentro de la más habituales que presenta la meteorología gallega.

Se han reunido mapas sinópticos para los días de los episodios seleccionados, procedentes del reanálisis del National Center for Environmental Prediction (NCEP, USA). Los mapas de reanálisis incorporan los datos de observatorios, que son interpolados y recalculados con modelos de diagnóstico. Estos mapas representan, para las 00 UTC, distintas variables de geopotencial a 500 mb, presión a nivel del mar y temperatura a 500 y 850 mb. Los mapas han sido recogidos y clasificados por el instituto alemán Wetterzentrale, pudiendo ser consultados en su portal de Internet [[www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de)].

La información meteorológica a escala regional de los episodios se completó con datos históricos de temperatura superficial, viento, precipitación y de los meteoros típicos (estado del cielo, tormentas, nieblas, etc.), procedentes de los mapas elaborados

cada 6 horas por el propio Wetterzentrale, a partir de datos de estaciones meteorológicas europeas.

Una vez establecidos los episodios, se recopilaron datos meteorológicos locales, cuyo estudio permitió un análisis más exhaustivo de la influencia meteorológica sobre los episodios de contaminación, al tener en cuenta efectos locales, como vientos anabáticos o catabáticos, brisas locales, inversiones térmicas, etc, que los mapas sinópticos no son capaces de reproducir. Este aspecto cobra una gran importancia en un terreno de orografía tan complicada como la Comunidad Gallega.

Por ello, las medidas meteorológicas superficiales empleadas, también con frecuencia horaria, fueron la temperatura superficial (a 2 m) y la velocidad y dirección de viento a 10 m, recogidas en cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la UPT Endesa-As Pontes, integrada en la Red Gallega de Calidad del Aire. Estos registros históricos se ampliaron con los datos de una sexta estación de la misma red (estación D1-A Mourela), que proporcionó temperatura a 2, 10, 30 y 80 m (útil para establecer una medida aproximada de la estabilidad), viento a 10 y 80 m, radiación solar y precipitación, con frecuencia horaria.

Para completar el análisis, se recogieron los radiosondeos meteorológicos operados por el Instituto Nacional de Meteorología en el Centro Meteorológico Territorial de A Coruña, recogidos por la OMM y publicados por la NOAA [<http://raob.fsl.noaa.gov/>] para los días correspondientes a los episodios seleccionados. Se trata de sondeos tipo, que proporcionan datos de temperatura, viento y humedad para las alturas de 1000 mb a 100 mb, con un intervalo de 100 mb. Se dispone de dos sondeos diarios, a las 00 y 12 UTC.

El estudio de estos sondeos permitió caracterizar la altura de la capa de mezcla, así como posibles inversiones térmicas que puedan afectar a la distribución de ozono en los períodos analizados, aunque serán utilizados como material de apoyo, debido a las grandes diferencias locales entre las estaciones (por ejemplo, en la estructura de la capa estable nocturna), imposibles de observar con un radiosondeo lanzado desde un único punto.

## **5. Identificación de episodios**

Se realizó una selección de episodios con elevados niveles de ozono troposférico en el trienio 2002-2004 en el norte de la Comunidad Gallega, partiendo de los datos recogidos por cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la UPT Endesa-As Pontes.

La definición de un episodio con alto nivel de ozono se basó en un doble criterio:

- establecimiento de un umbral de inmisión de  $O_3$  troposférico en  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de valor promedio horario
- existencia de ascensos acusados de los niveles de  $O_3$  troposférico, independientemente de la concentración de inmisión alcanzada

Tras la elección de un umbral discriminatorio, se procedió a delimitar estas situaciones de elevado concentración, estableciendo una duración temporal mínima de 7 días entorno al valor de inmisión máxima de  $O_3$ , y sin límite superior. El rango temporal mínimo facilita el análisis de las causas del episodio, pues las reacciones de formación y destrucción de  $O_3$  en la atmósfera presentan un tiempo de reacción y equilibrio fotoquímico de horas a días. La ausencia de límite superior permite extender el episodio el tiempo necesario para garantizar la renovación de la masa aérea.

La aplicación de los criterios anteriores condujo a la selección de 15 episodios de inmisión de ozono troposférico, repartiéndose cinco en el año 2002, seis en el 2003 y cuatro en el 2004, todos entre los meses de Marzo y Septiembre. La duración de dichos episodios oscila entre los 7 y los 18 días.

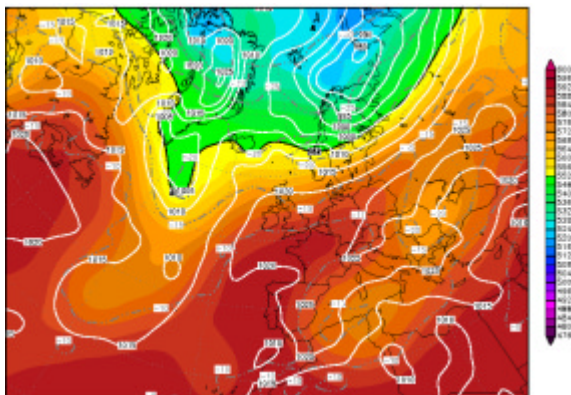


Figura 2: "Situación sinóptica el día 16/09/2003 a las 00 UTC en el hemisferio norte: presión superficial, geopotencial y temperatura a 500 hPa, procedente del reanálisis del NCEP"

## 6. Meteorología sinóptica y local. Análisis general.

Los episodios descritos se desarrollan bajo situaciones sinópticas de carácter anticiclónico, que pueden englobarse dentro de dos "patrones" sinópticos principales:

- Anticiclón Británico-Centroeuropeo (fig. 2), con depresión térmica peninsular, que se presenta de marzo a finales de septiembre, con

mayor frecuencia en los meses de mayo a septiembre

- Anticiclón Atlántico-Europeo y baja sahariana, situación característica de bloqueo que se presenta principalmente de junio a agosto

Ambos patrones presentan un centro de altas presiones estacionario situado al norte de la península Ibérica, que deja sobre Galicia una circulación de componente este, lo cual se traduce en vientos regionales del este o sureste, y temperaturas muy elevadas, sobre todo en período estival. En muchos de los episodios, la circulación del E se ve reforzada por el establecimiento de bajas térmicas relativas situadas en la mitad sur o centro peninsular, provocada por el fuerte calentamiento que sufre esa zona en los meses estivales. La mayoría de los episodios suelen terminar con la entrada de bajas por el Atlántico, que facilitan la renovación del aire, al provocar vientos del suroeste y estar asociadas a la entrada de nubosidad, con la correspondiente bajada de temperaturas máximas y aparición de precipitaciones, generalmente débiles.

Las condiciones aportadas por esta situación sinóptica son las típicamente favorables para la formación del  $O_3$  troposférico.

La meteorología local muestra claras diferencias entre unas estaciones y otras, por efectos topográficos locales, por su situación más o menos próxima al litoral e incluso por el uso de suelos.

Las conclusiones generales obtenidas del análisis de las medidas en las estaciones superficiales son:

- los valores máximos de inmisión dentro de cada episodio coinciden en su mayoría con los días de temperatura más elevada y mayor insolación.
- los máximos de  $O_3$  troposférico en cada episodio suelen corresponderse con una disminución de la intensidad del viento, lo que se favorece su formación y/o acumulación.
- se observa una buena correlación entre los episodios de brisa marina y el incremento de  $O_3$  troposférico medido en las estaciones, como consecuencia de los dos hechos anteriores.

La tesis más probable acerca del origen de los contaminantes primarios precursores del  $O_3$  y del propio  $O_3$  troposférico registrado en Galicia parece centrarse en su origen alóctono, probablemente en el interior de la península Ibérica, pero la confirmación de esta hipótesis precisa de un análisis más profundo, para lo cual se inició el estudio particular de los episodios seleccionados, incluyendo el uso de modelos meteorológicos. A continuación se presenta el análisis del episodio correspondiente a los días 12-22/09/2003.

## 7. Episodio del 12-22 de Septiembre de 2003

En este apartado se analiza con mayor profundidad el comportamiento de los niveles de ozono en superficie para las jornadas del 12 al 22 de Septiembre de 2003.

### *Análisis meteorológico*

La situación sinóptica está dominada por el anticiclón Británico-Centroeuropo (fig. 2).

El día 12, que marca el comienzo del episodio, las altas presiones tienen su centro de 1030 mb al sur de las islas Británicas, causando circulación del este sobre la mitad oeste de la península Ibérica. El anticiclón se desplaza hacia el oeste las jornadas siguientes, situando su núcleo sobre Holanda los dos días siguientes, y manteniéndose la circulación del E-SE sobre Galicia, con escasa intensidad de viento y temperaturas muy elevadas en la mitad oeste de la península.

La jornada del día 15, el anticiclón se mantiene estacionario sobre Centroeuropa, pero la formación de la baja subsahariana afecta al sur de la península

Ibérica, originando flujo de componente S en la mitad oeste, manteniéndose las temperaturas altas. La situación es parecida el día 16 (fig. 2), aunque el anticiclón centroeuropo se debilita ligeramente y disminuye la intensidad de viento sobre la península, dejando vientos muy flojos del SO sobre Galicia.

El día 17 la situación es de pantano barométrico sobre el sur de Europa, con el anticiclón centroeuropo estacionario, causando altas temperaturas y vientos muy débiles del SE en el sur de Portugal, mientras en el norte rolan ligeramente al SO. La jornada del día 18 mantiene la misma condición sinóptica, aunque comienzan a descender las temperaturas debido a una vaguada que se acerca desde las Azores; dicha vaguada originará el día 19 un centro poco profundo de bajas presiones sobre las Azores, que provoca un aumento de la intensidad del viento en la fachada atlántica, que sopla del S.

Los días 20 y 21 la borrasca se hace más profunda, dejando vientos intensos del SO en todo el litoral galaico-portugués, y un moderado descenso de la temperatura.

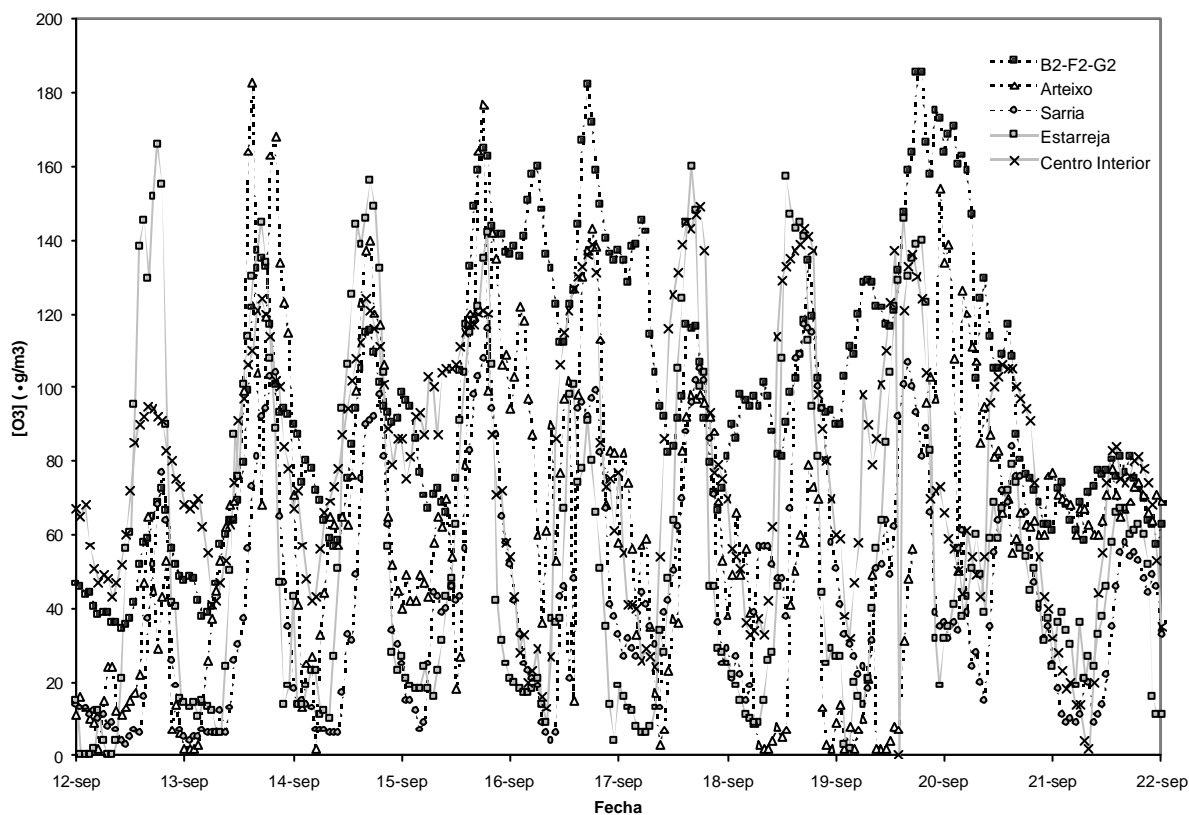


Figura 3: “Evolución de las concentraciones de  $O_3$  troposférico en las estaciones B2-F2-G2 (media, Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa-As Pontes), Arteixo, Sarria (Red Gallega de Calidad del Aire), Fundao y Estarreja (Red de Calidade do Ar de Portugal) durante los días 12-21 de Septiembre de 2003”

Las medidas meteorológicas recogidas en las estaciones de la red de la UPT Endesa-As Pontes son en general coincidentes con la situación sinóptica antes descrita.

Las temperaturas máximas se mantuvieron entre los 26 y 30 °C hasta el día 20, cuando la influencia de las bajas presiones inició el descenso continuo de temperatura (fig. 4).

El viento sopla de componente este en general, con oscilaciones NE-SE en función de los días y la localización de la estación, destacando las brisas marinas que se desarrollan en la zona las tardes de los días 13, 16, 17, 18 y 19 (fig. 4), debido a las altas temperaturas y el escaso gradiente de presión, que favorece el desarrollo de vientos locales. Estas brisas pueden observarse en todas las estaciones utilizadas, salvo en las que se hallan más alejadas de la costa.

#### Simulación de las condiciones meteorológicas

Las simulaciones meteorológicas facilitan el análisis de variables meteorológicas (temperatura y viento) a escala regional, la obtención de variables derivadas (perfiles de viento y temperatura, trayectorias de contaminantes, etc.), además de profundizar en el estudio de fenómenos locales, como las brisas marinas en este caso.

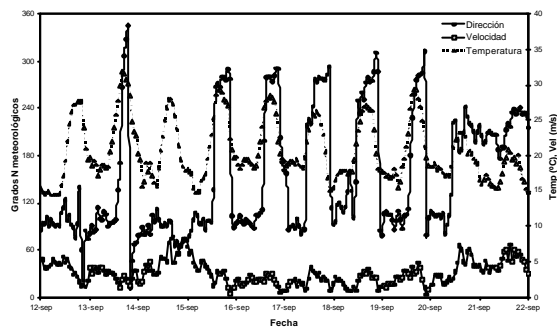


Figura 4: “Registros de temperatura, velocidad y dirección de viento en la estación E2 para el período 12-22 de Septiembre de 2003, perteneciente a la Red de Vigilancia de Calidad de Aire de Endesa-As Pontes”

En este estudio se han realizado simulaciones con la versión 3, release 3-2 del modelo meteorológico PSU/NCAR MM5 [Grell et al., 1995] para los tres días centrales del episodio analizado (15, 16 y 17 de Septiembre de 2003), obteniendo a partir de ellas información sobre los patrones de circulación de viento sobre la península Ibérica y efectos locales en el área de interés.

Se emplearon tres dominios, el más interno centrado en la chimenea de la UPT Endesa - As Pontes. El dominio más externo, con una resolución de malla horizontal de 30.0 km, cubre la península Ibérica, Francia, el sur de las Islas Británicas y parte del Océano Atlántico, con una extensión total de 2400 x

3000 km<sup>2</sup>. El segundo dominio cubre el cuadrante noroeste de la península Ibérica, con un área total de 580 x 580 km<sup>2</sup> y resolución 10.0 km, mientras el tercero se sitúa sobre el noroeste de la provincia de A Coruña, incluyendo la zona de estudio en la región de As Pontes, con una superficie de 103 x 103 km<sup>2</sup> y resolución de 3.3 km. El número de niveles sigma verticales es de 23 en todos los dominios, incrementando su densidad en los niveles más bajos de la capa límite p planetaria.

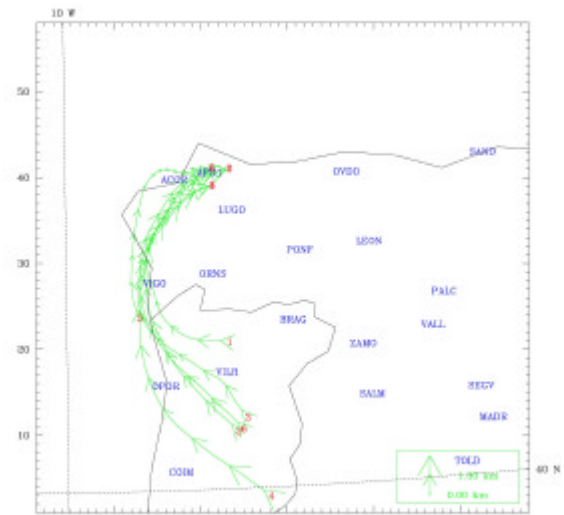


Figura 5: “Trayectorias con llegada en las estaciones B2 (1,2), F2 (3,4) y G2 (5,6) a las 16 UTC del 15/09/2003 y origen 12 horas antes. Los índices impares indican llegada de las trayectorias a 2 m de altura, y los pares a 1000 m”

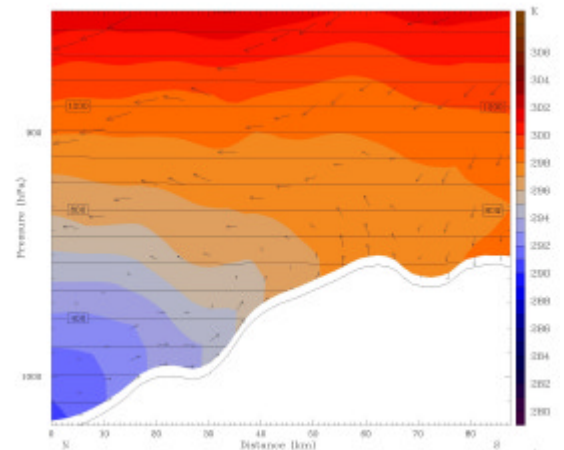


Figura 6: Simulación de la celda convectiva producida por la brisa marina del NO, opuesta a la circulación sinóptica del SE a las 18Z del 16/09/2003. El perfil, en dirección norte – sur, se inicia en el mar y atraviesa las estaciones G2 (situada a 27 km del inicio del perfil) y F2 (a 43 km del inicio del perfil), hasta internarse 90 km tierra adentro.

Las condiciones iniciales y de contorno se obtuvieron de los análisis del modelo NCEP con resolución horizontal de 1.0° x 1.0° y son actualizadas cada 6 horas durante las 72 horas del período de estudio.

Las simulaciones realizadas proporcionaron información sobre las posibles trayectorias seguidas por un contaminante (ozono troposférico y óxidos de nitrógeno, en este caso) durante el período modelizado. Debe destacarse que las trayectorias proporcionadas por el modelo no tienen en cuenta fenómenos de dispersión de contaminantes, basándose sólo en los flujos de aire modelizados, así como en la estabilidad térmica de la atmósfera: por tanto, tienen un valor meramente orientativo, indicando la procedencia de las masas de aire que afectan al norte de Galicia.

Se calcularon las trayectorias de las masas de aire para varias estaciones de la red de vigilancia de la UPT Endesa - As Pontes, a aquellas horas en que se producían los máximos valores diarios de inmisión de ozono troposférico en ellas durante el período modelizado (18 HL -hora local- el día 15 (fig. 5), 17 HL los días 16 y 17), así como algún máximo local nocturno (05 HL del día 16, 07 HL del día 17).

Las trayectorias se obtuvieron estableciendo como altura de las masas del aire destino 2 metros, coincidiendo así con el aire muestreado por las estaciones, aunque en algunas situaciones para períodos diarios, también se establecieron 1000 m como altura de llegada, lo que indicaría el origen del aire que recarga los estratos superiores de la atmósfera.

Otra finalidad de las simulaciones fue el estudio de la generación de brisas marinas durante este período. Se realizaron para ello perfiles verticales a lo largo de trayectorias rectas que comenzaban en el mar y cruzaban dos estaciones de la red de la UPT Endesa-As Pontes, eligiendo direcciones preferentemente perpendiculares a la costa.

Las simulaciones establecieron que la circulación local de la brisa comenzaba con el calentamiento diferencial del aire sobre la tierra y el mar, alrededor de las 14 HL; esto provoca un flujo superficial hacia la tierra, la brisa marina, ya claramente establecida a las 17 HL, que llega a penetrar hasta 50 km en el interior a las 20 HL (fig. 6). La corriente de retorno, formada por el aire que vuelve hacia el mar en altura, circula a unos 1000 m de altura. A medida que disminuye la radiación solar y se igualan las temperaturas, se reduce la intensidad de la brisa y se recupera el flujo uniforme de carácter sinóptico.

La figura 4 muestra los valores de dirección y velocidad de viento para la estación F2, donde se puede apreciar como se establece la brisa marina de componente O varios días a partir de las 14 horas, manteniendo su influencia hasta las 22 horas, cuando se recupera el flujo sinóptico de componente E. Destaca también el incremento de la intensidad de viento con el desarrollo de la brisa, volviendo a

decaer su velocidad por la noche, al imponerse el viento sinóptico dominante.

#### *Descripción y análisis del episodio*

A continuación se realiza un análisis integrado de las variaciones de la concentración de ozono troposférico durante el episodio, partiendo de los valores medidos en las redes de estaciones seleccionadas y los mapas sinópticos del modelo GFS (antiguo AVN). El análisis se ha completado con las simulaciones obtenidas con el MM5 y con las predicciones realizadas por el modelo EURAD.

El episodio comienza el día 12, con valores bajos de ozono sobre Galicia (fig. 3), inferiores a  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y producción elevada de  $\text{NO}_2$  en el área SO de Portugal, sobre Lisboa, que provoca un área de mayor concentración de  $\text{O}_3$  troposférico sobre el Atlántico, al NO de Lisboa, debido al arrastre de precursores a causa del viento del SE sobre Portugal. El área SE de Portugal presenta valores inferiores de ozono a causa de su rápido consumo por el  $\text{NO}_2$ , según confirman las mediciones de las estaciones lisboetas y de la zona del Alentejo.

Según el modelo EURAD, el día 13 presenta el área de mayor concentración de ozono desplazada al norte de Portugal, todavía centrada en el océano Atlántico, pero ejerciendo ya influencia sobre las Rías Baixas. El movimiento de esta zona de altos valores de ozono troposférico es debido a los citados viento del SE, que se mantienen durante esta jornada. Las mediciones en las estaciones gallegas acusan también esta influencia de la pluma de ozono, incrementando sus niveles máximos hasta  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la red de As Pontes, al igual que las estaciones del centro interior de Portugal, mientras Arteixo alcanza los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (fig. 3). La alta generación de  $\text{NO}_2$  entorno a Lisboa y el SO de Portugal continúa, contribuyendo a aumentar la amplitud de la "pluma" de altas concentraciones de ozono troposférico, y a mantener su concentración, a pesar de la dispersión y dilución.

El día 14 el patrón de circulación de viento se desplaza hacia el este, con lo que se disminuye la concentración de ozono troposférico sobre Galicia (fig. 3), al traer aire procedente del centro peninsular, menos enriquecido en ozono según las previsiones del modelo EURAD. Esta disminución se refleja en las medidas de inmisión de las estaciones de As Pontes y Arteixo, ligeramente inferiores a las del día precedente, disminución favorecida además por el aumento de la intensidad de viento. En el litoral sur de Portugal continúa la emisión de altos valores de óxidos de nitrógeno, que contribuyen a formar en el centro-oeste una zona con alta concentración de ozono troposférico,

aumentada por la baja intensidad del viento sobre el sur y centro de Portugal.

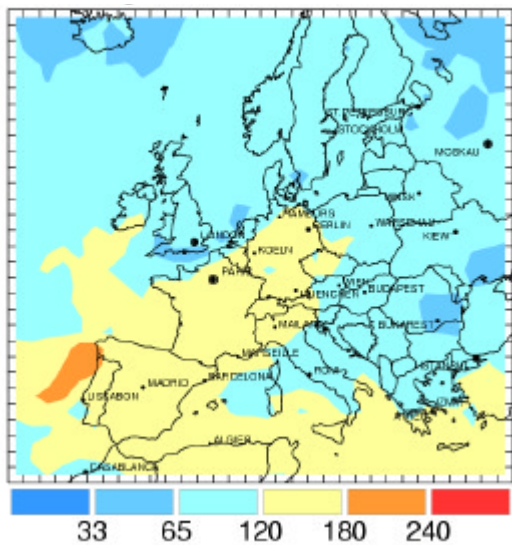


Figura 7: “Predicción del máximo horario de O<sub>3</sub> troposférico (µg/m<sup>3</sup>) sobre Europa occidental para el día 15/09/2003 realizada por el modelo EURAD”

La jornada del día 15 trae de nuevo un cambio en la dirección del viento, que rola al sur, a la vez que se reduce su intensidad. Esto favorece la llegada al litoral oeste de Galicia del ozono troposférico situado en la jornada anterior sobre Portugal, así como del ozono menos envejecido formado ese mismo día a lo largo del litoral portugués, según indican los mapas del modelo EURAD (fig. 7) y confirman las mediciones de NO<sub>2</sub> en las estaciones de la red portuguesa. De este modo aumentan intensamente los niveles de ozono troposférico en Galicia, alcanzando valores medios próximos a los 170 µg/m<sup>3</sup> al oeste de Galicia (Arteixo y As Pontes), mientras las estaciones situadas más al este, como Sarria, se mantienen en valores más bajos y constantes (tendencia general a lo largo de todo el episodio), sin superar los 120 µg/m<sup>3</sup> (fig. 3).

Se realizó un análisis de trayectorias de masas de aire mediante el modelo MM5 para el día 15, confirmando que el aire situado sobre las estaciones de Endesa a las 18 horas (hora local a la que se producen los máximos valores de ozono) estaba 12 horas antes sobre el norte de Portugal, atravesando Oporto, y pasando sobre Vigo y Pontevedra 6 horas antes (fig. 5). El paso de las masas de aire sobre el cinturón urbano-industrial de las Rías Baixas podría afectar de manera secundaria a los máximos de ozono, a causa del arrastre de ozono troposférico generado en los alrededores de dicha zona. Esta hipótesis no se puede confirmar con datos experimentales debido a la carencia de estaciones de medida de contaminantes en esa área.

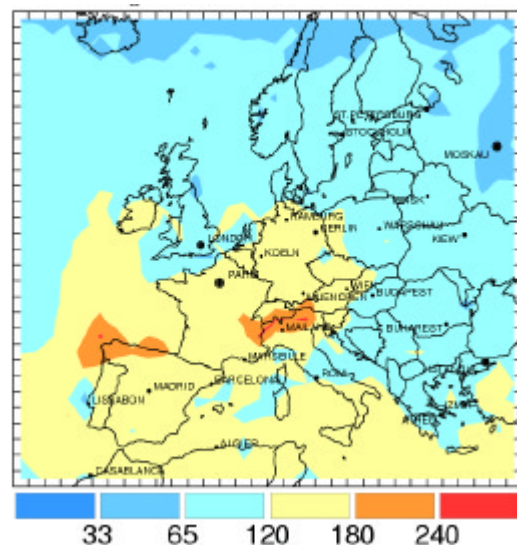


Figura 8: “Predicción del máximo horario de O<sub>3</sub> troposférico (µg/m<sup>3</sup>) sobre Europa occidental para el día 16/09/2003 realizada por el modelo EURAD”

El día 16 continúa la alta inmisión de óxidos de nitrógeno en el litoral portugués, sobre todo en la zona sur, y aumentan también las concentraciones de NO<sub>2</sub> sobre Asturias (fig. 9). La circulación de viento continúa siendo S-SE sobre Portugal, y tiende al SO en Galicia, con muy baja intensidad de viento, lo que favorece la aparición de vientos locales, como las brisas marinas, al igual que las altas temperaturas alcanzadas (fig. 4). Esta circulación atmosférica facilita la entrada en Galicia de los estratos de aire enriquecido en ozono procedente de Portugal, que se desplaza por el litoral cantábrico (fig. 8), llegando a concentraciones superiores a los 180 µg/m<sup>3</sup> en las estaciones de la UPT-As Pontes (fig. 3). El incremento de la inmisión de ozono troposférico se ve beneficiado por las brisas marinas (fig. 6), que actúan como pequeñas células de recirculación, dificultando la dispersión del ozono e inyectando aire procedente del litoral atlántico gallego, con mayor contenido en ozono provocado por su mayor población e industrialización.

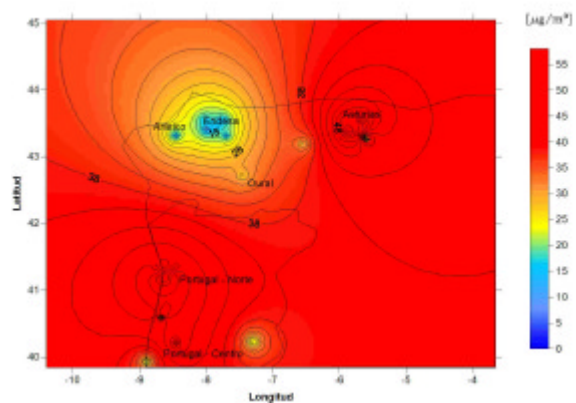


Figura 9: “Inmisión media diaria de NO<sub>2</sub> registrada el día 16/09/2003, interpolada para las redes gallega, asturiana y portuguesa”



De nuevo las trayectorias calculadas con el modelo MM5 muestran que los contaminantes secundarios se sitúan 24 horas antes del máximo (17 hora local) en el litoral portugués, entre Coimbra y Oporto (no mostradas), zona en la que existen elevados valores de ozono troposférico y de óxidos de nitrógeno, a causa de la actividad urbana e industrial (tráfico en la ciudad de Oporto, central térmica de Estarreja, etc.), según confirman los registros de las estaciones de la red portuguesa los días 15 y 16. El patrón circulatorio es semejante al del día 15, ascendiendo directamente las masas de aire desde el norte de Portugal en dirección norte sobre el litoral, y alcanzando la costa de las Rías Baixas 6 horas antes de llegar al norte de la provincia de A Coruña.

La situación similar es similar la jornada siguiente, día 17, con circulación del SE sobre el sur de Portugal, aunque al norte rola ligeramente al O, quedando un flujo del OSO sobre Galicia, con bajas velocidades de viento. La generación de precursores es parecida a la jornada anterior, con emisiones elevadas sobre la costa portuguesa y Asturias. Ambas condiciones provocan un desplazamiento hacia el Cantábrico de las masas ricas en ozono que se situaban el día anterior sobre Galicia. Este desplazamiento, junto con el aumento de precursores en Asturias, causa el aumento de la inmisión de ozono troposférico en el litoral cantábrico, aunque en el norte de Galicia disminuyen los niveles de ozono registrados, alrededor de 100-140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (fig. 3), probablemente debido a la dispersión de las masas de ozono del día previo, que se desplazan hacia el este, y a que las nuevas masas procedentes de Portugal efectúan un recorrido sobre el océano Atlántico, aumentando su dilución.

La repetición del análisis de trayectorias para el día 17 indica que el origen de las masas atmosféricas que afectan a las 17 horas al entorno de As Pontes, hora local a la que se producen los máximos valores de ozono troposférico, está 24 horas antes al sur de Coimbra, o incluso sobre el Atlántico, a la altura de Oporto (no mostradas). Se observa también el recorrido que efectúan las masas de contaminantes secundarios sobre el océano, antes de penetrar en Galicia por el litoral pontevedrés, al norte de Vigo, unas 6 horas antes de alcanzar As Pontes. Se realizó el mismo análisis de trayectorias para el máximo local nocturno, registrado a las 05 horas del día 17, obteniendo un resultado muy similar: procedencia del centro-sur de Portugal, después de describir una trayectoria en arco sobre él.

El día 18 se mantiene la misma tendencia de emisión de óxidos de nitrógeno y el patrón de vientos, con lo cual las concentraciones de  $\text{O}_3$  troposférico en Galicia son muy semejantes a las de la jornada anterior, al igual que en Portugal (fig. 3). En el litoral este del Cantábrico los valores aumentan,

debido al transporte de ozono alóctono, y a la generación de ozono sobre Asturias, debido a la emisión de óxidos de nitrógeno.

La jornada del día 19 la generación de  $\text{NO}_2$  se mantiene en Portugal, y se produce un fuerte incremento de la inmisión de ozono registrada en Galicia (fig. 3), debido al cambio de circulación del viento, que ahora es de componente claramente sur sobre todo el litoral atlántico de la península Ibérica, además de aumentar su intensidad: se produce un transporte directo del aire enriquecido en ozono que se forma sobre el litoral portugués (con Lisboa y Oporto como núcleos generadores fundamentales), provocando la llegada a Galicia de una masa compacta de aire con alta concentración de ozono troposférico. Como consecuencia, aumentan los niveles de ozono medidos en las estaciones del oeste de Galicia, directamente afectadas por el núcleo de la citada masa atmosférica, con valores de hasta 185  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , de los más altos alcanzados durante el episodio de estudio (fig. 3).

El día 20 se acerca una borrasca situada al norte de las islas Azores, dejando fuertes vientos del suroeste en la mitad oeste de la península Ibérica, que traen aire limpio del Atlántico (fig. 4), con lo que los niveles de ozono caen drásticamente en todo el oeste peninsular (fig. 3); esta caída de la inmisión de ozono se ve beneficiada además por la disminución de la emisión de precursores (bajada de la actividad industrial, al ser sábado) y por la bajada generalizada de temperaturas (fig. 4). La última jornada del episodio, el domingo día 21, presenta niveles aún menores de ozono, alrededor de 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en Galicia y Portugal (fig. 3), pues se mantiene próximo el centro de bajas presiones, que continúa causando vientos intensos del suroeste, de procedencia oceánica, que limpian los últimos restos de ozono troposférico del episodio (fig. 4).

## 8. Conclusiones

El análisis del episodio seleccionado indica que la inmisión de ozono troposférico registrada en las estaciones del entorno de la UPT Endesa-As Pontes durante los días 12-22 de Septiembre de 2003 parece tener su origen principal en el transporte a larga distancia de ozono formado a partir de precursores (óxidos de nitrógeno fundamentalmente) emitidos en el litoral portugués, preferentemente en las zonas de la costa suroeste (Alentejo, Lisboa) y centro-norte (entorno de Oporto).

Las masas de ozono troposférico formadas sobre el litoral portugués se desplazan hacia el norte debido a la circulación de componente SSE predominante durante el episodio, alcanzando Galicia unas 24-36 horas después de su formación. La componente sur de los vientos parece dar lugar a valores de ozono

troposférico más elevados, pues el transporte del ozono alóctono es más directo y rápido, disminuyendo su tasa de dilución atmosférica y de deposición, como se pone de manifiesto en los máximos alcanzados durante los días 15 y 19.

La existencia de fenómenos locales, como brisas marinas del oeste en el litoral coruñés, favorecen la entrada en Galicia de masas atmosféricas enriquecidas en ozono procedente de Portugal. Estas brisas también actúan como células de recirculación, impidiendo la limpieza de los capas superiores de aire con alta concentración de ozono, al inyectar el ozono superficial en los estratos superiores a través del flujo ascendente que comunica con el flujo de retorno en altura. Además las brisas procedentes del mar arrastran masas de aire procedentes del litoral gallego, mucho más industrializado y poblado que el interior, lo cual favorece el incremento de los niveles de ozono medidos (trayectorias de masas atmosféricas que pasan sobre la comarca de Vigo, por ejemplo, enriqueciéndose en contaminantes primarios y precursores).

La generación de ozono troposférico y la acumulación de altas concentraciones se ve favorecida por las altas presiones en superficie y en altura, que causan elevada insolación y dificultan la dispersión vertical atmosférica, debido al incremento de la estabilidad, con posibles inversiones de subsidencia. Además, el débil gradiente barométrico en superficie favorece el predominio de los ciclos locales de brisas, a la par que la menor intensidad en el viento disminuye la capacidad de mezcla. De este modo se forman estratos atmosféricos con elevadas concentraciones de ozono, que pueden contener una masa aérea envejecida a la que se han sumado las emisiones de varios días, favoreciendo la realimentación del ozono.

Los valores de óxidos de nitrógeno recogidos en las estaciones gallegas son muy inferiores a los registrados en Portugal (no suelen superar los 30-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y generalmente se sitúan por debajo de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras los valores de ozono alcanzan niveles más parejos e incluso superiores en Galicia (jornadas días 16 y 19, madrugadas del 17 y del 20); esto es una prueba más de la procedencia alóctona del ozono en este episodio, ya que no se observa correlación entre los óxidos de nitrógeno medidos aquí con las concentraciones de ozono existentes. De todas formas, esta conclusión debe tomarse con ciertas reservas, porque puede haber otros precursores de ozono troposférico de los cuales no se tienen medidas (COVs como isoprenos o terpenos generados por vegetación como eucaliptales, etc.).

Estas conclusiones se refieren únicamente al episodio estudiado de Septiembre de 2003, y aunque algunas tengan validez general (altas presiones y

baja velocidad de viento, formación de brisas, bajas concentraciones de óxidos de nitrógeno), como ya se ha observado en otros episodios, el resto (como el transporte de ozono desde el litoral portugués) no deben ser extrapoladas a otras situaciones, que han de ser estudiadas del mismo modo y mediante la modelización de los procesos asociados. Precisamente esta modelización de procesos se hace necesaria para cuantificar la influencia de cada uno de los posibles focos precursores de  $\text{O}_3$  troposférico sobre sus niveles en el norte de Galicia, y la de los procesos naturales de dilución y eliminación del  $\text{O}_3$  troposférico generado sobre los mismos niveles.

## 9. Agradecimientos

Las medidas horarias de inmisión han sido proporcionadas por la UPT As Pontes, el Laboratorio de Medio Ambiente de Galicia (Xunta de Galicia), la Junta de Castilla y León y el Ministerio de Medio Ambiente de Portugal (a través de su servidor web). Las medidas diarias de inmisión de Asturias han sido recopiladas del servidor web del Principado. Las condiciones meteorológicas de contorno han sido suministradas por Meteogalicia (Consellería de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible-Universidad de Santiago de Compostela). Las simulaciones meteorológicas se han ejecutado en los servidores del CESGA. Este trabajo ha sido financiado por Endesa Generación S.A.

## 10. Bibliografía

- Altshuller, A., *The role of nitrogen oxides in non-urban ozone formation in the planetary boundary layer over N. America, W. Europe and adjacent areas of ocean*. Atmos. Environ., 20, pp. 245-2680, 1986.
- Castell, N., Mantilla, E., *Estudio de los episodios de la contaminación por ozono en la Comunidad Valenciana*, Generalitat Valenciana, 2003.
- Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R., *A description of the Fifth-Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Tech. Rep. NCAR/TN-398+STR., NCAR, Boulder (Co), USA, 1995.
- Jacobson, M.Z. *Atmospheric pollution: history, scienc, and regulation*, Cambridge University Press, 2002.
- Logan, J.A., *Trends in the vertical distribution of ozone: An analysis of ozonesonde data*. J. Geophys. Res., 99, pp. 25553-25585, 1994.
- Martínez Cortizas, A., Pérez Alberti, A. *Atlas Climático de Galicia*, Xunta de Galicia, 1999
- Memmesheimer, M., Jakobs, H.J., Piekorz, G., Ebel, A., Kerschgens, M.J., Friese, E., Feldmann, H., Geiß, H. *Air quality modeling with the EURAD model*, Proceedings of the 7th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Belgrate, May 2001.