

Informe acerca del impacto en la calidad del aire de la instalación de una central térmica de ciclo combinado de 380 MW en Punta del Verde, Sevilla

Juan Antonio Anta (jaantmon@dex.upo.es)
Departamento de Ciencias Ambientales, Área de Química Física
Universidad Pablo de Olavide
Sevilla

1. CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO: EFECTOS DIRECTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE. CONTAMINANTES EMITIDOS.....	1
2. CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO: EFECTOS INDIRECTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE. CONTAMINANTES PRODUCIDOS.....	2
3. POTENCIALES EFECTOS SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE DE LOS CONTAMINANTES EMITIDOS Y PRODUCIDOS.....	2
4. DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES E IMPORTANCIA DE LA LOCALIZACIÓN DE LA CENTRAL CON RESPECTO AL NÚCLEO URBANO.....	3
5. EFECTO POTENCIAL SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE GLOBAL DE LA CIUDAD TENIENDO EN CUENTA SU SITUACIÓN ACTUAL.....	4
ANEXO 1: COMPARATIVA ENTRE LAS EMISIONES DE NO _x DE UNA CENTRAL TÉRMICA Y LAS DEL TRÁFICO RODADO.....	4
ANEXO 2: APLICACIÓN DE UN MODELO GAUSSIANO DE DISPERSIÓN.....	5
1. Introducción.....	5
2. Datos de la Central.....	6
3. Datos meteorológicos.....	6
3. Aplicación del modelo gaussiano.....	7
Altura efectiva de emisión.....	8
Estimaciones de concentración para NO _x	8
4. Discusión.....	9
Agradecimientos.....	10
Bibliografía.....	10

1. CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO: EFECTOS DIRECTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE. CONTAMINANTES EMITIDOS.

Una central térmica de ciclo combinado produce electricidad por combustión de gas natural (gas ciudad). Este gas está constituido básicamente por metano. La combustión de

este gas genera fundamentalmente dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua. Ninguna de estas dos sustancias se considera un contaminante en sí misma, las centrales térmicas de gas natural son las centrales térmicas más eficientes y menos contaminantes de las que actualmente dispone la industria.

No obstante hay que tener en cuenta lo siguiente:

- 1) Una central de estas características es susceptible de sufrir escapes de metano.
- 2) El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero. Sus emisiones están limitadas por el protocolo de Kyoto, firmado por España.
- 3) La combustión en aire produce, de manera subsidiaria, óxidos de nitrógeno (NO_x).
- 4) Una central de estas características^{iv} utiliza gasoil como combustible auxiliar. La combustión de fuel produciría, además de óxidos de nitrógeno, emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y partículas

En lo que se refiere a los óxidos de nitrógeno, la cantidad emitida es del orden de 3.2 toneladas/día (ver Anexo 2) lo cual equivale, aproximadamente, a 2 millones y medio de desplazamientos de 10 Km en coche. (ver Anexo 1). Otro dato muy significativo: se estimaⁱ que un tercio de los óxidos de nitrógeno de origen humano emitidos en Estados Unidos corresponden a centrales térmicas.

2. CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO: EFECTOS INDIRECTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE. CONTAMINANTES PRODUCIDOS.

Los contaminantes mencionados anteriormente evolucionan en la atmósfera. Tanto óxidos de nitrógeno como metano reaccionan entre sí y con otros contaminantes típicos de ambientes urbanos (por ejemplo hidrocarburos volátiles procedentes de los motores de los coches) así como con la luz del sol. El resultado es la producción de otros contaminantes a partir de los originalmente emitidos. De entre ellos, el más importante en una ciudad como Sevilla es el ozono. Está generalmente admitido que existe una correlación entre emisiones de óxidos de nitrógeno y niveles de ozono en ambientes urbanos^{ix,ii}. En resumen un incremento de emisiones de óxidos de nitrógeno conduce a mayores niveles de ozono. ¿En qué medida? Eso ya depende de una serie de factores, principalmente meteorológicos, geográficos y presencia de otros precursores.

3. POTENCIALES EFECTOS SOBRE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE DE LOS CONTAMINANTES EMITIDOS Y PRODUCIDOS.

En lo que se refiere a efectos sobre la salud humana:

- El dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano y el monóxido de nitrógeno no son en principio gases perjudiciales para la salud.
- El dióxido de nitrógeno actúa en la parte final del aparato respiratorio, los bronquios y los alveolos pulmonares. Normalmente se asocia con afecciones respiratorias tales como congestión y edema pulmonar así como enfisemas^{ix}.

- El ozono es un irritante de las vías respiratorias que también actúa en los bronquios y alveolos. Está generalmente aceptado que altos niveles de exposición de esta sustancia incrementan los riesgos de padecer edema y enfisema pulmonar, además de asma, que es quizá el riesgo para la salud más conocido y estudiado del ozono^{ix}. Existen numerosos estudios estadísticosⁱⁱⁱ que muestran que existe una correlación entre altos niveles de ozono (y otros contaminantes) e incrementos en el número de consultas hospitalarias relacionadas con afecciones respiratorias, principalmente asma. Estudios de laboratorio realizados con ratas y monos demuestran que el ozono contribuye a un envejecimiento prematuro de los pulmones.

En lo que se refiere a efectos sobre el medio ambiente:

- El ozono daña la cubierta vegetal. Existen una serie de plantas indicadoras de altos niveles de ozono: tabaco, tomate, espinaca, etc... Normalmente se evidencia como decoloración de las hojas.
- Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de lluvia ácida.
- El incremento de los niveles de dióxido de carbono conduce al calentamiento global de la Tierra.

4. DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES E IMPORTANCIA DE LA LOCALIZACIÓN DE LA CENTRAL CON RESPECTO AL NÚCLEO URBANO.

Para conocer el efecto real sobre los niveles de contaminación de Sevilla es necesario realizar un estudio cuidadoso de la dispersión de los contaminantes desde el punto de emisión, esto es, la chimenea de la central, hasta los lugares en los que se encuentra la población. Este estudio ha de tener en cuenta los siguientes factores:

- 1) Situación de la central, altura de la chimenea y presencia de obstáculos en las inmediaciones (por ejemplo, el Puente del Quinto Centenario)
- 2) Velocidad, temperatura y cantidad de emisión de los gases, en especial con datos referidos a los óxidos de nitrógeno.
- 3) Dirección de los vientos dominantes y presencia de inversiones térmicas.

Hay que tener en cuenta que los vientos dominantes en Sevilla son de componente suroeste (ver por ejemplo los datos correspondientes a la estación meteorológica de Puebla del Río). Este es un hecho clave porque implica que el grueso de los contaminantes producidos en la central van a parar a Sevilla, no sólo a los barrios periféricos, Bermejales, Distrito Sur, etc..., sino el conjunto de la ciudad y hasta una distancia que podríamos fijar en torno a los 10 Km (Ver Anexo 2). Un estudio numérico preliminar, muy sencillo pero no por ello menos riguroso, realizado en nuestro departamento indica que la emisión de óxidos de nitrógeno procedentes de la central conduciría a un incremento comprendido entre 1 y 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de óxidos de nitrógeno a 3 Km de distancia de la central (esto correspondería más o menos a la distancia de Punta del Verde a la Catedral). A esta estimación aproximada habría que añadir el efecto de inversiones térmicas, que son frecuentes en Sevilla, especialmente en verano. La presencia de una inversión térmica a una altura superior a la efectiva de emisión es equivalente a la

existencia de un “techo” o límite superior en la atmósfera que contribuye a la acumulación de los contaminantes sobre la superficie.

5. EFECTO POTENCIAL SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE GLOBAL DE LA CIUDAD TENIENDO EN CUENTA SU SITUACIÓN ACTUAL.

Distinguiremos sobre efectos esperables debidos al incremento de óxidos de nitrógeno, y efectos debidos al incremento de ozono.

- Los niveles de óxidos de nitrógeno actualmente medidos en el centro de Sevilla, por ejemplo en la estación de Torneo (y que pueden consultarse en los servidores de internet de la Conserjería de Medio Ambiente^{xvi}) suelen dar valores típicos comprendidos entre 30 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El impacto estimado de la instalación de la central conforme a los resultados mencionados anteriormente estaría comprendido entre 3 y el 5%.
- En cuanto a los niveles de ozono resulta necesario considerar que es este el problema principal de contaminación atmosférica de Sevilla. Este contaminante ha superado los niveles en los que las administraciones están obligadas a informar al público en numerosas ocasiones, especialmente en verano (por ejemplo, 33 veces en Agosto del año pasado, la mayoría de las veces en el Aljarafe, pero también en Bermejales, San Jerónimo, Santa Clara, etc...)

Resulta difícil estimar el efecto cuantitativo en la generación de ozono en Sevilla como consecuencia de un incremento real del vertido de óxidos de nitrógeno producidos en la central. Hay que tener en cuenta numerosos factores, meteorológicos, geográficos y de condiciones atmosféricas. Un estudio muy riguroso ha de llevarse a cabo que tenga en cuenta las particularidades de Sevilla.

ANEXO 1: COMPARATIVA ENTRE LAS EMISIONES DE NO_x DE UNA CENTRAL TÉRMICA Y LAS DEL TRÁFICO RODADO

- Emisiones típicas de una central de ciclo combinado de 380 MW^{iv}: 135 Kg/hora
- Emisiones típicas de vehículos de combustión (datos extrapolados al año 2003^v): 0.2 g/milla

Asumiendo desplazamientos de 10 km de media, las emisiones diarias de la central equivaldrían a:

$$135000 \text{ g/hora} \times 24 \text{ horas} / 1.25 \text{ g} \approx \underline{2600000 \text{ desplazamientos}}$$

No obstante, este dato ha de tomarse con la consabida reserva, por dos razones:

- 1) En lo que respecta al efecto en los niveles de NO_x, las emisiones de la central se producen a cierta altura y a cierta distancia del centro de la ciudad, con la consiguiente disminución en la concentración.

- 2) En lo que respecta a la producción de ozono, no tiene el mismo efecto relativo una fuente concentrada, como sería la chimenea de la central, que una fuente difusa, como sería el efecto combinado de los tubos de escape de todos los coches de la ciudad. Está demostrado que una fuente difusa da lugar a mayores niveles de ozono que una fuente concentrada^{vi}

ANEXO 2: APLICACIÓN DE UN MODELO GAUSSIANO DE DISPERSIÓN

1. Introducción

A continuación se presenta un estudio del efecto ocasionado en la calidad del aire en la ciudad de Sevilla de una central térmica de ciclo combinado en la zona conocida como Punta del Verde, en los alrededores del Puente del Quinto Centenario. La estimación se ha realizado a partir de los datos correspondientes a centrales térmicas de características similares^{vii} e información relativa a la meteorología y climatología de Sevilla^{viii}. Los resultados se han obtenido mediante un modelo gaussiano de dispersión^{ix} y han de entenderse como de naturaleza aproximada, dado que los datos de concentración de contaminantes dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas, velocidad y dirección del viento, así como estabilidad atmosférica e inversiones térmicas. No obstante, los resultados pueden resultar orientativos en lo que respecta al impacto en la calidad del aire de la instalación de una central de estas características y además proporcionan un metodología de cálculo que es susceptible de posteriores aplicaciones, extensiones y mejoras.

2. Datos de la Central

El modelo gaussiano ha sido aplicado a una central térmica de ciclo combinado de 380 megawattios con las siguientes características^{vii}:

- Emisión de óxidos de nitrógeno NO_x: 37.3 g/s (135Kg/hora)^x
- Caudal de gases: 621Nm³/s
- Velocidad de salida de los gases: 16.7 m/s
- Temperatura de salida de los gases: 134°C
- Altura de chimenea: 65 m
- Diámetro interno de la chimenea (en la coronación): 7 metros

3. Datos meteorológicos

Los datos referentes a las condiciones meteorológicas en las que se espera funcione la central han sido estimados a partir de mediciones históricas, correspondientes a los años comprendidos entre 2000 y 2004, y que han sido registradas por la estación meteorológica de Puebla del Río. Estos datos se pueden obtener a partir de la correspondiente página web de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía^{viii}.

Se contemplarán dos situaciones típicas, una que represente el invierno, con datos correspondientes al mes de enero, y otra que representaría el verano, con datos correspondientes al mes de julio. A partir de valores medios registrados en la estación meteorológica anteriormente mencionada, para los meses y años mencionados, se pueden establecer los siguientes valores típicos:

	ENERO	JULIO
Velocidad del viento (m/s)	2.5	1.5
Dirección del viento	150-200 (suroeste)	200 (sur-suroeste)
Temperatura media (°C)	11	25
Radiación (MJ/m ²)	9	28

En lo que sigue realizaremos cálculos en condiciones diurnas. Las estimaciones de contaminante durante la noche, tanto NO_x como O₃ resultan ser muy pequeñas y no se considerarán. Asumiendo por tanto condiciones diurnas se establecen las siguientes clases de estabilidad atmosférica según Pasquill^{xi} a partir de los datos anteriores

	ENERO	JULIO
Clase de estabilidad	B (inestable)	A (muy inestable)
Gradiente térmico (K/m)	-0.01	-0.02

En la Figura 1 se muestra un mapa de Sevilla en el que se indica la situación de la central de Punta del Verde y la dirección aproximada de los vientos predominantes. El centro de la ciudad se encuentra a una distancia aproximada de 3 kilómetros de la central y además sobre la línea que marca la dirección predominante del viento. Es precisamente sobre esta línea donde se espera que se produzcan los máximos de concentración de contaminante.

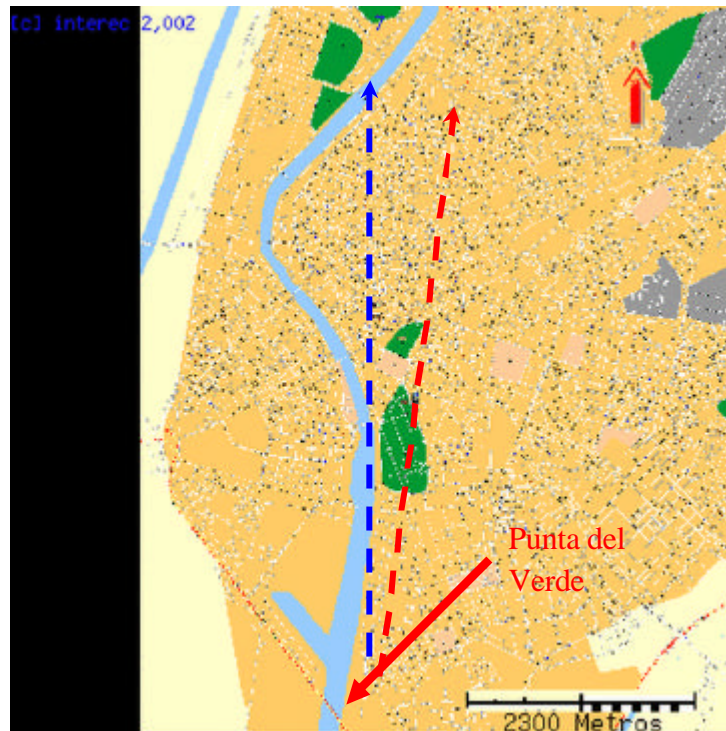


Figura 1. Mapa de Sevilla mostrando la situación de la central de Punta del Verde y la dirección de los vientos predominantes en Enero (azul) y Julio (rojo). La estación meteorológica de Puebla del Río se encontraría fuera del mapa, en dirección sur.

3. Aplicación del modelo gaussiano

En este trabajo vamos a hacer un uso de un modelo gaussiano en dos dimensiones^{ix}. Conforme a este modelo la concentración de contaminante C en una posición con coordenadas x,y,z viene dada por^{xii}:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2p u_H s_y s_z} e^{-\frac{y^2}{2s_y^2}} e^{-\frac{(z-H)^2}{2s_z^2}}$$

donde Q es el índice de emisión de contaminante en g/s, u_H es la velocidad del viento en m/s a altura H , siendo H la altura efectiva de la chimenea, y σ_y y σ_z son los coeficientes de dispersión lateral y vertical respectivamente. En el modelo gaussiano el eje X corresponde a la dirección del viento, mientras que el eje Y corresponde a la dirección perpendicular. El eje Z representa por su parte la altura.

Los coeficientes de dispersión son función de la distancia a la fuente (coordenada x), de la clase de estabilidad atmosférica y del tipo de suelo, en este caso *urbano*. En este trabajo se han determinado a partir de expresiones empíricas debidas a Griffiths^{xiii}.

Altura efectiva de emisión

En este trabajo se ha determinado H mediante la fórmula empírica de Briggs^{ix} que tiene en cuenta el efecto de la velocidad y temperatura de los gases emitidos, así como el grado de estabilidad atmosférica. Por otra parte, uno de los principales datos de entrada del modelo gaussiano es la velocidad del viento a una altura efectiva H . Esta velocidad se ha determinado utilizando la siguiente ley potencial^{xi}

$$u(z) = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad z < 200 \text{ m}$$

donde u_{10} es la velocidad del viento a 10 metros y z es la altura. Por su parte p es un exponente que depende de la estabilidad atmosférica y del tipo de suelo (urbano o rural) y que se ha determinado a partir de tablas empíricas^{xiv}. Para alturas superiores a 200 metros se supone una velocidad constante

$$u(z) = u_{200} \quad z > 200 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta los datos referidos a la central y las condiciones atmosféricas tipo descritas anteriormente (la velocidad del viento a 10 metros se ha tomado igual al dato meteorológico), se obtienen los siguientes valores para la altura efectiva de emisión y la velocidad de viento a dicha altura

	ENERO	JULIO
Altura efectiva de emisión, H (m)	505	1100
Velocidad del viento, u_H (m/s)	3.91	2.35

A este respecto es interesante destacar que debido a la relativamente alta velocidad de emisión de los gases (16.7 m/s) y a la relativamente baja velocidad del viento (2.5 y 1.5 m/s respectivamente) la altura efectiva de emisión es muy grande y ello, en principio, favorece una mejor dispersión de los contaminantes.

Estimaciones de concentración para NO_x

Con todos los datos y derivaciones anteriores se ha aplicado el modelo gaussiano para estimar las concentraciones de NO_x a ras del suelo ($z = 0$) y en eje marcado por la dirección del viento ($y = 0$). Los cálculos que se presentan corresponden a tres distancias: 1, 2 y 3 Km respectivamente. Como se ha mencionado anteriormente, teniendo en cuenta la dirección de los vientos predominantes y la situación de la central, el dato correspondiente a 3 Km correspondería al valor esperable en el centro de la ciudad. Los resultados son los siguientes:

ENERO	σ_y / metros	σ_z / metros	$C_{NO_x} / \mu\text{g m}^{-3}$
x = 1000 m	270	229	0.91
x = 2000 m	477	438	2.95
x = 3000 m	647	631	2.41

JULIO	σ_y / metros	σ_z / metros	C_{NO_x} / $\mu\text{g m}^{-3}$
x = 1000 m	270	229	0.00
x = 2000 m	477	438	0.51
x = 3000 m	647	631	1.35

A estos valores se ha de aplicar el efecto del tiempo de permanencia típico de estos compuestos en la atmósfera. Un valor aceptado^{xv} corresponde a un tiempo de vida media de 24 horas. Teniendo en cuenta la velocidad del viento a la altura efectiva de emisión, este dato implica que las concentraciones de NO_x no disminuirían apreciablemente, con respecto a los valores del modelo gaussiano, hasta distancias superiores a los 10-20 kilómetros.

4. Discusión

Los datos ofrecidos en la sección anterior corresponden a la concentración de óxidos de nitrógeno debida únicamente al impacto producido por el funcionamiento de la central. Estos números deben ser pues contrastados con los límites legales y los valores históricos medidos en la ciudad de Sevilla^{xvi}. El umbral de alerta (media de una hora) conforme a la legislación vigente establecido para óxidos de nitrógeno es de $400 \mu\text{g m}^{-3}$. Este umbral ha sido rebasado en el año 2001 en la estación de control situada en la calle Torneo y “rozado” en las estaciones de Enramadilla y Santa Clara, que registraron valores máximos de 399 y $390 \mu\text{g m}^{-3}$ respectivamente. El límite legal para media anual es de $40 \mu\text{g m}^{-3}$. En el Informe de “Medio Ambiente en Andalucía” correspondiente al año 2001^{xvii} se ofrece el dato de $16 \mu\text{g m}^{-3}$ como valor típico registrado en ciudades andaluzas de más de 100000 habitantes. Las estimaciones ofrecidas en este estudio para el centro de Sevilla nos darían, con respecto a este valor, un incremento en la concentración de NO_x , consecuencia de la instalación de la central, del orden del 15% y del 8% para enero y julio respectivamente. Como dato adicional destacar que estación de control de Bermejales, situada a una distancia aproximada de 1Km de Punta del Verde da valores de NO_2 comprendidos 30 y $100 \mu\text{g m}^{-3}$, con un valor típico del orden de $60 \mu\text{g m}^{-3}$ (dato correspondiente al 15 de Marzo de 2004^{xvi}). El impacto estimado de una contribución adicional procedente de la central ($1 \mu\text{g m}^{-3}$) sería pues del orden del 1.7 %. Por otro lado la estación de Torneo daba en la misma fecha valores típicos alrededor de 30-40 $\mu\text{g m}^{-3}$. En este caso el impacto estimado a esa distancia ($1.5 \mu\text{g m}^{-3}$) daría un incremento comprendido entre el 3 y el 5%.

Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación de ozono troposférico por lo que también es esperable un incremento en la contaminación por ozono. Es difícil estimar con precisión el incremento en las concentraciones de ozono. Ello requeriría un estudio mucho más detallado que involucre la cinética de todas las reacciones atmosféricas implicadas y la disponibilidad de otros precursores de ozono también presentes en el ambiente urbano. No obstante, se puede establecer de manera aproximada que la velocidad de producción de ozono es proporcional a la concentración de NO_x ^{xv}. Sin embargo no es riguroso deducir que la concentración de O_3 también se vería incrementada también de forma lineal aunque se puede tomar el resultado obtenido por este método como límite superior. Conforme a ello, los datos ofrecidos anteriormente para incrementos estimados de NO_x en tanto por ciento pueden ser también tomados como orientativos para el correspondiente incremento en las concentraciones de ozono. Así, el valor ofrecido por el informe de la Junta de Andalucía para

el año 2001^{xvii} da $17 \mu\text{g m}^{-3}$ como valor anual medio para ciudades de más de 100000 habitantes. Un incremento del orden del 5% incrementaría este valor en un microgramo y esto debe ser comparado con el límite legal (media de 24 horas) de $60 \mu\text{g m}^{-3}$. Otro dato a comparar es que la estación de Centro ha dado, para el pasado mes de enero de 2004, una media de concentración de ozono de $25 \mu\text{g m}^{-3}$ con un máximo $50 \mu\text{g m}^{-3}$ registrado a mitad de mes. Un incremento del orden del 10% (un poco inferior al 15% estimado en concentración de NO_x para el mes de Enero a 3 km de distancia de la central) elevaría el valor medio a $27 \mu\text{g m}^{-3}$ y el máximo a $55 \mu\text{g m}^{-3}$, muy cerca del límite legal.

Por último, destacar que en el presente estudio no se ha tenido en consideración el efecto de inversiones térmicas, frecuentes en verano en la ciudad de Sevilla. Una inversión térmica diurna, en condiciones de fuerte insolación y situada a una altura de unos 100-200 metros (por ejemplo, limitada por los altos del Aljarafe) tendría un efecto muy notable en las concentraciones de NO_x (y por tanto también de ozono) en el núcleo urbano de Sevilla.

Agradecimientos

José Antonio Mejías Romero, del Área de Química Física, ha proporcionado la versión inicial del programa con el que se han realizado los cálculos de modelo gaussiano.

Pedro Ribera Rodríguez, del Área de Física de la Tierra, ha proporcionado las fuentes de las cuales se han extraído los datos meteorológicos utilizados en este trabajo.

Ambos son profesores del Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

Bibliografía

ⁱ NV. Gillani y col. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **103**, 22593 (1998)

ⁱⁱ Consultar, a modo de ejemplo, los siguientes trabajos: RY Zhang y col., *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**, 6346 (2004); CY Chan y col., *Ozone-Science and Engineering*, **25**, 513 (2003); RA Zaveri y col., *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **108**, 4436 (2003); L. Gimeno y col. *Chemosphere*, **38**, 3061 (1999)

ⁱⁱⁱ Consultar por ejemplo: I. Galán y col. *European Respiratory Journal*, **22**, 802 (2003); JM Tenias y col., *Archives of environmental Health*, **57**, 41 (2002); F. Ballester, *Journal of Epidemiology and Community Health*, **55**, 57 (2001); S.K. Kjaergaard y col., *Journal of Applied Physiology*, **96**, 1651 (2004); etc...

^{iv} Véase informe de impacto ambiental para la central térmica "Cristóbal Colón" de Huelva, contenido en la Resolución 5170 del 13 de Febrero de 2003 de la Secretaría General del Medio Ambiente (BOE del 12 de Marzo de 2003)

^v N. de Nevers, *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*, McGraw-Hill, México (1998)

^{vi} G. P. Brasseur, J.J. Orlando y G. S. Tyndall, *Atmospheric Chemistry and Global Change*, Oxford University Press, New York (1999)

^{vii} Véase informe de impacto ambiental para la central térmica "Cristóbal Colón" de Huelva, contenido en la Resolución 5170 del 13 de Febrero de 2003 de la Secretaría General del Medio Ambiente (BOE del 12 de Marzo de 2003)

^{viii} Datos extraídos de la página web de Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/estacionesAgroclimaticas> (estación meteorológica de Puebla del Río)

^{ix} R.J. Heinsohn y R.L. Kabel, *Sources and Control of Air Pollution*, Prentice Hall, New Jersey, 1999

^x Suponemos que la central funciona usando gas natural como combustible y en ese caso el principal contaminante emitido son los óxidos de nitrógeno. Sin embargo estas centrales pueden funcionar también

utilizando fuel como combustible alternativo. En ese caso la cantidad de NO_x se incrementa y además se emitiría óxido de azufre SO_2 . Sin embargo en el presente estudio consideramos únicamente la primera de las situaciones.

^{xi} S. R. Hanna, G. A. Briggs y R. P. Hosker, *Handbook on Atmospheric Diffusion*, Springfield, VA (1982)

^{xii} Esta versión del modelo corresponde a un contaminante absorbido por el suelo, como es el caso de los óxidos de nitrógeno

^{xiii} R. F. Griffiths, *Atmospheric Environment*, vol. **81**, no. 17, pp 856-858

^{xiv} D.B. Turner, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An introduction to Dispersion Modeling*, 2nd Edition, Lewis Publishers, Boca Raton, F.L.

^{xv} G. P. Brasseur, J. J. Orlando y G. S. Tyndall, eds. *Atmospheric Chemistry and Global Change*, Oxford University Press.

^{xvi} Página web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía,

<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>

^{xvii} “Informe de Medio Ambiente en Andalucía 2001”, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía