

APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO PRODUCIDOS POR UNA CENTRAL TÉRMICA

Marcelo Ortega Romero¹, Mario Patiño Aroca², Enrique Chacón Oreja³

¹Ingeniero Mecánico 2005

²Director de tesis. Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1985, Postgrado EEUU, Msc Ingeniería Ambiental Universidad de New Orleans, 1995, Profesor de ESPOL desde 1986

³Tutor de tesis, Ingeniero de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 1969, M.Sc. Applied Sciences Universidad de Newcastle upon Tyne, 1971, Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid desde 1978

RESUMEN

Este proyecto versa sobre la aplicación de un modelo matemático para la dispersión de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno que se emiten a la atmósfera desde una central de ciclo combinado de generación eléctrica cuyas instalaciones se encuentran ubicadas en el polígono industrial Tarragona localizado en la ciudad del mismo nombre en la provincia de Cataluña - España. La simulación matemática es una herramienta importante en la contaminación atmosférica ya que nos ayuda a comprender los procesos implicados, además de que nos facilita la predicción del impacto atmosférico que producen los contaminantes implicados en el modelo. Por esta razón, se ha realizado un estudio del impacto atmosférico que provocan los dos contaminantes mencionados comparando las concentraciones máximas generadas, resultado de la simulación, con los límites máximos de inmisión permisibles para la existencia de una calidad de aire aceptable, además de una pequeña evaluación de la respuesta del programa a los cambios de topografía en este caso particular.

ABSTRACT

This Project is about a mathematical simulation of sulfur and nitrogen dioxides dispersion emitted to the atmosphere by the power station with combined cycle electrical generation Tarragona whose facilities are located in the industrial polygon and city of the same name. The mathematical models are an important tool in the atmospheric contamination since it helps us to understand the implied processes, in addition that it facilitates the prediction to us of the atmospheric impact that they produce the agents. Therefore, a study of the atmospheric impact has been made which they cause both polluting mentioned comparing the maximum concentrations generated, result of the model application, with the maximum permissible limits to maintain the air quality, in addition to a small evaluation of the answer of the program to the changes of topography in this particular case.

INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se ha realizado la aplicación de un modelo matemático para

simular la dispersión de Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno emitidos por una Planta de Cogeneración de Ciclo Combinado localizada en el polígono industrial Tarragona, ubicado en la ciudad del mismo nombre en la provincia de Cataluña - España.

Para ello se ha utilizado como herramienta el programa ISC (Industrial Source Complex) recomendado por la Environment Protection Agency, que para su correcto funcionamiento es necesario ingresar un fichero que contiene las diferentes opciones de dispersión que se van a utilizar, los datos meteorológicos del lugar, las ubicaciones específicas de receptores, las propiedades de los gases que se están emitiendo, la topografía del terreno y finalmente seleccionar las opciones de salida que uno desea obtener.

Lo mas difícil de tratar son los datos meteorológicos ya que se requiere un registro de por lo menos un año de cada hora para la velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, nubosidad y con la ayuda de estos estimar la estabilidad atmosférica y la capa de mezcla para las 8760 horas que tiene el año.

Para los datos de la topografía del terreno y a su vez la ubicación de los receptores fue extraída de la base de datos que facilita el Instituto Cartográfico de Cataluña

La opción de salida escogida para este análisis serán las máximas concentraciones de los dos agentes que se generan en cada punto de la malla de receptores y a nivel del suelo.

Se realizará un análisis del funcionamiento del programa aplicado exclusivamente a este caso.

A las máximas concentraciones resultantes, que serán representadas en curvas de igual concentración, serán comparadas con los valores límites de inmisión fijados en el Real Decreto R.D. 1073/2003, transpuesto de la Directiva 1999/30/CE tanto para el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno.

CONTENIDO

Descripción del Modelo Industrial Source Complex ISC

- El modelo utiliza la ecuación en estado constante de difusión Gaussiana.
- Para cada fuente y cada hora, el origen del sistema de coordenadas esta ubicado en la superficie del suelo en la base de la chimenea.
- El eje X es positivo en la dirección del viento, el eje de las Y es normal al eje X y el eje Z se extiende verticalmente.
- Las posiciones de los receptores fijos son convertidas al sistema de coordenadas de cada fuente para el cálculo de concentración cada hora.
- Las concentraciones calculadas cada hora para cada fuente en cada receptor son sumadas para obtener la concentración total producida en cada receptor por las combinaciones de las fuentes de emisión.

APLICACIÓN DEL MODELO A LA CENTRAL TÉRMICA EN TARRAGONA

Opciones de Control

Para las opciones disponibles de dispersión hemos tomado en cuenta los siguientes parámetros:

- Se calcularán los valores de concentración.
- Debido a que la sedimentación seca es despreciable para gases y para partículas menores a 1um, y además que la sedimentación húmeda no es aplicable ya que tanto el óxido de azufre y los óxidos nítricos se oxidan rápidamente en la atmósfera para

formar ácido sulfúrico y ácido nítrico respectivamente, no tomaremos en cuenta ninguno de estos dos fenómenos para la simulación.

- Para el caso de la opción del medio, se ha utilizado el criterio de uso de la tierra (Dawidowski Laura et al 1998), seleccionándose el tipo urbano, debido a que la central se encuentra en un polígono industrial Tarragona.
- No se toma en cuenta la estela producida por los edificios cercanos ya que no se cumplen las condiciones que se especifican en el volumen II de la guía del usuario de este modelo. Por lo tanto se aplica un ascenso gradual de la pluma.
- Se utiliza la caída de flujo debido a la estela producida por el extremo de la chimenea y el ascenso de la pluma debido a flotación, ya que no se cumplen las condiciones para utilizar las ecuaciones de Schulman-Scire para caída de flujo, descritos en el Volumen II de la Guía de Usuario de este modelo.
- Se tomará en cuenta los algoritmos de terreno simple, complejo e intermedio, ya que existen variaciones en la topografía del terreno que no nos permite especificar solamente una de estas opciones.
- Usaremos la rutina para procesar los datos no encontrados o faltantes.
- Hemos seleccionado un tiempo promedio de 1h, 24h, y anual para este estudio, ya que según la normativa los valores límite y umbrales de inmisión de exposición humana, está estipulada en estos márgenes de tiempo.
- Los contaminantes seleccionados a analizar son el SO₂ y NO₂,
- En el caso de la vida media se utilizará para el SO₂ de 4 horas ya que este valor es recomendado por la EPA.
- En el caso del proyecto objeto de este estudio, el principal contaminante a considerar es el NO₂.

Tanto en los datos de emisión como en la aplicación del modelo los valores presentados de NO_x corresponden al NO₂, es decir, se parte de la relación:

$$\text{NO}_x/\text{NO}_2 = 1$$

No se ha considerado las diferentes formas en que puede presentarse este gas en la emisión y las reacciones subsecuentes que determinan una vida media en función de diferentes factores.

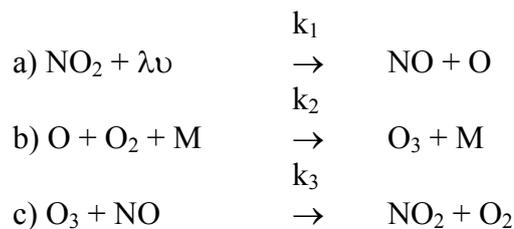
Así el NO generado en las instalaciones se transforma rápidamente en NO₂ según la reacción:

$$\text{NO}_2/\text{NO} (1 - e^{-(693t/\lambda)})$$

siendo λ de 10 minutos.

El esquema real de transformación en términos de las reacciones elementales es muy complejo e involucra a cientos de ecuaciones que caen fuera del alcance de este trabajo.

Como resumen puede indicarse que una vez en la atmósfera las principales reacciones corresponden a:



siendo $[\text{NO}_2] = k_3/k_1 [\text{O}_3] [\text{NO}]$

El efecto de estas reacciones se ha introducido en el modelo como factor de desactivación de 2 horas para este contaminante.

- Se ha seleccionado la opción ELEV, en la que se especificará la altura que posee cada punto del área seleccionada para el estudio, dados por el mapa topográfico de la zona, facilitados por cartografía del Instituto Cartográfico de Cataluña.
- Escogeremos la opción NOT en el código RUNORNOT que permite detener la ejecución del programa cuando encuentra cualquier tipo de error, de esta manera nos podemos dar cuenta en donde estamos cometiendo algún error y poder rectificarlo.

Opciones de la fuente

Se ha seleccionado fuentes puntuales de emisión de contaminantes debido a que la central consta de dos chimeneas, que se colocan de acuerdo al sistema UTM de coordenadas en el huso 31.

Se ha simulado las situaciones que representan una mayor emisión de contaminantes y que pueden producir el mayor impacto atmosférico.

CASO I Funcionamiento con gas-oil

CASO II Funcionamiento con gas natural

Opciones del receptor

Se considera una malla cuadrangular, con una separación de 200 metros entre receptor y receptor que da como resultado un área de un cuadrado de 40 km de lado en cuyo centro se encuentra la fuente emisora.

Para considerar los efectos del terreno se ha introducido, en cada uno de los nodos de las mallas definidas, la cota real del terreno, de acuerdo a la cartografía del Instituto Cartográfico de Cataluña. Una representación gráfica de la misma se recoge en la figura 1 en donde además se señala con el punto rojo la ubicación de la fuente y con puntos color verde las estaciones de medida de los contaminantes.

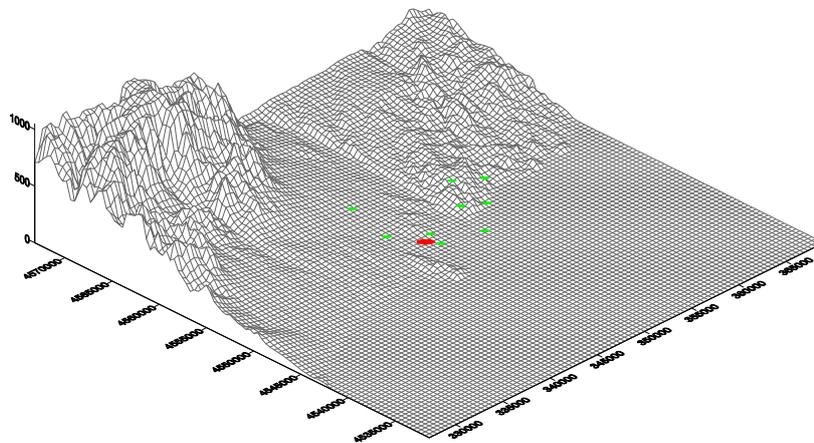


Figura 1 Malla topográfica de la zona de estudio

Opciones Meteorológicas

Datos de cada hora de un año natural completo para cada variable requerida. Estas variables son las siguientes:

Dirección del viento

Velocidad del viento

Temperatura ambiente

Estabilidad atmosférica

Para el cálculo de la estabilidad atmosférica según la clasificación de Pasquill-Gifford, se ha seguido el procedimiento del método de Turner, descrito en Meteorological Monitoring Guidance, que permite la evaluación de la estabilidad utilizando la

velocidad del viento en la superficie, la altitud solar durante el día y la nubosidad durante el día y la noche

Altura de capa de mezcla urbana

Para la estimación de la altura de la capa de mezcla se siguieron los criterios facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología para obtener una adecuada representatividad de los datos meteorológicos. De acuerdo con estos criterios, se ha utilizado la altura de la capa de mezcla propuesta por Klug (1969), para las diferentes estabilidades atmosféricas, mostradas en la tabla 1.

TABLA I
ALTURA DE CAPA DE MEZCLA DE ACUERDO A LA ESTABILIDAD

Estabilidad	Altura de Capa de mezcla (m)
A	1500
B	1500
C	1000
D	500
E	200
F	200

Opciones del terreno

En las opciones del terreno hemos introducido el fichero con los datos de las cotas reales del terreno las cuales serán comparados con los introducidos en las cuadrículas de los receptores

Opciones de salida

En esta parte hemos seleccionado la opción del modelo que nos permite realizar tratamientos especiales con los datos, correspondientes a los valores de máximas concentraciones en cada punto de la malla cuadrangular ingresada en la ruta receptor, además de los puntos en los que se encuentran las estaciones de inmisión. Estas máximas concentraciones son escogidas para un promedio de 1h, 24h y el año natural, ya que según la normativa los valores límite y umbrales de inmisión de exposición humana, está estipulada en estos márgenes de tiempo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

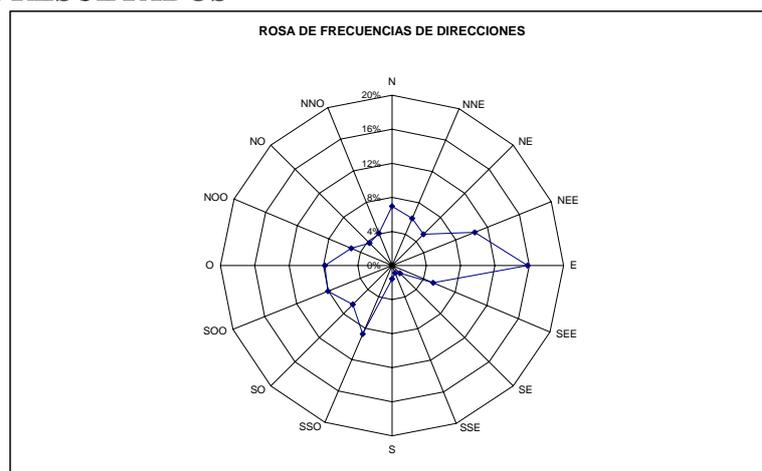


Figura 2 Rosa de frecuencias de direcciones

Observando la rosa de frecuencias de direcciones de la figura 2 en donde se indica desde donde está soplando el viento pudimos notar que la dirección del viento

predominante durante todo el año es la que se dirige de este a oeste y las mínimas las que soplan hacia los puntos que comprenden del norte al noroeste.

Al analizar las velocidades medias durante el año, que se muestran en la figura 3 pudimos observar que las máximas velocidades se producen en los vientos que soplan desde el oeste-sur-oeste, este y oeste. Las mínimas se producen en los vientos que soplan desde los puntos comprendidos entre el noreste y el noroeste, y por el otro extremo entre el sur y el sur-este.



Figura 3 Velocidades medias en cada dirección en m/s

ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE SO_2

Promedio Anual

Si el terreno fuera completamente plano, tomando en cuenta las concentraciones máximas que se generan en cada punto de la malla considerada, resulta la figura 4, en donde claramente se observa que las máximas concentraciones se encuentran al este de la fuente que se denota por el punto rojo, que aunque la dirección predominante del viento no es en esa dirección sino en la contraria podemos deducir que las velocidades en este sector son mas pequeñas. Además se puede notar que hacia el norte en donde la frecuencia del viento es pequeña las concentraciones también lo son.

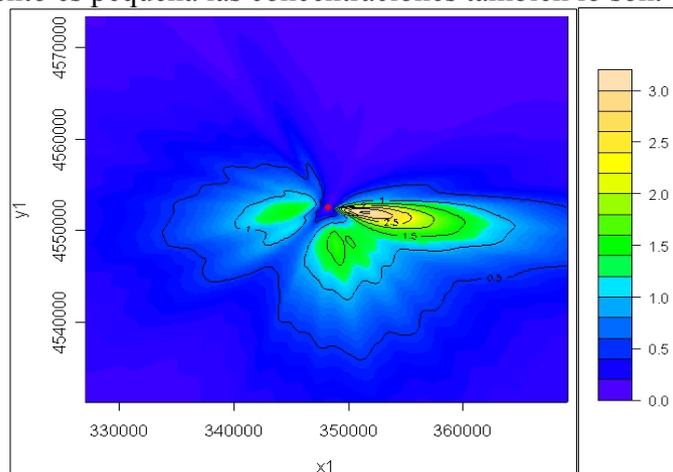


Figura 4 Concentraciones de SO_2 sin elevación promedio anual.

La figura 5 resultó al introducir las cotas del terreno, en donde se observa que se mantienen las máximas concentraciones en la dirección este del foco contaminante.

También se observa que los valores de concentración son más altos en los puntos del terreno que están a una altura mayor a la de la fuente comparadas con las concentraciones en el mismo punto si fuera el terreno plano.

Debido a la topografía del terreno aparecen concentraciones considerables en lugares donde existen cualquier tipo de elevaciones y en sectores que no se presentaron cuando el terreno se consideró plano.

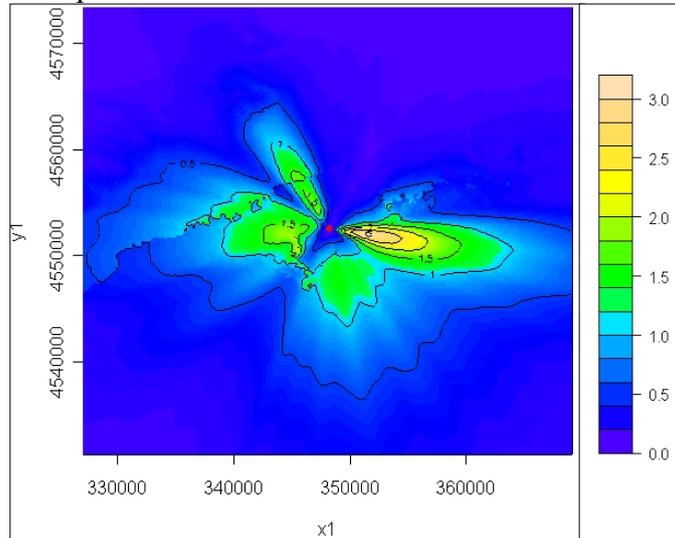


Figura 5 Concentraciones de SO₂ con elevación promedio anual

Promedios de una hora

Los valores máximos de concentraciones generados en cada punto durante un tiempo promedio de una hora, los podemos visualizar en la figura 6.

Nos dimos cuenta que se generan concentraciones despreciables en la dirección donde el viento casi no sopla durante todo el año que es en la dirección nornoroeste (NNO).

Se pudo observar que las máximas concentraciones se producen en los puntos en los que sus cotas son mayores o similares a las de la altura de la fuente.

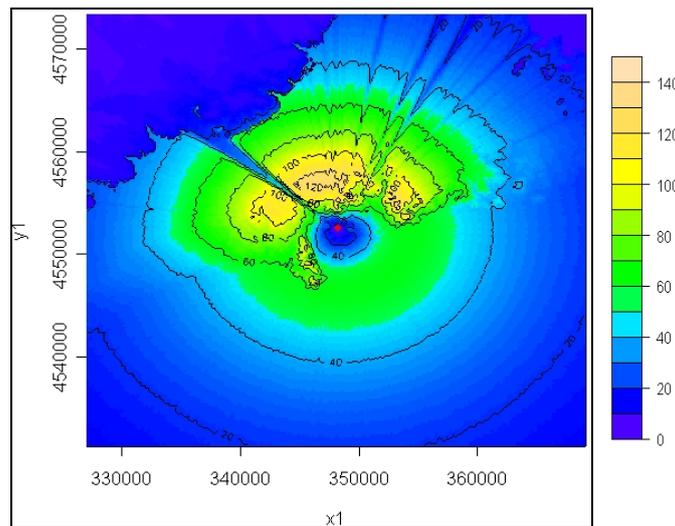


Figura 6 Concentraciones de SO₂ con elevación promedio una hora

Las concentraciones máximas generadas asumiendo que el terreno es completamente plano, que se muestran en la figura 7 podemos darnos cuenta que para las mismas coordenadas los valores de las concentraciones son mucho menores que cuando se introdujo la topografía.

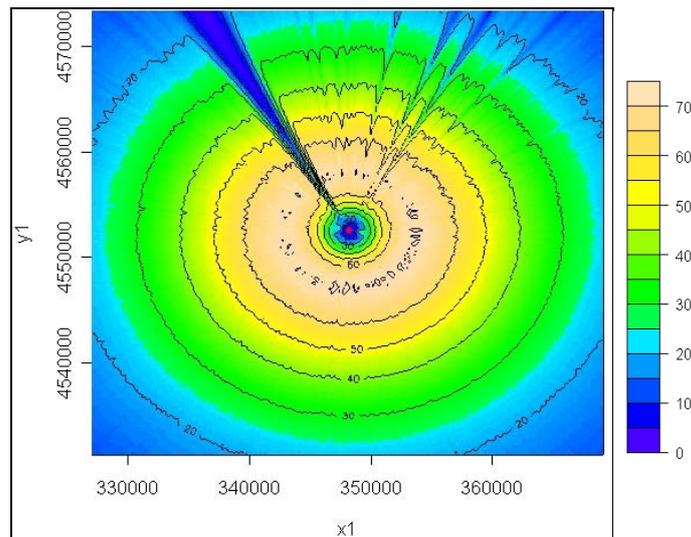


Figura 7 Concentraciones de SO_2 sin elevación promedio una hora

ANÁLISIS DE LAS CONCENTRACIONES DE NO_2

Promedios de una hora

Los resultados obtenidos para las concentraciones máximas para un promedio de tiempo de una hora los podemos observar en la figura 8.

Pudimos notar que las máximas concentraciones se producen en el noreste y en puntos que se encuentran a una altura aproximada a la de la fuente.

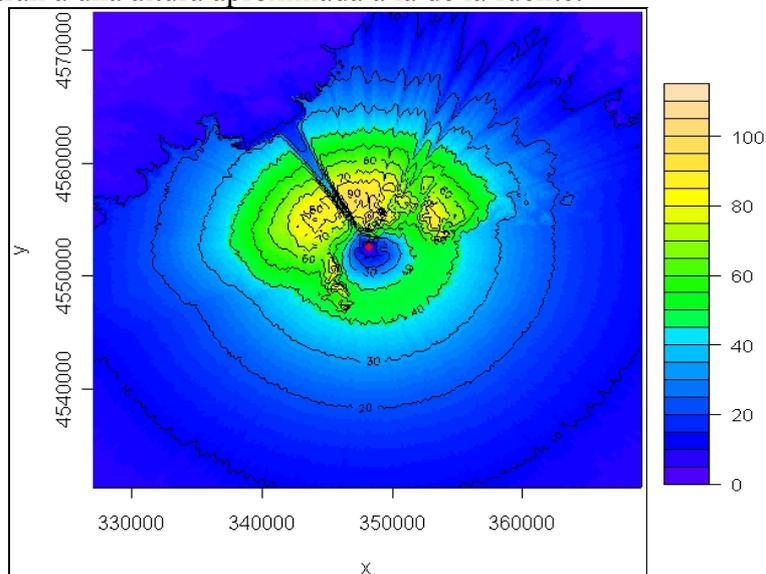


Figura 8 Concentraciones de NO_2 con elevación promedio una hora

Se observó que las máximas concentraciones horarias de NO_2 se localizan en el mismo sector que las máximas concentraciones de SO_2 , y muy cercanos entre sí.

Promedio anual

En la figura 9 se puede observar las máximas concentraciones que se producen en cada punto de la malla de receptores.

Pudimos notar que las máximas concentraciones se producen en la dirección este (E) que es en una de las direcciones donde el viento sopla con frecuencia y aunque no es

predominante si de menor velocidad que en el oeste que es la dirección que más veces ha soplado el viento durante todo el año.

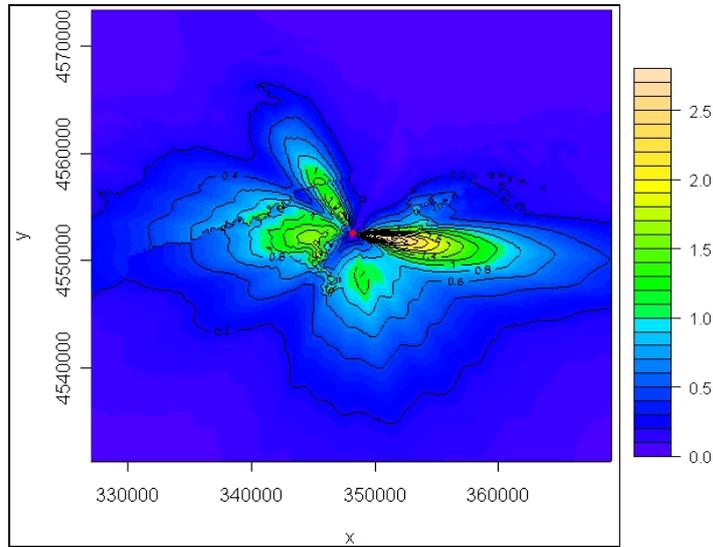


Figura 9 Concentraciones de NO₂ con elevación promedio anual

Los puntos de la malla en los que se generan las máximas concentraciones tanto para el SO₂ y el NO₂ coinciden en los dos contaminantes en todos los promedios considerados, esto quiere decir que la dispersión de los contaminantes está dominada por las situaciones meteorológicas y topográficas del lugar.

RESUMEN DE RESULTADOS

El resumen de los resultados está disponible en la tabla II, que consta de las máximas concentraciones tanto para el NO₂ y el SO₂ en los promedios de tiempo analizados que son de 1h, 24h y un año, a estos valores se los comparó con la normativa vigente para estos contaminantes y en estos periodos de tiempo observándose que no sobrepasan en ningún caso los límites permisible de los óxidos de nitrógeno fijados en el real decreto R. D. 1073/2003, y del SO₂ en el real decreto R. D. 1073/2002.

TABLA II
RESUMEN DE RESULTADOS

PROMEDIOS DE TIEMPO	CONCENTRACIONES MAXIMAS (µg/m3)				CONCENTRACIONES PERMISIBLES (µg/m3)	
	CASO I		CASO II		NO2	SO2
	NO2	SO2	NO2	SO2		
UNA HORA	113,4792	145,1417	101,8959	16,70077	200	350
24 HORAS	24,05856	32,8512	25,19841	3,62924	--	125
UN AÑO	2,67278	3,1252	2,2206	0,3213	40	20

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- De los análisis hechos se puede verificar que en ninguno de los casos se sobrepasa el límite de calidad de aire fijados por la normativa española.
- De los análisis realizados a los resultados del modelo se deduce que los puntos donde se producen las concentraciones máximas anuales, en el orden de 3.5 µg/m³ al sector este del foco emisor, cuando el terreno es completamente plano, son en los

lugares en donde el viento está soplando con frecuencia a lo largo del año seleccionado para la aplicación del modelo.

- Observando los resultados puede concluirse que cuando se introduce la topografía del terreno y esta contiene ciertas elevaciones, las concentraciones son mayores con respecto a los obtenidos si se asume que el terreno es plano, en el CASO I en promedios de tiempo de una hora para el SO₂, si el terreno es plano la máxima concentración fue de 70.71 µg/m³; en cambio si introducimos la topografía el resultado fue 145.17 µg/m³.
- Puede concluirse que en los sectores donde el viento no sopla a lo largo del año se encuentran las menores concentraciones de los contaminantes considerados en el estudio.
- De los resultados obtenidos puede decirse que las mayores concentraciones de 145.14 µg/m³ para el SO₂ y 113.48 µg/m³ para el NO₂ en el CASO I, a 78.4 m y 62.3 m de altura respectivamente, y de 16.7 µg/m³ para el SO₂ y 101.89 µg/m³ para el NO₂ en el CASO II, a 78.4 m y 79.2 m de altura respectivamente, se dan en los puntos que se encuentran a la misma o a una altura parecida a la del foco emisor y no necesariamente en la dirección del viento predominante, esto indica que estas mayores concentraciones se producen en los lugares donde la velocidad del viento es la menor detectada.
- De los datos que se obtuvieron se puede decir que aunque se varíe el tipo de contaminante, las concentraciones máximas de cada uno de ellos se ubican en puntos coincidentes, lo que indica que la dispersión de los agentes está dominada por las condiciones atmosféricas y topográficas del lugar.
- Es recomendable para tener unos mejores resultados realizar mediciones locales de velocidad del viento y temperatura a diferentes alturas, para obtener con estos datos el perfil de velocidad y el gradiente térmico vertical respectivamente, que reflejen la situación meteorológica real del lugar.
- Además se recomienda introducir las tasas de emisión horaria de la central, ya que el programa lo permite, para tener unos resultados menos conservativos.

REFERENCIAS

EPA, (1995): User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3), Dispersion Models, Volume I, User instruction, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.

EPA, (1995): User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3), Dispersion Models, Volume II, Description of model algorithms, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards.

EPA, (2000): Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modelling Applications, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards.

Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico, España

SCHNELLE K. y DEY P. (1999): Atmospheric Dispersion modelling compliance guide, McGraw-Hill, United States of America

CESGA, (1999): Modelos de la calidad del aire
<http://www.cesga.es/telecursos/MedAmb/>

EPA, (2005): Support Center for Regulatory Air Models
<http://www.epa.gov/scram001>

INSTITUTO CARTOGRÁFICO DE CATALUÑA (2002): Productos digitales.
<http://www.icc.es/castella/muestras.html>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA (2004) de España
<http://www.inm.es>

MARCANO, Juan, (2000): Educación Ambiental, Recursos Naturales, La contaminación Atmosférica.
http://www.jmarcano.com/recursos/rrnn_index.html