



Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Puertos del Estado

PROYECTO HADA
Herramienta Automática de Diagnóstico
Ambiental
LIFE2 ENV/E/000274

INFORME

**Implantación de un sistema de
modelización atmosférica en áreas
portuarias y
determinación de factores de emisión**

Realizado por

Fernando Martín e Inmaculada Palomino

Simulación Numérica y Modelización de Procesos
Departamento de Combustibles Fósiles
CIEMAT

Marzo de 2004

INDICE

INTRODUCCION	1
AMBITO Y ALCANCE DE ACTUACIÓN	2
ACTIVIDADES	2
<u>Diseño del sistema informático</u>	3
<u>Determinación de ubicación óptima de los sensores de contaminación y estaciones meteorológicas</u>	7
<u>Desarrollo e implantación del modelo PORTPUFF</u>	9
Modelo de dispersión PORTPUFF	10
Simulaciones con el modelo PORTPUFF para el Puerto de A Coruña	22
Adaptación del modelo CALMET	32
<u>Preparación de datos adicionales</u>	40
<u>Desarrollo e implantación del módulo SEDPORT</u>	43
<u>Análisis de las concentraciones de partículas debidas a fuentes ajenas a los puertos</u>	61
<u>Desarrollo e implantación del modelo de emisiones EMIPORT</u>	62
Recopilación de información existente	63
Estimación de factores de emisión	65
Procedimiento de recálculo de emisiones	72
<u>Comprobación y validación del sistema informático</u>	75
CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS	77

INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde a las actividades realizadas hasta la fecha por los investigadores del Grupo de Modelización de la Contaminación Atmosférica Departamento de Combustibles Fósiles del CIEMAT en el marco del proyecto HADA (Herramienta Automática de Diagnóstico Ambiental – LIFE2 ENV/E/000274) coordinado por el Ente Público Puertos de Estado (EPPE) y en el que participan diversas autoridades portuarias españolas y al que contribuyen diversas empresas e instituciones entre ellas CIEMAT.

Los trabajos en este proyecto comenzaron en Octubre de 2002. No obstante, antes de la aprobación del proyecto HADA, se gestionó y firmó un acuerdo de colaboración entre EPPE, Autoridad Portuaria de A Coruña (APAC), Universidad de Santiago de Compostela (USC) y CIEMAT, estando, sin embargo, sus actividades integradas en el proyecto HADA.

Los antecedentes de la participación de nuestro grupo investigador en este proyecto remontan a los años 2000 y 2001, cuando se desarrolló un proyecto para la Autoridad Portuaria de Valencia en colaboración con la empresa Soltek y coordinado por el EPPE.

En la primera fase de dicho proyecto, se realizaron simulaciones de la dispersión de PM10 con el modelo MELPUFF (MEsoscale Lagrangian PUFF model) (Palomino et al, 2001) para un conjunto de 38 escenarios meteorológicos que cubren la práctica totalidad de condiciones atmosféricas esperadas a lo largo de las cuatro estaciones del año. Previo a las simulaciones con MELPUFF, se simulaban las circulaciones atmosféricas asociadas a dichos escenarios mediante un modelo meteorológico a mesoscala llamado TVM (Topographic Vorticity-mode Model) (Thunis y Clappier, 2000 y Martín et al, 2001). Del análisis de las simulaciones con ambos modelos, se concluyó que los escenarios de mayor impacto en zonas urbanas están relacionados con flujos del Este y con circulaciones de brisas marinas diurnas.

En la segunda fase del proyecto, se desarrolló un sistema informático para predecir las concentraciones de PM10 con el modelo MELPUFF, que puede trabajar en tiempo real, pero también puede abordar casos pasados y casos hipotéticos. Tanto en tiempo real como en los casos de eventos pasados, el sistema utiliza la información meteorológica de estaciones instaladas en el mismo puerto. En el caso de eventos hipotéticos, el sistema utiliza una base de datos de campos meteorológicos estimados con TVM. Entre los otros resultados, el sistema produce mapas de concentración de PM10 y campos de vientos.

Un poster sobre este sistema ha sido presentado en la última edición del Congreso Nacional de Medio Ambiente (VI CONAMA) celebrado en Madrid (25-29 de noviembre de 2002).

AMBITO Y ALCANCE DE ACTUACIÓN

Enmarcado en la problemática de la contaminación atmosférica por material pulverulento en entornos portuarios españoles, la contribución del Grupo de Modelización de la Contaminación Atmosférica del CIEMAT al proyecto HADA se agrupa en las siguientes líneas de trabajo:

1. Desarrollo de un sistema informático de seguimiento, control y predicción de la contaminación atmosférica por partículas en suspensión basado en modelos matemáticos desarrollados y adaptados para este proyecto e incluyendo el desarrollo de un nuevo esquema para el tratamiento del depósito de partículas sobre la superficie con especial interés en las partículas de tamaño suficiente para considerarse sedimentables. Los puertos objeto de este desarrollo son A Coruña, Barcelona, Cartagena, Huelva, Tarragona y Valencia. En este último, básicamente se actualizará el sistema desarrollado e implantado en un proyecto anterior. En la medida de lo posible, estas actuaciones se extenderán a los puertos de Bilbao y Santander.
2. Desarrollo de un modelo de emisiones de partículas atmosféricas resultantes de las operaciones portuarias de carga, descarga, transporte, almacenamiento y manipulación de graneles sólidos.

ACTIVIDADES

Las actividades en las que se ha trabajado y se tiene previsto trabajar son las siguientes:

1. Diseño del sistema informático (Acción 1 - Tarea 4047).
2. Determinación de ubicación óptima de los sensores de contaminación y estaciones meteorológicas (Acción 1 - Tarea 4041).
3. Desarrollo e implantación del modelo Portpuff (Acción 1 - Tarea 4045).
4. Preparación de datos adicionales (Acción 1 - Tarea 4045).
5. Desarrollo e implantación del módulo Sedport para el tratamiento de partículas sedimentables (Acción 2 - Tarea 4045).
6. Análisis de las concentraciones de partículas debidas a fuentes ajenas a los puertos (Acción 2 - Tarea 4075).
7. Desarrollo del modelo de emisiones Emiport (Acción 2 - Tarea 4075 y Acción 1 - Tarea 4073).
8. Comprobación y validación del sistema informático (Acción 1 - Tarea 4045).

A continuación, se muestra el grado de avance, el estado de los trabajos y los resultados más relevantes de cada una de las actividades antes indicadas.

Diseño del sistema informático

El diseño del sistema informático de seguimiento, control y predicción de la contaminación atmosférica por partículas en suspensión se ha realizado teniendo en cuenta las peculiaridades de cada puerto, aunque manteniéndose en un esquema general común. Se ha contado también con la experiencia adquirida en el desarrollo e implantación del sistema informático desarrollado en los años 2000 y 2001 para el Puerto de Valencia, sirviendo éste como prototipo de partida para el nuevo sistema.

El esquema conceptual del sistema informático para el control y predicción de la contaminación atmosférica por partículas a implantar en diferentes puertos españoles tendrá que cubrir todas las posibles situaciones en las que sea necesario disponer de información sobre calidad del aire asociada a las operaciones portuarias de graneles sólidos.

En la figura 1, se muestra el esquema conceptual diseñado. Se pretende disponer de predicciones meteorológicas a 24 o 48 horas a escala sinóptica, constituidas por campos meteorológicos en una malla tridimensional de diversas variables meteorológicas (velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad relativa) y en superficie (cobertura de nubes, altura de las nubes bajas, presión, tasa de precipitación). Esta predicción será provista por la Universidad de Santiago de Compostela con el modelo ARPS para el Puerto de A Coruña, por la Universidad de Barcelona mediante el modelo MASS para los puertos de Barcelona, Tarragona, Valencia y Cartagena y por el Instituto Nacional de Meteorología mediante el modelo HIRLAM para los puertos de Huelva y Santander. Queda por definir la provisión de la predicción meteorológica para el puerto de Bilbao, pero en caso de confirmarse ninguna alternativa se optaría por la utilización del modelo HIRLAM.

Las predicciones obtenidas con estos modelos corresponden a mallas de cálculo cuya resolución espacial oscila entre 100 y 200 Km². Esta resolución resulta demasiado burda para poder ser utilizada de forma eficiente y fiable por el modelo de dispersión. Por este motivo, se hace necesario realizar una predicción de mayor resolución espacial a partir de las predicciones a escala sinóptica. Esto es lo que se conoce como downscaling meteorológico. Para este proceso de downscaling, se suelen utilizar modelos de diagnóstico meteorológico que alimentados con los campos meteorológicos predichos a escala sinóptica permiten realizar un zoom, obteniendo campos meteorológicos en área más restringida pero con más detalle teniendo en cuenta las características particulares del orografía y el tipo de uso del terreno.

La Universidad de Santiago de Compostela ha trabajado también en la puesta a punto de forma operativa de un módulo llamado ARPSINTPR, que entronca directamente con las predicciones meteorológicas del modelo ARPS. Con este procedimiento, se obtienen campos de diversas variables meteorológicas (ver siguientes secciones) en un área de 60x60 Km² en torno al Puerto de A Coruña.

Para los demás puertos implicados, el proceso de downscaling será realizado por el modelo de diagnóstico meteorológico CALMET (Scire et al., 1999). La aplicación de este modelo permitirá obtener campos de diversas variables meteorológicas en un área de 60x60 Km² alrededor de cada puerto. En secciones posteriores, se expone con cierto detalle las características de este modelo y la información que proporciona.

Estos modelos de diagnóstico precisan de información detallada de la topografía del terreno y de los tipos de uso de suelo en cada celda de la malla de cálculo.

Los modelos de diagnóstico meteorológico podrán ser también utilizados para obtener campos meteorológicos a partir de los datos proporcionados en tiempo real por las estaciones meteorológicas instaladas en cada uno de los puertos implicados. Estos campos servirán de diagnóstico en tiempo real de las condiciones atmosféricas en cada puerto. Es decir, la aplicación del downscaling a las predicciones meteorológicas a 24-48 horas a escala sinóptica proporcionará predicciones más finas en esa misma base de tiempo y la aplicación de modelos de diagnóstico a las mediciones de las estaciones dará lugar a estimaciones más precisas del estado presente en cada instante de tiempo. Las primeras servirán para obtener predicciones de la dispersión de contaminantes a uno o dos días y las segundas, para tener un diagnóstico del estado de la contaminación en tiempo real.

La estimación de la dispersión de contaminantes se realiza mediante el modelo PORTPUFF, que lleva incorporado un nuevo módulo de cálculo del depósito de partículas en suspensión (SEDPORT), aplicado a una malla de cálculo de 60x60 Km². El modelo de dispersión precisará de las emisiones debidas a las actividades portuarias estimadas mediante un modelo de emisiones EMIPORT desarrollado para este sistema, la concentración de partículas en los monitores instalados en cada puerto, la topografía digitalizada y los usos de suelo. PORTPUFF está diseñado para ofrecer mapas de concentración y depósito de distintos rangos de tamaños de partículas con una resolución del orden de 200x200 m² en un dominio de unos 10x10 Km² cubriendo cada puerto.

ESQUEMA DEL SISTEMA INFORMATICO PARA CONTROL Y PREDICCIÓN DE CONTAMINACIÓN

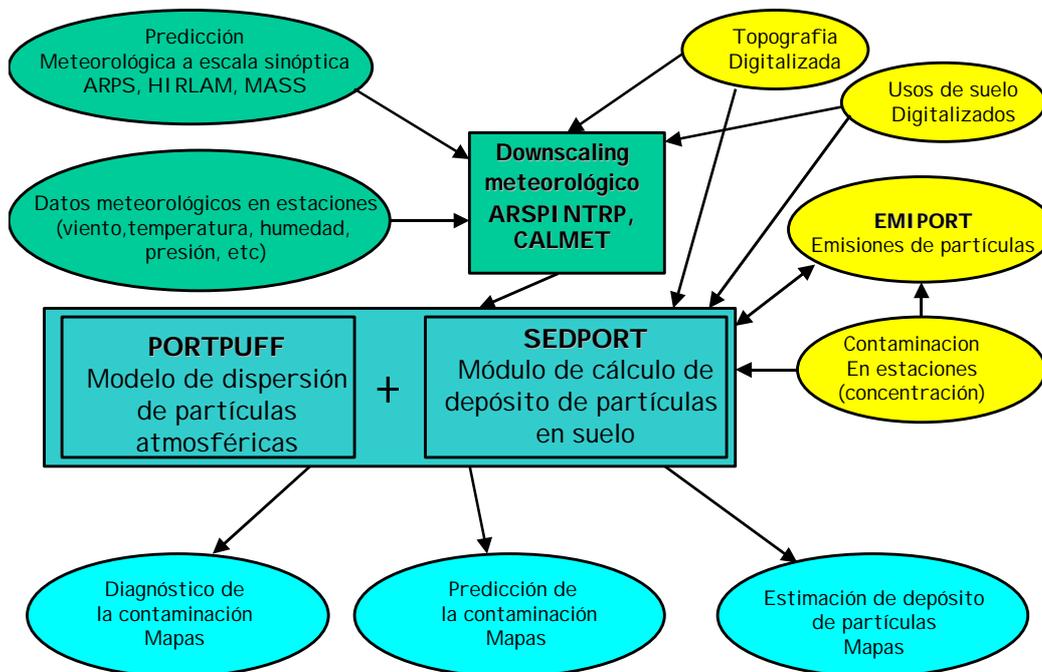


Figura 1. Esquema conceptual de los diversos elementos del Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos.

En cuanto al modo de funcionamiento, se han planteado cuatro posibles tipos de escenarios para ofrecer resultados en tiempo real, predicciones con un día de antelación (24-48 h), análisis a tiempo pasado y análisis de escenarios hipotéticos diseñados por el propio usuario del sistema informático. Cada uno de estos escenarios requeriría la definición de una interfase entre el modelo de dispersión y el sistema informático que permita la preparación de los datos de entrada, la ejecución del modelo, el tratamiento de las tasas de emisión y la presentación de resultados gráficos que cada simulación requiera.

A continuación se exponen las características básicas y distintas posibilidades de aplicación de cada uno de ellos, tal como han sido consideradas.

A) Escenario en tiempo real

Este escenario tendría por objetivo el proporcionar los niveles de contaminación y depósito de partículas asociados a operaciones portuarias que se estén realizando en tiempo real utilizando únicamente como datos de entrada las medidas meteorológicas y de contaminación disponibles en tiempo real en las estaciones de los puertos.

Se ejecutarán los modelos de diagnóstico meteorológico pertinentes (ARPSINTPR o CALMET) con datos meteorológicos de estaciones en un periodo que cubre las dos horas anteriores al instante de ejecución y no más de una o dos horas hacia delante. Posteriormente, se realizará la ejecución del modelo de dispersión PORTPUFF alimentado con información generada por los modelos meteorológicos, emisiones, topografía y usos de suelo, para obtener finalmente las concentraciones de partículas en aire y la cantidad depositada en suelo en los entornos portuarios, asociada a las operaciones de carga, descarga, almacenamiento y transporte de graneles sólidos.

B) Escenario para predicción

El resultado de la aplicación de este escenario sería la obtención de una predicción meteorológica, de inmisión y depósito de partículas, con al menos 24 h de antelación (resultante de aplicar el downscaling a las predicciones de los modelos meteorológicos a escala sinóptica), sobre el área de influencia de los puertos, basada en:

- La estimación de emisiones asociadas a las operaciones portuarias previstas para el día siguiente, mediante un modelo de emisiones.
- La predicción de los parámetros meteorológicos que condicionan la dispersión de dichas emisiones (y que también influyen en ellas), mediante un modelo predictivo y de asimilación de datos meteorológicos.

Con esta información el modelo de dispersión PORTPUFF permitiría estimar, a lo largo de todo el día siguiente, las concentraciones de partículas en aire y la cantidad depositada en suelo en los entornos portuarios.

Además, será posible evaluar la influencia de cada operación portuaria de forma individual, o combinada con cada una de las previstas, mediante ejecuciones sucesivas del modelo de dispersión con distintas estimaciones de emisiones, aplicando la misma predicción meteorológica. De esta forma, las autoridades portuarias podrán planificar

con antelación las operaciones a realizar, que garanticen la no superación de los niveles de inmisión y depósito exigidos.

C) Escenario en tiempo pasado

El objetivo de este escenario es proporcionar los niveles de concentración y depósito de partículas alcanzados como consecuencia de las operaciones portuarias realizadas en días anteriores. La ejecución de este escenario podrá realizarse considerando también las mismas alternativas que en el escenario anterior, es decir:

- Utilizando como datos de entrada la información meteorológica y de contaminación recogida por las estaciones de los puertos y almacenada en una base de datos.
- Utilizando las predicciones de 24-48 h del modelo meteorológico ya elaboradas en ejecuciones previas, y los datos de las estaciones de contaminación de los puertos como datos de entrada que también hayan sido almacenados.

D) Escenario hipotético

El escenario hipotético pretende ofrecer una predicción de los niveles de concentración y depósito de partículas en escenarios diseñados por el usuario del sistema informático. En este caso, el modelo de dispersión PORTPUFF será alimentado con las predicciones realizadas por el modelo meteorológico para escenarios meteorológicos concretos.

De acuerdo con estos escenarios, el sistema informático estará alimentado por predicciones meteorológicas, las cuales servirán para proporcionar una predicción de la distribución espacial de concentraciones de partículas y su evolución a lo largo del día partiendo del conocimiento de las operaciones portuarias previstas y existencia de focos emisores.

Determinación de ubicación óptima de los sensores de contaminación y estaciones meteorológicas

Se han realizado una serie de visitas a la mayor parte de los puertos (A Coruña, Valencia, Cartagena, Huelva y Tarragona) y de otros puertos se ha contado con información preparada por técnicos de cada puerto y por Puertos del Estado. Durante estas visitas, se han tomado fotografías de lugares que pudieran ser candidatos a ser instalado algún tipo de equipamiento. Se ha contado con planos de los puertos y se han analizado las circulaciones de aire más probables con objeto de determinar que lugares pudieran ser apropiados para tener mediciones representativas.

El criterio general que se ha seguido ha considerado los factores siguientes:

- 1) Representatividad de las medidas.
- 2) Evitar interferencia de obstáculos (apantallamiento de edificios).
- 3) Seguridad de los equipos (evitar zonas donde pueda sufrir daños).
- 4) Logística (cercanías de acometidas de luz y fibra óptica para garantizar la transmisión de datos a un centro de control).

En cuanto a las estaciones meteorológicas, se han buscado lugares que fueran complementarios a las estaciones meteorológicas ya existentes en cada puerto con objeto de tener una representación espacial más detallada de las condiciones atmosféricas (especialmente velocidad y dirección de viento).

En cuanto a las estaciones de medida de la contaminación, en los puertos donde ya existiera alguna cabina (Tarragona y Valencia), se ha analizado la idoneidad de su ubicación implicando en ambos casos el traslado de los equipos por estar demasiado cerca de zonas de estacionamiento, parada y arranque de camiones. En los demás puertos se han propuesto ubicaciones que cumplieran los criterios expuestos, pero que además garantizaran que las concentraciones de partículas medidas sean en su mayor parte debidas a las operaciones portuarias con graneles sólidos. Por ello, se ha buscado que los equipos estén instalados en lo posible en línea con los muelles de operaciones con graneles teniendo en cuenta las direcciones más probables del viento.

Estas propuestas de ubicación fueron comunicadas a los técnicos de los puertos y al coordinador del proyecto la mayor parte de las veces durante las visitas realizadas.



Figura 2. Ubicación propuesta para los equipos en Escombreras-Puerto de Cartagena.



Figura 3. Ubicación propuesta para los equipos en Puerto de Huelva.

Desarrollo e implantación del modelo PORTPUFF

El modelo de dispersión desarrollado para su implantación en el Sistema Informático para el Control y Predicción de la Contaminación por Partículas Atmosféricas en Puertos ha sido bautizado como PORTPUFF. Este modelo se verá alimentado por los datos meteorológicos de alta resolución generados por el modelo de diagnóstico meteorológico ARPSINTPR (Universidad de Santiago de Compostela) en el caso del Puerto de A Coruña y por el modelo CALMET en los demás casos. Además, deberá tener información de las emisiones debidas a operaciones portuarias generadas por el modelo de emisiones EMIPORT, así como, deberá disponer de datos digitalizados de topografía y usos de suelo.

En el modelo PORTPUFF se ha integrado el módulo de estimación del depósito de partículas SEDPORT desarrollado en este estudio. Debido a que SEDPORT hace un tratamiento diferenciado del depósito de partículas según su tamaño, se ha optado por considerar 5 rangos de tamaños de partículas:

1. $0.3 < \text{diámetro aerodinámico} < 1.0$ micras
2. $1.0 < \text{diámetro aerodinámico} < 2.5$ micras
3. $2.5 < \text{diámetro aerodinámico} < 10.0$ micras
4. $10.0 < \text{diámetro aerodinámico} < 20.0$ micras
5. $20.0 < \text{diámetro aerodinámico}$

Cada rango de tamaños es tratado como un contaminante diferente, es decir, que PORTPUFF debe ser ejecutado cinco veces (una por cada rango) en cada simulación.

A continuación, se explican los aspectos teóricos más relevantes de los modelos PORTPUFF y CALMET.

Modelo de dispersión PORTPUFF

El modelo PORTPUFF es una versión del modelo de dispersión MELPUFF (Martín et al., 1999, Palomino y Martín, 2001, Martín et al, 2002a y Martín et al. 2002b) adaptado a la problemática de la dispersión de partículas atmosféricas en entornos portuarios. MELPUFF (Mesoscale Lagrangian Puff dispersion model) surgió al realizar profundas modificaciones en el modelo MESOI V 2.0 (Ramsdell et al., 1983).

Los cambios realizados fueron muy diversos: desde modificaciones de su estructura para poder ser ejecutado en un PC de una manera automática hasta variaciones en los resultados pasando por la eliminación de algunas de sus limitaciones inherentes sobre resolución espacial de los resultados, amplitud del dominio de aplicación, número máximo de fuentes (hasta un número indefinido únicamente limitado por la memoria del ordenador sobre el cual se ejecuta) o eliminación de alguna de sus antiguas prestaciones tales como el cálculo de la desintegración radiactiva de los contaminantes y su posterior conversión en otros elementos secundarios. Por otra parte se han incorporado nuevas parametrizaciones del depósito de contaminantes (modelo de resistencias para gases o un modelo especial para depósito de partículas). Además, se puede usar fuentes emisoras de contaminantes variables en el tiempo (variando en escalas de tiempo que van desde segundos a varios minutos) y se ha mejorado la resolución espacial para el cálculo (que ha permitido un mejor tratamiento de la dispersión y transporte de contaminantes recién emitidos cuando la nube de contaminante es pequeña). Otras características nuevas del modelo PORTPUFF son que puede trabajar con campos meteorológicos tridimensionales generados por modelos de diagnóstico CALMET y ARPSINTPR (utilizados en este proyecto) y pronóstico (TVM) a mesoscala, que tiene en cuenta los efectos de escala de edificios en la dispersión de contaminantes y que trabaja con mallas anidadas: una grande para el cálculo de la dispersión de contaminantes y otra pequeña para proporcionar distribuciones espaciales de contaminantes con alta resolución.

PORTPUFF es un modelo lagrangiano de “puffs” gaussianos (figura 4) que sirve para estimar el transporte, difusión y depósito seco y húmedo de contaminantes emitidos a la atmósfera. Utiliza coordenadas cartesianas definidas por las mallas de trabajo y en la vertical utiliza alturas en metros sobre el nivel del suelo.

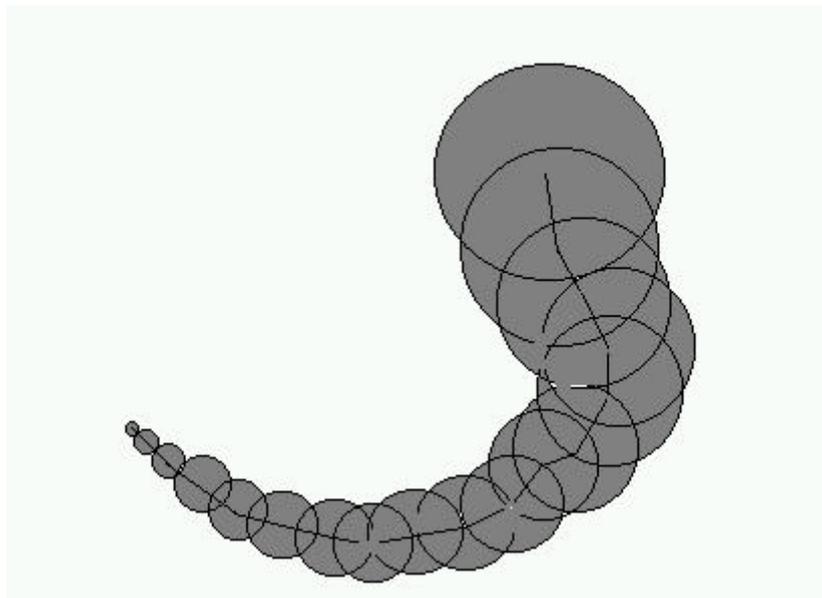


Figura 4. Aproximación de un penacho de contaminante mediante un conjunto de nubes o “puffs” de contaminante.

En la versión utilizada en este estudio, PORTPUFF asume que cada minuto se emite una nube de contaminante desde cada fuente emisora. En el caso de chimeneas, el tamaño inicial de la nube viene determinado por el caudal de gas y la concentración en boca de chimenea, es decir, por el volumen de contaminante que se emite en ese período. En el caso de fuentes difusas el tamaño inicial vendrá determinado por SEDPORT. Se asume que el contaminante se distribuye según una función gaussiana dentro de cada nube, las cuales tienen una forma circular en la horizontal y elipsoidal en la vertical. Cada nube se transporta sin deformarse según el viento en su centro siguiendo un camino marcado por el viento tridimensional en cada punto de su trayectoria, con limitaciones en las proximidades del suelo, crece de tamaño (difusión vertical y horizontal) en virtud de la clase estabilidad y elimina contaminante por depósito seco y húmedo (lavado por la lluvia, nieve o granizo).

Los datos meteorológicos de entrada a PORTPUFF pueden ser introducidos incluso cada minuto, aunque en esta versión se utilizarán el tiempo de promedio empleado por la estación o estaciones meteorológicas situadas en cada puerto que es de 10 minutos .

Para la difusión del contaminante se considera que la altura de la capa de mezcla es variable tanto en el espacio como en el tiempo. Para tener en cuenta que la distribución del contaminante se vea afectado por la presencia del terreno o el límite superior de la capa de mezcla y de esta forma considerar las posibles acumulaciones de contaminante por estas circunstancias, se utiliza una aproximación de superficies reflectoras y fuentes virtuales (Figura 5).

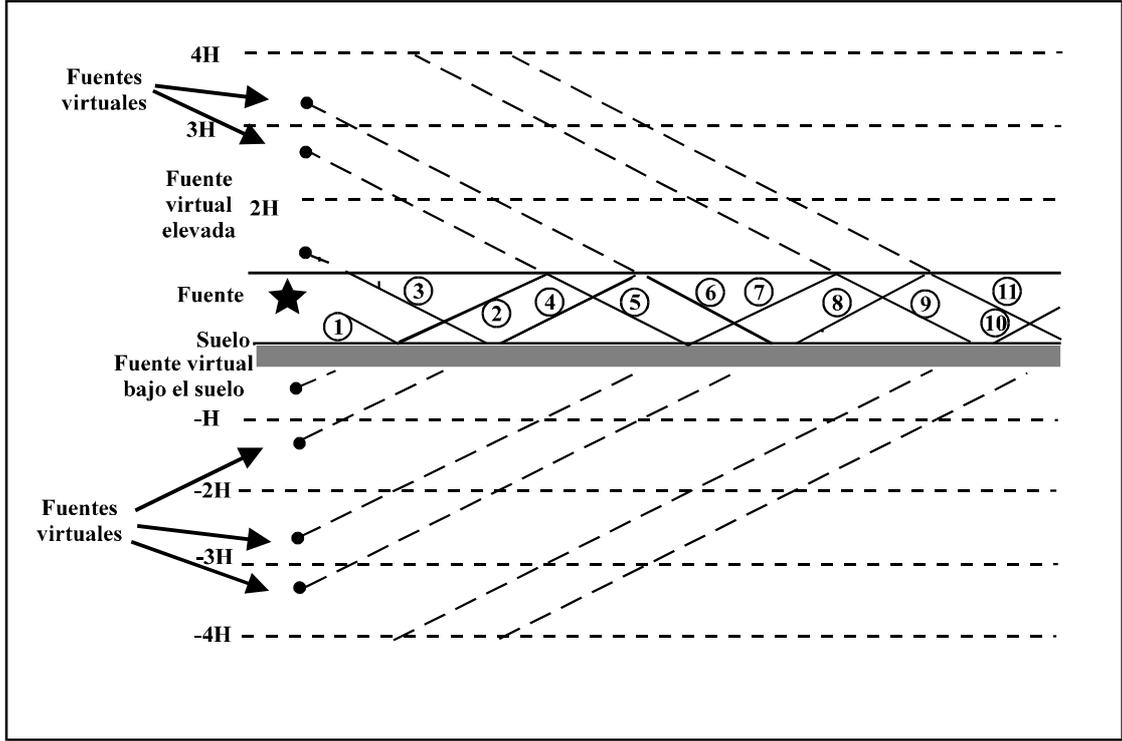


Figura 5. Representación gráfica del concepto de reflexiones y fuentes virtuales de contaminante.

PORTPUFF asume que el contaminante es reflejado por la superficie del suelo a menos que sea explícitamente depositado y por el límite superior de la capa de mezcla. Estas reflexiones vienen representadas por la emisión de fuentes virtuales. Considerando que:

$$C(x, y, z, t) = C_m(t) F(x, y, t) G(z, t) \quad (1)$$

donde C es la concentración de contaminante en el punto (x, y, z) en el instante t ,

$$C_m(t) = \frac{Q(t)}{(2p)^{3/2} \mathbf{s}_{xy}^2(t) \mathbf{s}_z(t)} \quad (2)$$

$Q(t)$ es la cantidad de contaminante en la nube y $\mathbf{s}_{xy(t)}$ y $\mathbf{s}_z(t)$ son los coeficientes de difusión turbulenta,

$$F(x, y, t) = \exp\left(-\frac{(x - x_0(t))^2 + (y - y_0(t))^2}{2\mathbf{s}_{xy}^2(t)}\right) \quad (3)$$

Matemáticamente, el concepto de reflexiones y fuentes virtuales se expresa de la siguiente manera:

$$G(z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(2nH(t) - h_e(t) - z)^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) + \exp\left(-\frac{(2nH(t) + h_e(t) - z)^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) \right] \quad (4)$$

donde $x_0(t)$, $y_0(t)$ y $h_e(t)$ son las coordenadas del centro de la nube. En $G(z,t)$ están incluidos los efectos de n reflexiones de la nube de contaminante con la superficie terrestre y la capa de inversión térmica situada a una altura $H(t)$ (entre ambas superficies queda comprendida la capa de mezcla). Considerando la concentración a nivel del suelo $z=0$, y considerando una sola reflexión en el suelo y en la inversión térmica ($n=-1,0,1$) tendremos,

$$G(0,t) = 2 \sum_{n=-1}^1 \left[\exp \left(- \frac{(2nH(t) - h_e(t))^2}{2s_z^2(t)} \right) \right] \quad (5)$$

En el caso que s_z sea muy grande ($\geq 0.8 H$) siendo H la altura de la capa de mezcla la distribución vertical se aproxima a la uniformidad. PORTPUFF en ese caso no calcula reflexiones y asume que el contaminante se distribuye según:

$$C(x,y,t) = \frac{Q}{2ps_{xy}^2 1.25s_z} \exp \left(- \frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2s_{xy}^2(t)} \right) \quad (6)$$

siendo el perfil vertical uniforme.

Los coeficientes de difusión turbulenta se calculan de dos formas distintas en función de que se dispongan o no de los datos meteorológicos tridimensionales de los modelos TVM y CALMET.

1) Cálculo de los coeficientes de difusión sin campos 3-D de turbulencia

Los coeficientes de difusión son estimados por PORTPUFF como función de la clase de estabilidad y de la distancia desde el punto en que fue emitida la nube de contaminante. Aunque PORTPUFF puede utilizar un gran número de parametrizaciones para el cálculo de los coeficientes de difusión tales como Briggs-Open Country, NRC, US-Army, etc. Considerando la parametrización Desert de Start y Wendell (1974), los coeficientes de difusión horizontal se estiman por:

$$\begin{aligned} s_{xy} &= A_y x^{0.85} & x \leq 20 \text{ Km} \\ &= A'_y x^{0.5} & x > 20 \text{ Km} \end{aligned} \quad (7)$$

donde x es la distancia desde el centro de la nube al punto de emisión y los coeficientes A_y y A'_y son función de la clase de estabilidad.

Los coeficientes de difusión vertical son evaluados mediante:

$$\begin{aligned} s_z &= A_z x^B & (s_z / H) \leq 0.465 \\ &= \left(0.465 + 0.335 \left(\frac{x-x_c}{x_c} \right) \right) H & 0.465 < (s_z / H) \leq 0.8 \\ &= 0.8H & (s_z / H) > 0.8 \end{aligned} \quad (8)$$

donde A_z y B son función de la clase de estabilidad, H es el espesor de la capa de mezcla y x_c es la distancia a la que $s_z = 0.465 H$. Los valores de esos parámetros se dan en la siguiente tabla:

CLASE DE ESTABILIDAD	A_y	A'_y	A_z	B
A	0.718	23.0	0.100	1.033
B	0.425	13.6	0.105	0.975
C	0.349	11.2	0.128	0.891
D	0.267	8.55	0.146	0.824
E	0.299	9.57	0.331	0.567
F	0.401	12.8	0.812	0.307
G	0.401	12.8	0.812	0.307

Tabla 1. Valores de los parámetros para los coeficientes de difusión Desert.

Los coeficientes de difusión son implícitamente función del tiempo, ya que la distancia está ligada al tiempo de viaje x de la nube de contaminante. Esto también es función de los cambios en la clase de estabilidad. En ese caso, si utilizamos directamente la parametrización nos encontraríamos con saltos bruscos en los coeficientes de difusión y, por tanto, en los tamaños de las nubes. Para evitar esa circunstancia lo que hace PORTPUFF en un cambio de clase de estabilidad es estimar que longitud de viaje x' le correspondería al tamaño actual de la nube de contaminante, es decir, calcula distancias virtuales a fuentes ficticias y considerar esa distancia x' en lugar de la anterior x al cambio de la clase de estabilidad. De esta forma se evitan saltos bruscos en los coeficientes de difusión.

2) Cálculo de los coeficientes de difusión con campos 3-D de turbulencia

A partir de la teoría de dispersión de una bocanada, cuyas ecuaciones principales utilizadas para el cálculo de los coeficientes σ_y y σ_z son (Hanna et al., 1982):

$$s_y = s_v t f_y \quad (9)$$

y

$$s_z = s_w t f_z \quad (10)$$

donde la escala de tiempo lagrangiana, t_l , se ha considerado del orden de la escala de tiempo utilizada ($t_l \gg t$).

$t = t_0 + \Delta t$,

t_0 = tiempo inicial

Δt = incremento),

f_y y f_z = son funciones a su vez del tiempo, recomendadas por Irwin (1983) a partir de las parametrizaciones de Draxler (1976):

$$f_y = 1.0 / (1.0 + 0.9 \sqrt{T_y t}) \quad (11)$$

$$f_z = 1.0 / (1.0 + 0.9 \sqrt{T_{z1} t}), \text{ para } L \leq 0 \quad (12)$$

$$f_z = 1.0 / (1.0 + 0.945 (T_{z2} t)^{0.806}), \text{ para } L > 0 \quad (13)$$

siendo T_y una constante de la escala de tiempo recíproca (1/s) para f_y ($T_y = 0.001$), y T_{z1} (para $L \leq 0$) y T_{z2} (para $L > 0$), lo mismo para f_z ($T_{z1} = 0.002$ y $T_{z2} = 0.01$).

Los valores de s_v y s_w se calculan según las parametrizaciones de Briggs (1985), en función de la capa atmosférica considerada: capa neutral-estable (para $L > 0$) y capa neutral-inestable (para $L = 0$), subdividida a su vez en 3 capas (según la relación de z/H): superficial ($z/H < 0.1$), de mezcla ($0.1 = z/H < 0.8$) y “entrainment” ($0.8 = z/H = 1.2$):

- Capa neutral-inestable:

$$s_v = [4 u^{*2} a_n^2 + 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (14)$$

$$a_n = \exp [-0.9 (z/H)] \quad (15)$$

- a) capa superficial:

$$s_w = [1.6 u^{*2} a_n^2 + 2.9 u^{*2} (-z/L)^{2/3}]^{1/2} \quad (16)$$

- b) capa de mezcla:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (17)$$

- c) capa “entrainment”:

en el caso de $0.8 = z/H < 1.0$:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + a_{c1}^2 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (18)$$

$$a_{c1} = [1/2 + (H - z) / (0.4 H)] \quad (19)$$

y en el caso de $1.0 = z/H = 1.2$:

$$s_w = [1.15 u^{*2} a_n^2 + a_{c2}^2 0.35 w^{*2}]^{1/2} \quad (20)$$

$$a_{c2} = [1/3 + (1.2 H - z) / (1.2 H)] \quad (21)$$

- Capa neutral-estable:

$$s_v = u^* [(1.6 C_s (z/L) + 1.8 a_n) / (1 + (z/L))] \quad (22)$$

$$s_w = 1.3 u^* [(C_s (z/L) + a_n) / (1 + (z/L))] \quad (23)$$

$$C_s = [1 - (z/H)]^{3/4} \quad (24)$$

En este modelo se tiene en cuenta la influencia de la estela de los edificios que interfieren en la trayectoria de los penachos mediante la modificación del tamaño de éstos. En concreto, los parámetros afectados por la influencia de los edificios en recorrido de los penachos son:

$$\mathbf{s}'_y = \mathbf{s}_y + \frac{L}{\sqrt{2p}} \quad (25)$$

$$\mathbf{s}'_z = \mathbf{s}_z + \frac{H}{\sqrt{2p}} \quad (26)$$

Donde L y H son las dimensiones horizontal (ancho) y vertical (altura) del edificio, σ_y y σ_z son las desviaciones estándar sin modificar y las mismas variables con prima representan las desviaciones estándar modificada por la influencia de los edificios (Cagneti and Ferrara, 1980).

El transporte de nubes de contaminante se hace a partir del viento estimado en la posición del centro de la nube, siguiendo un camino paralelo al terreno a una altura efectiva sobre el suelo determinada por la altura de la fuente y por la sobreelevación de la nube de contaminante recién emitida si no existe información sobre la componente vertical del viento, en caso contrario se utiliza dicha componente para determinar la posición del centro de la nube sobre el suelo con la restricción de que tiene que ser igual o superior a 1 metro sobre el terreno. El viento en el centro de la nube se calcula en dos pasos:

1. Interpolación bilineal horizontal de los vientos superficiales en los cuatro nodos (esquinas) de la celda afectada para obtener el viento en superficie en el punto que cae en la vertical del centro de la nube. Cuando el centro de la nube ha salido por los bordes del dominio pero parte de la nube sigue dentro, el vector viento que se toma es el del nodo más próximo.
2. Interpolación lineal vertical para estimar el viento en el centro de la nube a partir de los vientos en los niveles inmediatamente inferior y superior.

Una vez estimado el viento en el centro de la nube contaminante, se estima el movimiento mediante el siguiente proceso:

1. Estimación inicial del movimiento.

$$\begin{aligned} \Delta x &= u(x, y, z)\Delta t \\ \Delta y &= v(x, y, z)\Delta t \end{aligned} \quad (27)$$

2. Cálculo de las nuevas coordenadas horizontales para la nueva posición de la nube.

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (28)$$

3. Segunda estimación del movimiento utilizando el viento de la nueva posición.

$$\begin{aligned} \Delta x' &= u(x', y', z)\Delta t \\ \Delta y' &= v(x', y', z)\Delta t \end{aligned} \quad (29)$$

4. Cálculo de las coordenadas horizontales resultantes de promediar los transportes esperados en 1 y 2.

$$\begin{aligned}x'' &= x + (\Delta x + \Delta x') / 2 \\y'' &= y + (\Delta y + \Delta y') / 2\end{aligned}\tag{30}$$

donde Dt es 60 segundos, igual al intervalo en que las nubes de contaminante son emitidas.

El tamaño inicial de la nube puede determinarse a partir de la concentración de contaminante medida en la boca de cada chimenea emisora de contaminante y al caudal de gases emitidos por la misma. En el instante inicial, la concentración máxima puede considerarse aproximadamente igual a la concentración de contaminante en boca de chimenea, por lo que se tendría que:

$$C_{chim} = \frac{Q}{(2p)^{3/2} s_{xy}^2 s_z}\tag{31}$$

o bien

$$s_{xy}^2 s_z = \frac{1}{(2p)^{3/2}} \left(\frac{Q}{C_{chim}} \right)\tag{32}$$

Otro dato importante y del cual se dispone es el caudal o volumen de gas emitido por la boca de chimenea en un intervalo de tiempo y es igual a:

$$V = \frac{Q}{C_{chim}}$$

luego (34) puede expresarse como:

$$s_{xy}^2 s_z = \frac{V}{(2p)^{3/2}}\tag{33}$$

El análisis de los valores típicos de s_{xy} y s_z según las parametrizaciones típicas de Briggs (Gifford, 1976), Bander (1982) y Ramsdell et al. (1982) se observa que los valores de s_{xy} suelen ser un orden de magnitud mayores que s_z . Podemos entonces suponer que

$$s_{xy} = 10 s_z$$

luego

$$s_{xy} = \frac{(10V)^{1/3}}{\sqrt{2p}}\tag{34}$$

Las expresiones (37) y (38) son las utilizadas para estimar s_{xy} y s_z iniciales de cada nube de contaminante emitidas desde focos emisores industriales.

PORTPUFF computa la sobreelevación de la emisión de contaminante e utiliza como altura de transporte lo que llamamos altura efectiva h_e , que es

$$h_e = h_s + h_r \quad (35)$$

donde h_s es la altura de la chimenea y h_r es la sobreelevación de la nube de contaminante.

La sobreelevación es calculada en PORTPUFF mediante el procedimiento desarrollado por (Hanna et al., 1982). Se calcula la sobreelevación final y se asume que el factor dominante es la flotabilidad.

En condiciones de atmósfera estable, la sobreelevación final de la nube se determina mediante tres parámetros: el flujo de flotabilidad, el parámetro de estabilidad y la velocidad del viento a la altura de la emisión. El flujo de flotabilidad F_0 se define como:

$$F_0 = \frac{gV(T_s - T_a)}{T_a} \quad (36)$$

donde g es la aceleración gravitacional, V es el flujo de material en la chimenea, T_s es la temperatura del efluente y T_a la temperatura ambiente. Ambas temperaturas deben estar en escala absoluta. El parámetro de estabilidad se define como:

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) \cong \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial T_a}{\partial z} + 0.01 \right) \quad (37)$$

donde $\frac{\partial q}{\partial z}$ es el gradiente vertical de temperatura potencial en °K/Km.

Cuando el viento está en calma, la sobreelevación final viene dada por:

$$h_r = 5.3F_0^{1/4} S^{-3/8} - 6R_0 \quad (38)$$

donde R_0 es el radio de la boca de la chimenea.

En condiciones ventosas, la sobreelevación final viene dada por:

$$h_r = 2.6 \left[\frac{F_0}{US} \right]^{1/3} \quad (39)$$

La ecuación de viento en calma básicamente asume que la nube es emitida desde una altura ligeramente por debajo de la boca de la chimenea.

Para condiciones neutrales y estables, se asume que cerca de la chimenea la sobreelevación es proporcional a $x^{2/3}$ y es independiente de la estabilidad. Si se asume que la sobreelevación final se cumple a una distancia predeterminada, la ecuación de sobreelevación inicial puede utilizarse para estimar la sobreelevación final. La sobreelevación inicial en estas condiciones será:

$$h_r(x) = 1.6F_0^{1/3}U^{-1}x^{2/3} \quad (40)$$

$$x = 6.49F_0^{2/5}h_s^{3/5} \quad (41)$$

En todo el cálculo de la sobreelevación, la mínima velocidad de viento permitida es 0.5 m/s. Además, el tope máximo de sobreelevación de la nube se sitúa en la cima de la capa de mezcla. La altura efectiva de emisión puede ser mayor que el espesor de la capa de mezcla solamente si bien la altura de la chimenea es mayor que el mismo espesor de la capa de mezcla o bien, porque el espesor de la capa de mezcla ha decrecido con el tiempo posterior a la emisión.

PORTPUFF también estima la cantidad de partículas en suspensión que se depositan en el suelo debido al transporte, sedimentación gravitacional, impacto e intercepción por los obstáculos del terreno (depósito seco) y la debida al lavado por la lluvia (depósito húmedo). En el primer caso, se ha desarrollado e implantado un modelo de cálculo del depósito seco bautizado como SEDPORT y que hace un tratamiento diferenciado de las partículas según su diámetro aerodinámico. En general, la cantidad de contaminante depositado W_d se calcula según:

$$\Omega_d = V_d C(z_r) \quad (42)$$

siendo V_d la velocidad de depósito del contaminante y $C(z_r)$ la concentración de contaminantes a la altura z_r muy próxima a la superficie terrestre. SEDPORT está orientado a la estimación de la velocidad de depósito y será explicado en detalle en secciones posteriores.

Para el tratamiento del depósito húmedo, utilizaremos la misma metodología basada en el concepto de coeficiente de “washout” ya implementada en los modelos de dispersión MESOI 2.0 (Ramsdell et al, 1983) y MESOILT2 (Ramsdell y Burk, 1991). La cantidad de material depositado en la superficie y eliminado de cada nube de contaminante por procesos de captura por gotas de agua, lavado y arrastre depende de la concentración de material integrada verticalmente a través de cada nube y del tipo e intensidad de precipitación. La tasa de depósito húmedo se expresa en función del coeficiente de “washout” W_r , la cantidad y distribución de contaminante afectada por la precipitación y el coeficiente de difusión (Ramsdell y Burk, 1991).

El flujo de contaminantes W_w hacia el suelo debido a la precipitación se puede expresar según la ecuación:

$$\Omega_w = C_0 W_r P_0 \quad (43)$$

donde C_0 es la concentración en aire y P_0 la intensidad de precipitación (ver tabla 2). En PORTPUFF al igual que en MESOI se considera los siguientes tipos de precipitación:

	No Prec.	Liquida	Liquida	Liquida	Hielo	Hielo	Hielo
Tipo	0	1	2	3	4	5	6

Intensidad (mm/hr)	≤0.1	>0.1	>2.5	>7.6	>0.1	>2.5	>7.6
		≤2.5	≤7.6		≤2.5	≤7.6	
Coefficiente de Washout (1/hr)	0	1.0	5.0	10.0	0.5	2.5	5.0

Tabla 2. Tipos de precipitación y coeficientes de washout considerados por PORTPUFF.

El contaminante puede ser eliminado por depósito en suelo por vía seca y por vía húmeda. El flujo de contaminante en la superficie por vía seca depende de la velocidad de depósito V_d y de la concentración de contaminante junto al suelo, es decir,

$$\Omega_d(x, y, t) = V_d C(x, y, 0, t) = \frac{2V_d Q}{(2p)^{3/2} \mathbf{s}_{xy}^2 \mathbf{s}_z} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (y-y_0(t))^2}{2\mathbf{s}_{xy}^2(t)}\right) \sum_{i=1}^1 \left[\exp\left(-\frac{(2nH(t) - h_e(t))^2}{2\mathbf{s}_z^2(t)}\right) \right] \quad (44)$$

La masa de contaminante decrecerá a un ritmo representado por:

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_0^{2p} \int_0^{\infty} r \Omega_d dr dq \quad (45)$$

donde $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$. La integral no tiene solución directa ya que la concentración a nivel del suelo varía de forma compleja por los términos de reflexión. Una solución muy aproximada puede conseguirse si se asume que el terreno es llano (sólo para el cálculo del depósito), es decir, que $h_e = h'e$. De esta forma se tendría que:

$$\frac{dQ}{dt} = -2p \mathbf{s}_{xy}^2 V_d C(x_0, y_0, 0) \quad (46)$$

En el caso del depósito por vía húmeda, el material afectado es el de la capa sometida a precipitación (lluvia, nieve, etc). Básicamente, PORTPUFF asume que la precipitación elimina contaminante proporcionalmente a su intensidad y a la concentración de contaminante en cada zona de la nube afectada. El flujo de depósito húmedo es:

$$\Omega_w(x, y, t) = -I_w \int_0^{\infty} C(x, y, z, t) dz = \frac{I_w Q}{2p \mathbf{s}_{xy}^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\mathbf{s}_{xy}}\right)^2\right] \quad (47)$$

siendo I_w el coeficiente de "washout", el cual depende del tipo de precipitación. Integrando la anterior ecuación sobre la horizontal se llega a:

$$\frac{dQ}{dt} = - \int_0^{2p} \int_0^{\infty} r \Omega_w dr dq = -I_w Q \quad (48)$$

Los principales resultados de PORTPUFF son las concentraciones en promedio temporal (10 minutos). Estas se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{C}(x, y, 0) = \frac{\sum_i \sum_j C_{i,j}(x, y, 0) \Delta T_i}{\sum_i \Delta T_i} \quad (49)$$

donde $C_{i,j}(x, y, 0)$ es la concentración de contaminante a nivel del suelo procedente de la nube j (después de haberse descontado el contaminante eliminado por depósito) a lo largo del intervalo de tiempo (intervalo de advección) ΔT_i . Además se cumple que el intervalo de muestreo es:

$$\Delta T = \sum_i \Delta T_i \quad (50)$$

PORTPUFF genera entonces distribuciones espaciales de concentraciones medias de 10 minutos sobre una malla de alta resolución ($200 \times 200 \text{ m}^2$) cubriendo un área variable de un puerto a otro pero del orden de $10 \times 10 \text{ Km}^2$. Además, estima las concentraciones de contaminante en las estaciones de medida de contaminación y la contribución de cada foco emisor de partículas. Esta información es muy útil para los efectos de comparación de predicciones y mediciones y su evolución en el tiempo, así como para los procesos de recálculo de emisiones tal como se explicará en la sección dedicada al modelo de emisiones EMIPORT.

Simulaciones con el modelo PORTPUFF para el Puerto de A Coruña

Con objeto de verificar el funcionamiento de PORTPUFF, se han realizado simulaciones de la dispersión de partículas de diversos rangos de tamaño para un conjunto de días (2, 7, 10, 16 y 28 de Abril de 2003) en el entorno del Puerto de A Coruña. Se han utilizado los resultados de las simulaciones de las condiciones meteorológicas realizadas por la Universidad de Santiago de Compostela mediante el modelo ARPS y el módulo de downscaling ARPSINTRP con una resolución espacial de $1 \times 1 \text{ Km}^2$. Los resultados de estos modelos meteorológicos ocupan unos 50 Mb por día en formato ASCII, lo que quizá sea un tamaño excesivo que puede plantear algunos problemas de almacenamiento de resultados. Estos días cubren situaciones generalmente de tipo anticiclónico excepto los días 16, en el que la zona está afectada por una débil borrasca, y 28 con una profunda borrasca al NW que produce vientos de SW fuertes.

Para la realización de las simulaciones, se ha supuesto que existen dos focos de emisión de partículas situados uno en el Muelle Centenario y otro en el San Diego. Ambos son los muelles de operaciones habituales con graneles sólidos en el Puerto de A Coruña. Se ha asumido que cada minuto se emite una nube de contaminante desde cada punto de forma continuada durante el periodo de simulación. Las simulaciones cubren 24 horas empezando a las 00 horas de día, lo que significa que en ese tiempo se han emitido 2880 nubes de contaminante (una cada minuto). En los ejemplos que se exponen a continuación, se han simulado la dispersión de partículas de tamaño entre 1 y 2.5 micras (2 de Abril de 2003) y entre 2.5 y 10 micras (16 de Abril de 2003). Los resultados de PORTPUFF corresponden a una malla de $10 \times 10 \text{ Km}^2$ centrada en el puerto y con una resolución de $200 \times 200 \text{ m}^2$.

Las simulaciones realizadas han tardado unos 15 minutos en un ordenador personal Pentium 4. Las primeras pruebas se hicieron suponiendo una malla de salida de resultados de una mayor resolución ($100 \times 100 \text{ m}^2$), pero se pudo comprobar que los tiempos de simulación eran demasiado largos lo que podría perjudicar a la operatividad de PORTPUFF. Por ello, optó por utilizar una malla de salida de resolución algo peor, pero que no fuera costosa en el aspecto computacional.

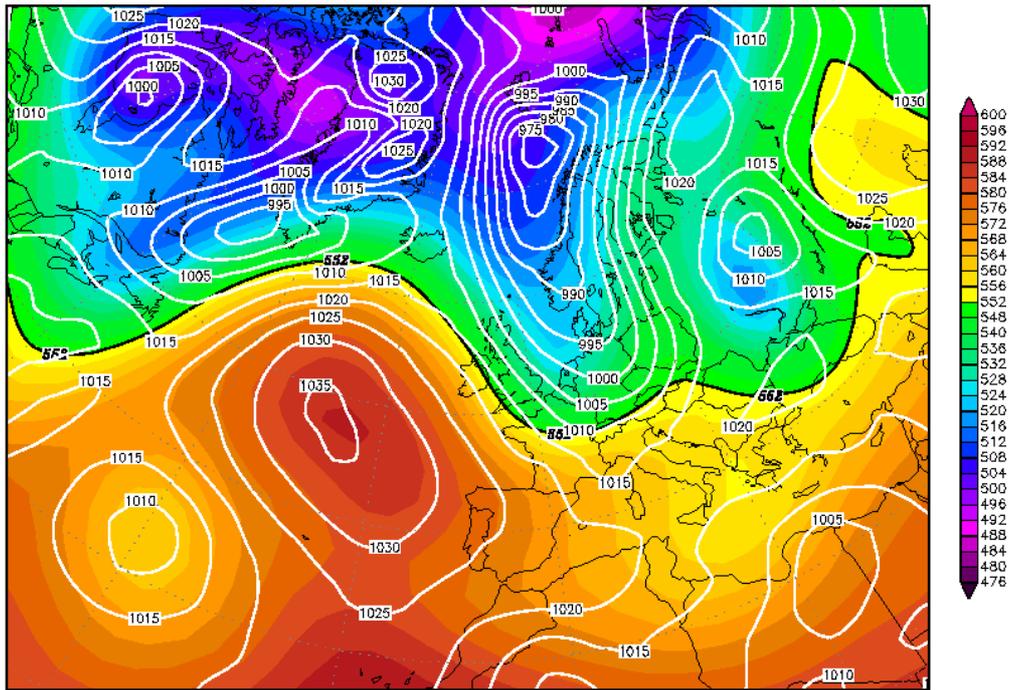
- 02-04-2003

Este día presentó unas condiciones atmosféricas de tipo anticiclónico con cielos parcialmente nubosos y vientos moderados del Noroeste o del Norte. En la figura 6, puede apreciarse el mapa isobárico de superficie y la altura de geopotencial a 500 hPa en ese día.

En las figuras 7 a 13, se muestra la secuencia de la evolución de las concentraciones en superficie para partículas entre 1 y 2.5 micras a lo largo de este día. Durante la noche predominó en viento flojo del Noroeste, que se intensificó durante el día virando a componente Norte - Noreste. Las concentraciones más bajas (unos $25 \mu\text{gr}/\text{m}^3$) se aprecian durante la tarde cuando el viento era más intenso (unos 8 m/s). Puede apreciarse como en gran parte del día el penacho de contaminante penetraría tierra adentro. Las mayores concentraciones siempre se aprecian en las proximidades de los muelles Centenario y San Diego. Estos resultados son completamente consistentes con las tasas de emisión supuestas y las condiciones atmosféricas observadas.

Wed,02APR2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figura 6. Mapa isobárico de superficie y altura de geopotencial a 500 HPa el día 2 de Abril de 2003 a las 00 horas.

PUERTO LA CORUÑA 1-04-2003 00:20 2 focos partículas 1<diámetro<2.5 micras
DOMINIO PEQUEÑO

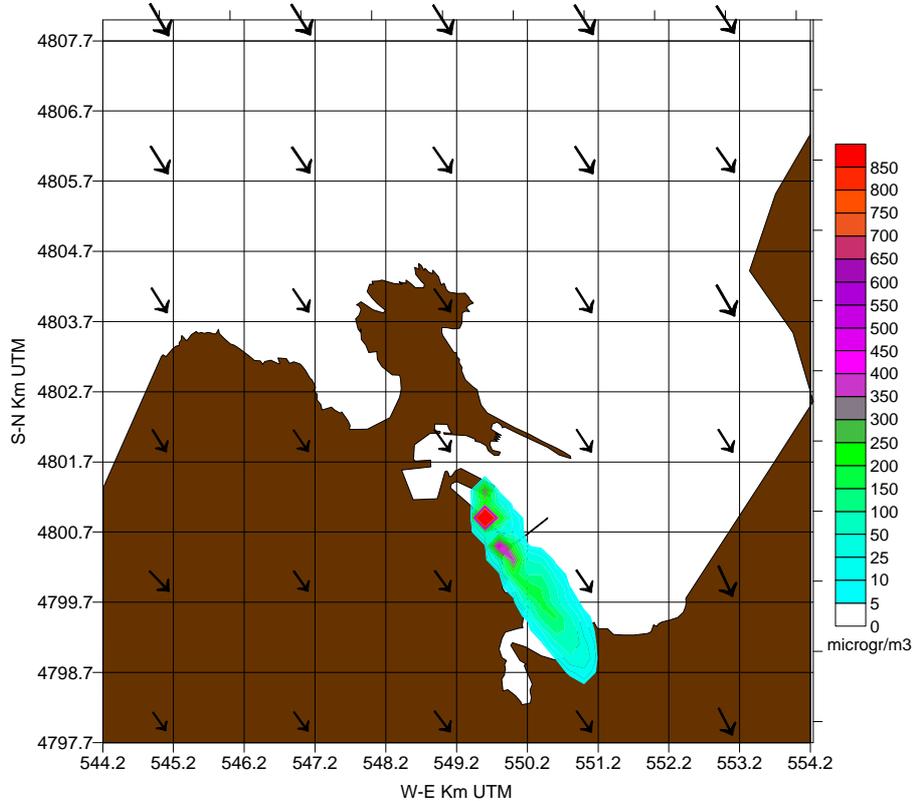


Figura 7. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 00:20 del 2 de Abril de 2003

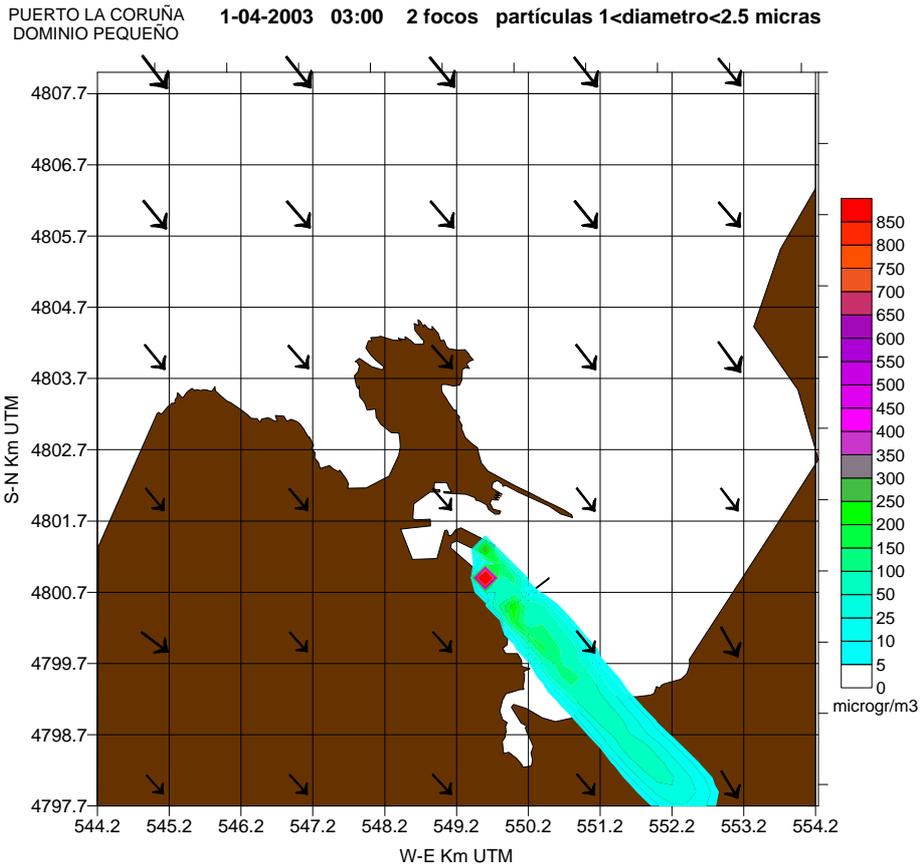


Figura 8. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 03:00 del 2 de Abril de 2003

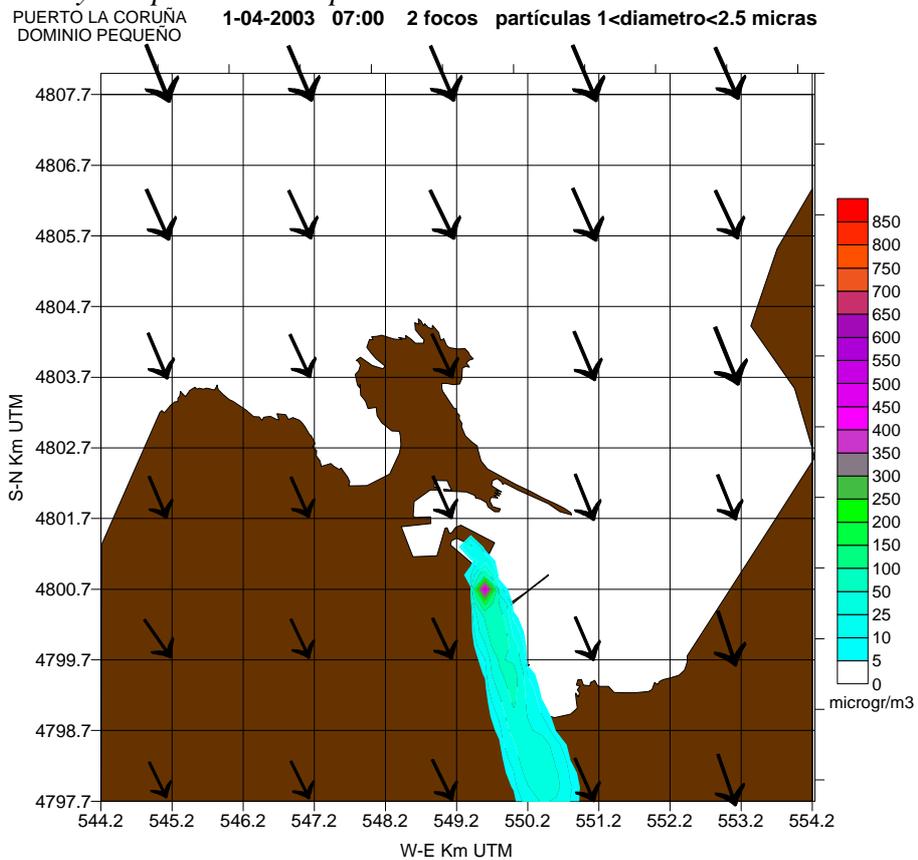


Figura 9. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 07:00 del 2 de Abril de 2003

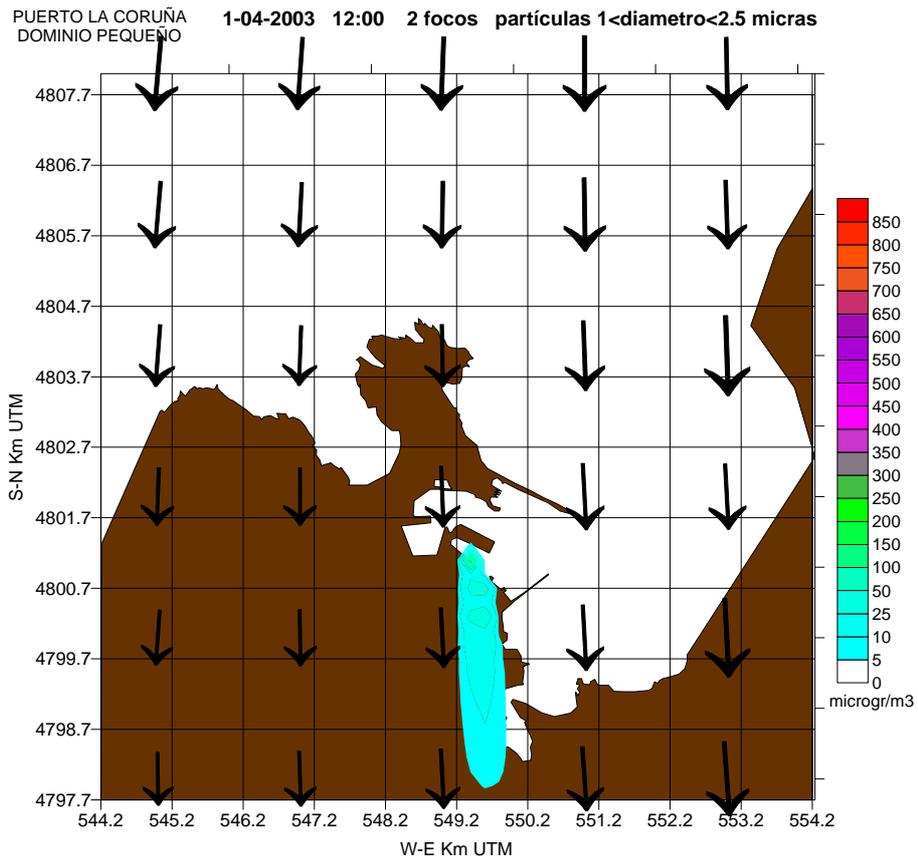


Figura 10. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 12:00 del 2 de Abril de 2003

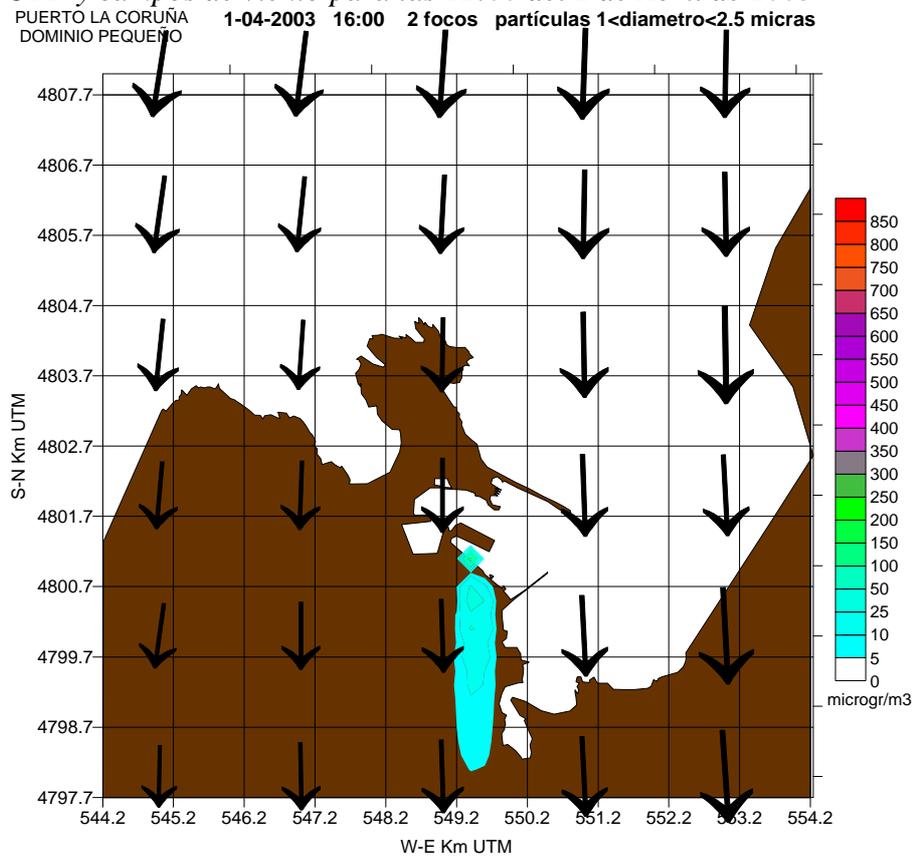


Figura 11. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 16:00 del 2 de Abril de 2003

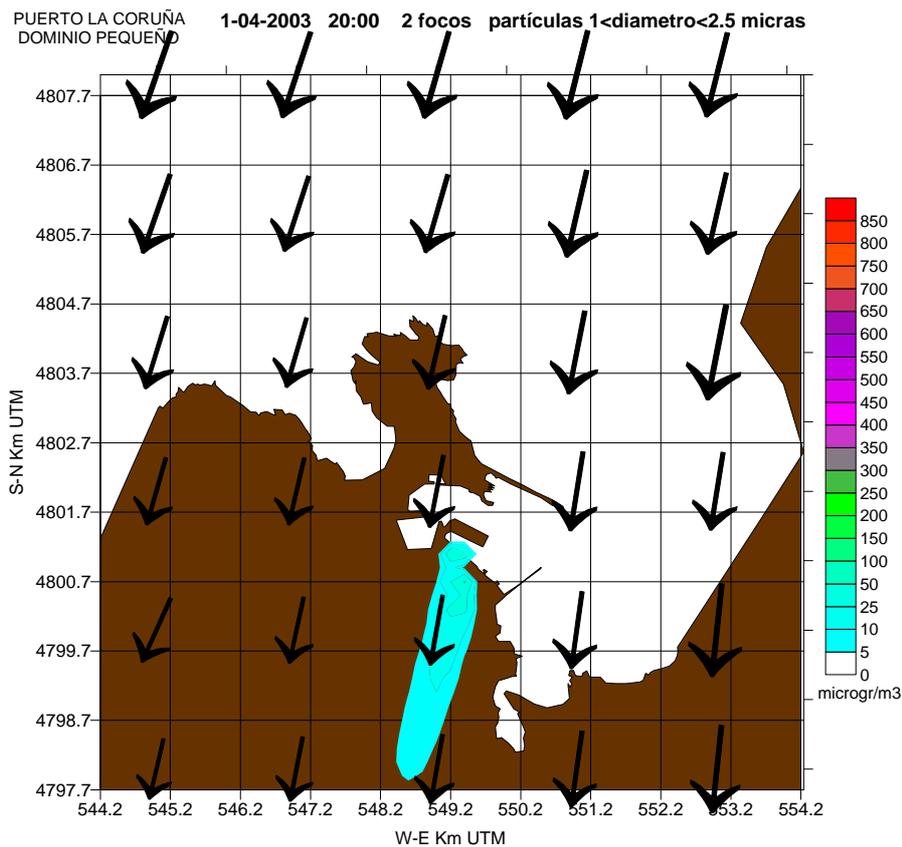


Figura 12. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 20:00 del 2 de Abril de 2003

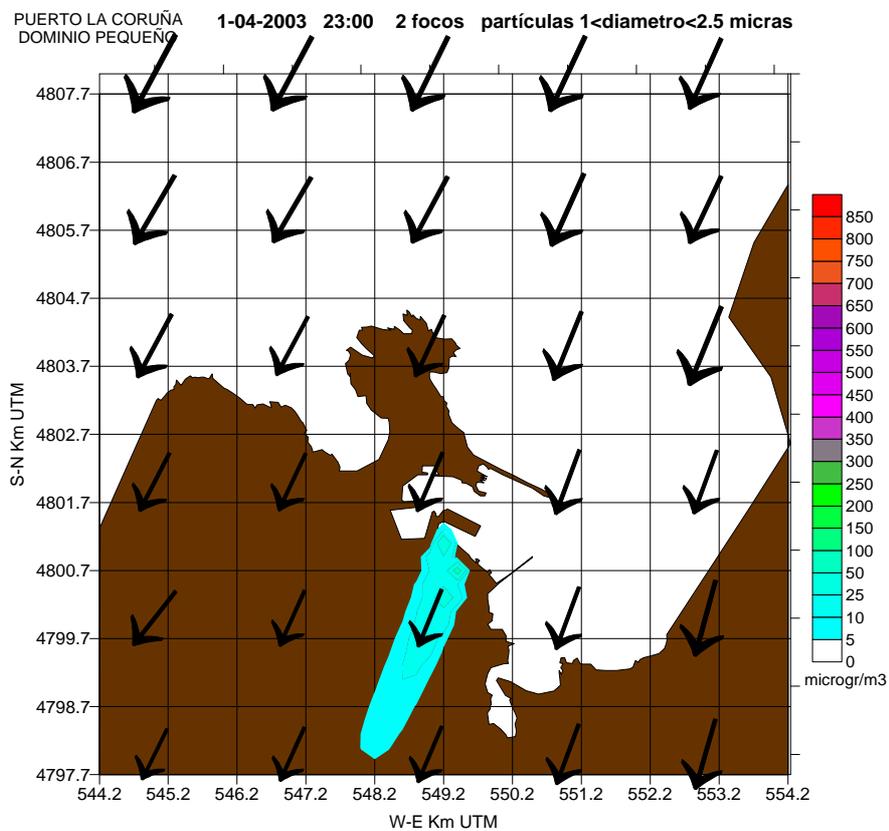


Figura 13. Concentración de partículas entre 1 y 2.5 micras estimadas por PORTPUFF para las 23:00 del 2 de Abril de 2003

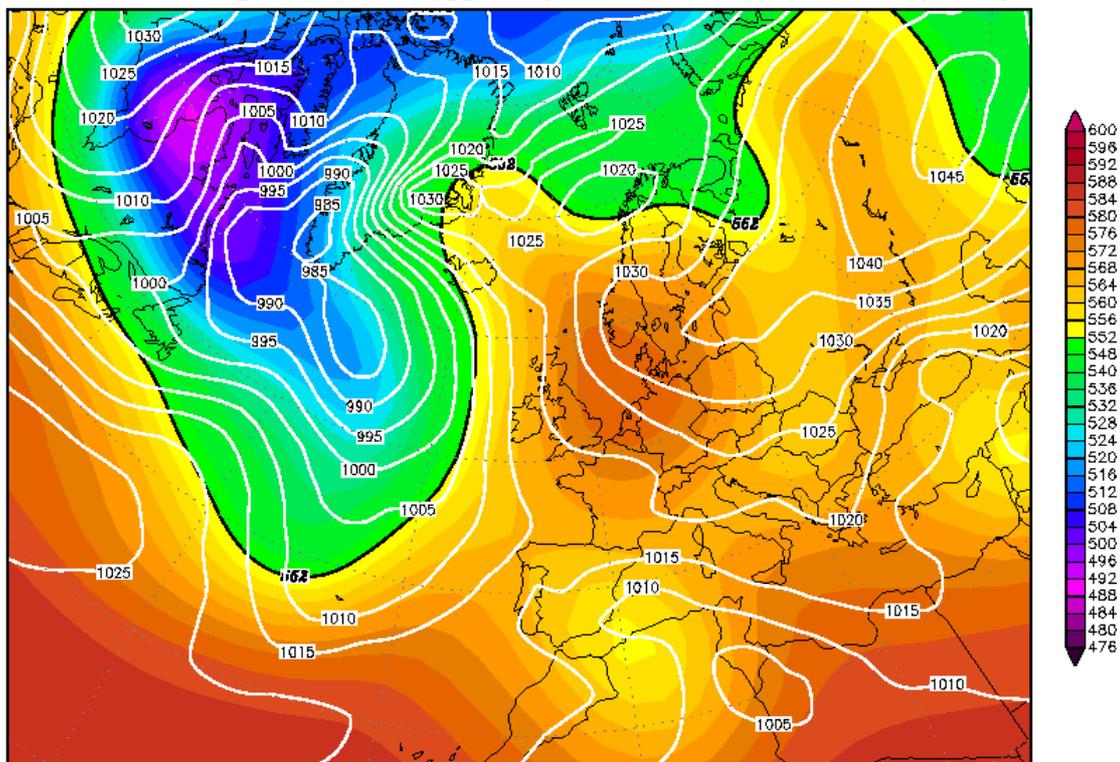
- 16-04-2003

Durante este día, Galicia estaba a caballo entre una borrasca debil en el sureste de la península y una gran borrasca atlántica acercándose. Las condiciones atmosféricas fueron de nubosidad variable con viento más bien débiles de dirección variable. En la figura 14, puede apreciarse el mapa isobárico de superficie y la altura de geopotencial a 500 HPa en ese día.

En las figuras 15 a 22, puede verse la evolución estimada por PORTPUFF de las concentraciones de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y los campos de viento. Durante la noche, el viento débil transporta las nubes de contaminante hacia la bahía, cambiando la dirección durante las primeras horas del día impulsado la nube de contaminante hacia la zona de la Torre de Hércules. Después el viento vuelve a virar, pero en sentido de las agujas del reloj para hacerse del Noroeste-Norte durante a tarde y más intenso. En esos momentos es cuando apreciamos los niveles más bajos de concentración. Durante la noche, vuelve a soplar un viento débil del Suroeste, que impulsa las nubes de contaminante hacia el centro de la bahía con niveles de contaminación potencialmente altos. En este caso, también los resultados son consistentes.

Wed,16APR2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



Daten: Reanalysis des NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Figura 14. Mapa isobárico de superficie y altura de geopotencial a 500 HPa el día 16 de Abril de 2003 a las 00 horas.

PUERTO LA CORUÑA
DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 00:30 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

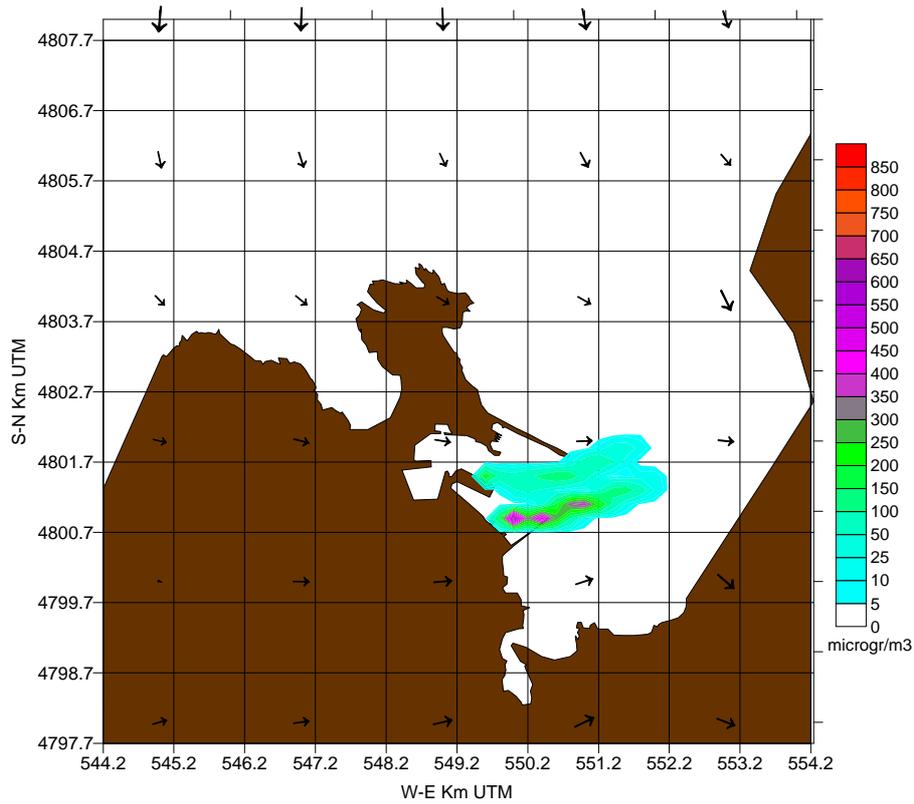


Figura 15. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 00:30 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA
DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 06:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

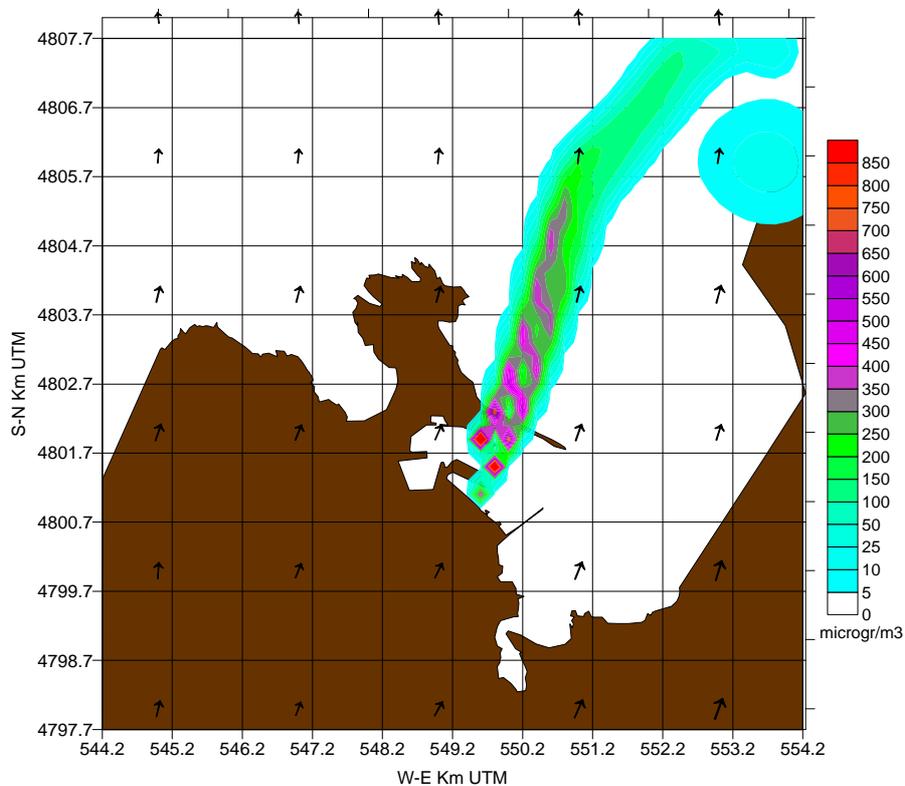


Figura 16. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 06:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA 15-04-2003 08:10 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras
DOMINIO PEQUEÑO

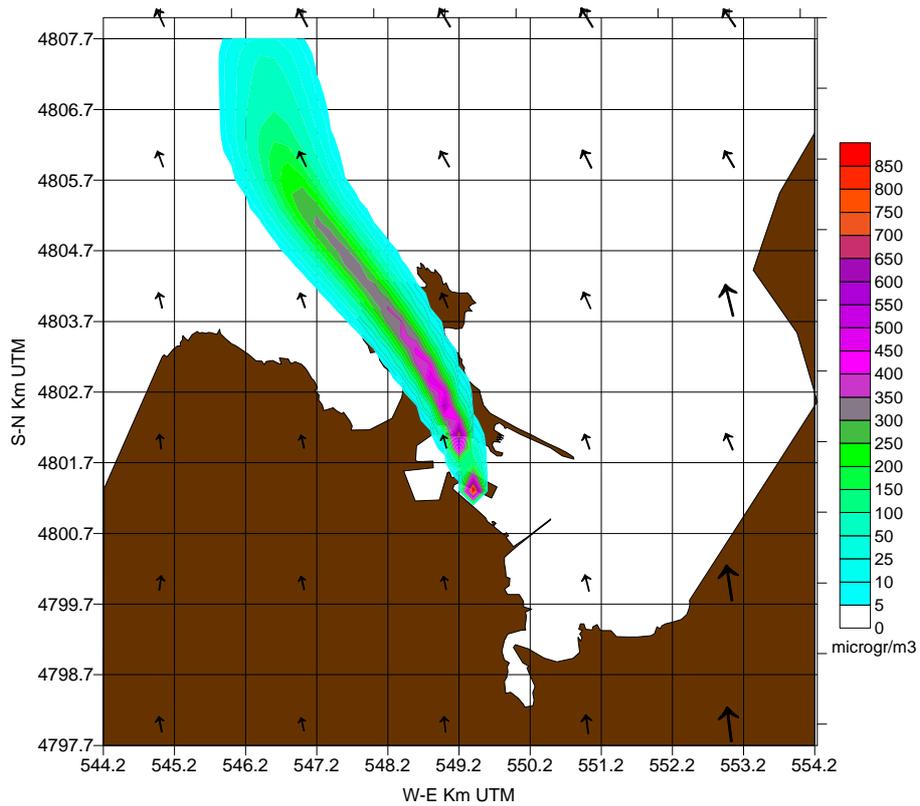


Figura 17. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 08:10 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA 15-04-2003 12:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras
DOMINIO PEQUEÑO

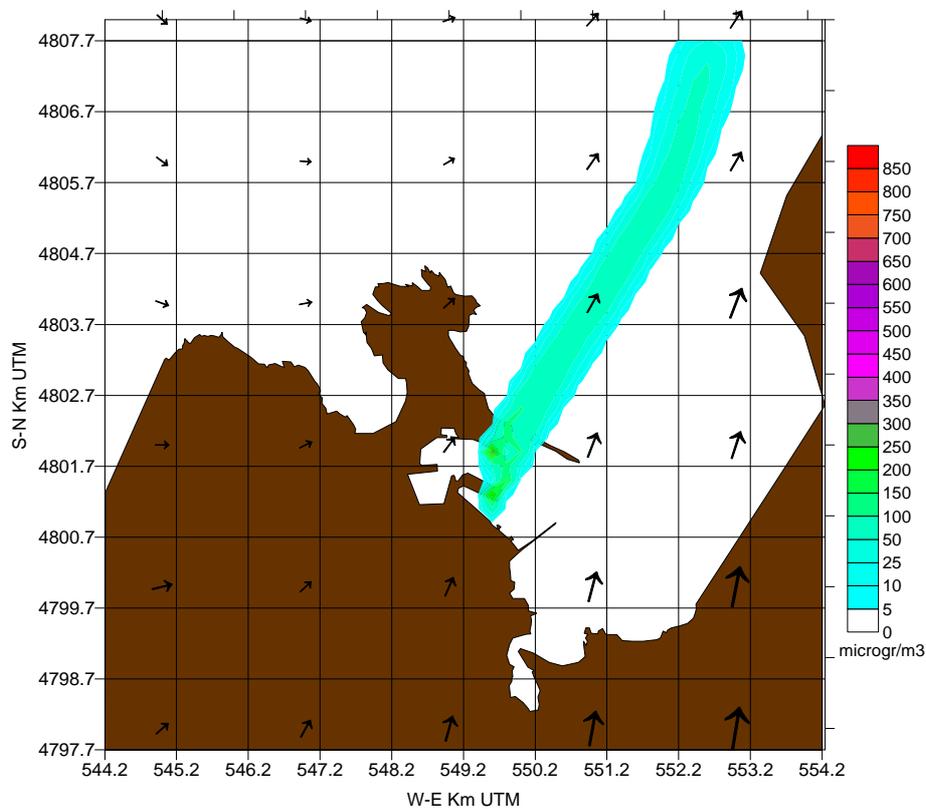


Figura 18. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 12:00 del 16 de Abril de 2003

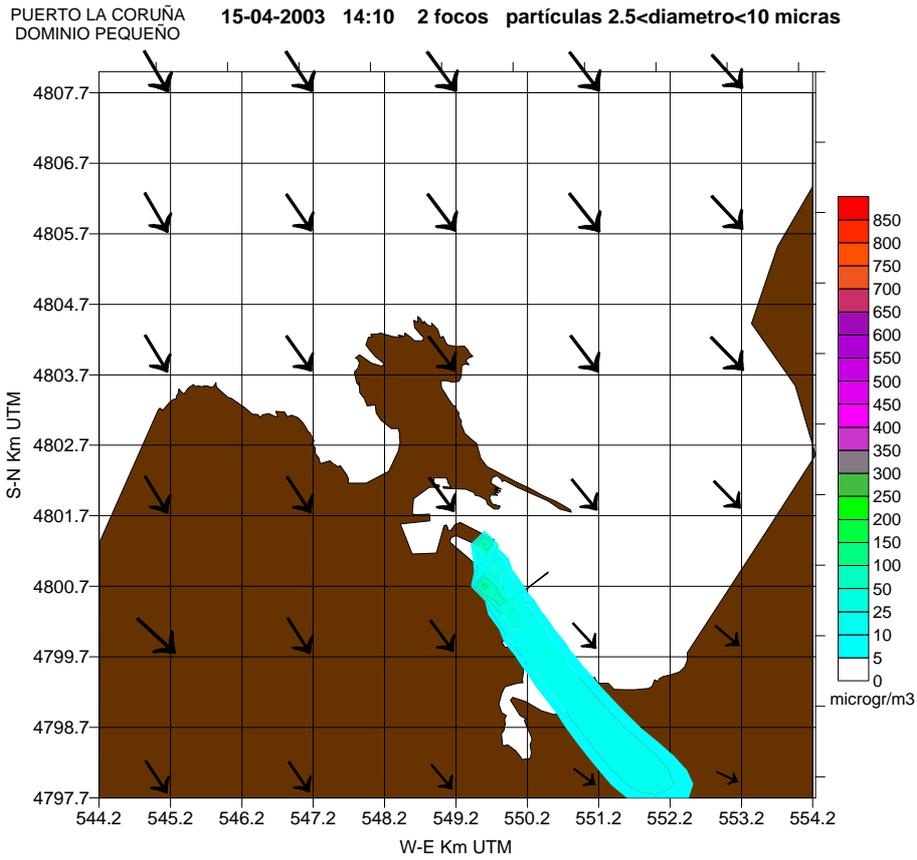


Figura 19. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 14:10 del 16 de Abril de 2003

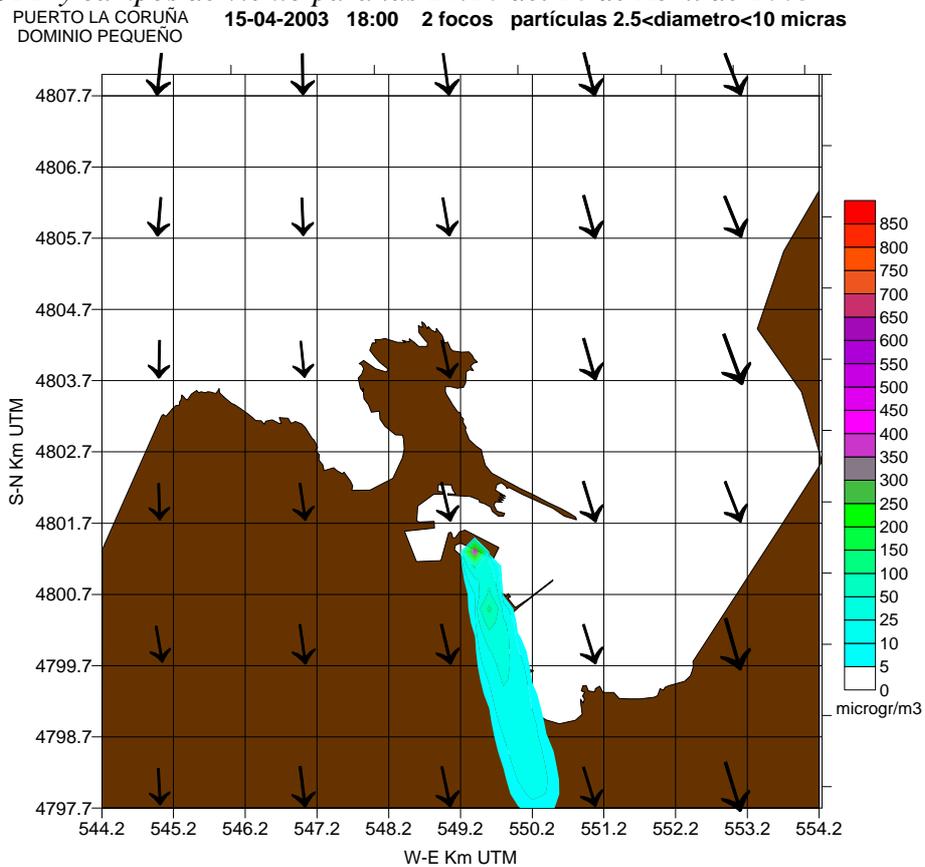


Figura 20. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 18:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 22:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

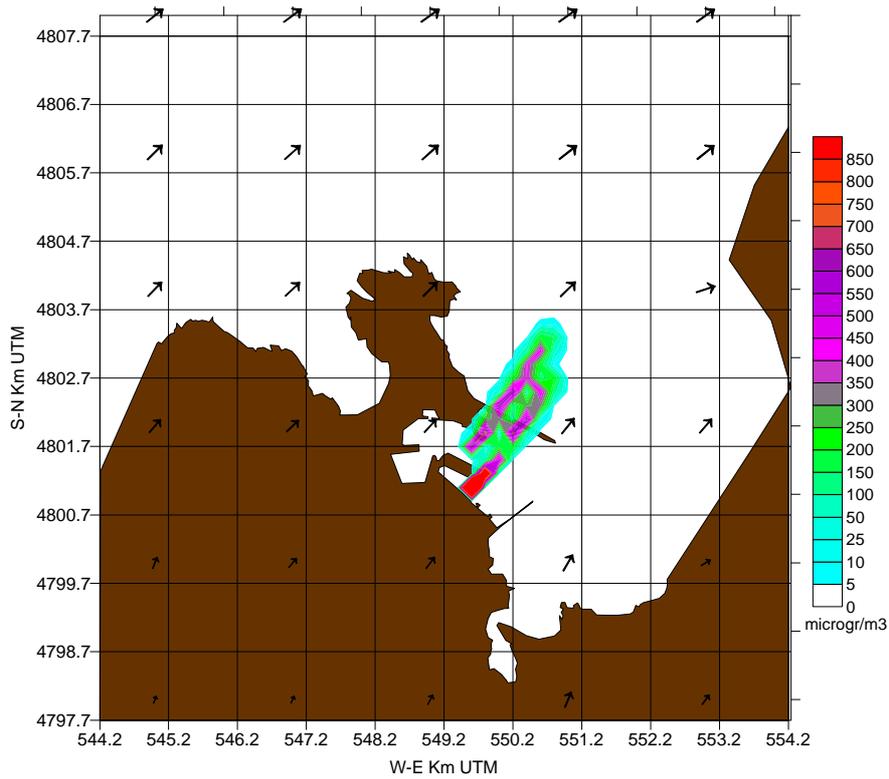


Figura 20. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 22:00 del 16 de Abril de 2003

PUERTO LA CORUÑA DOMINIO PEQUEÑO 15-04-2003 23:00 2 focos partículas 2.5<diámetro<10 micras

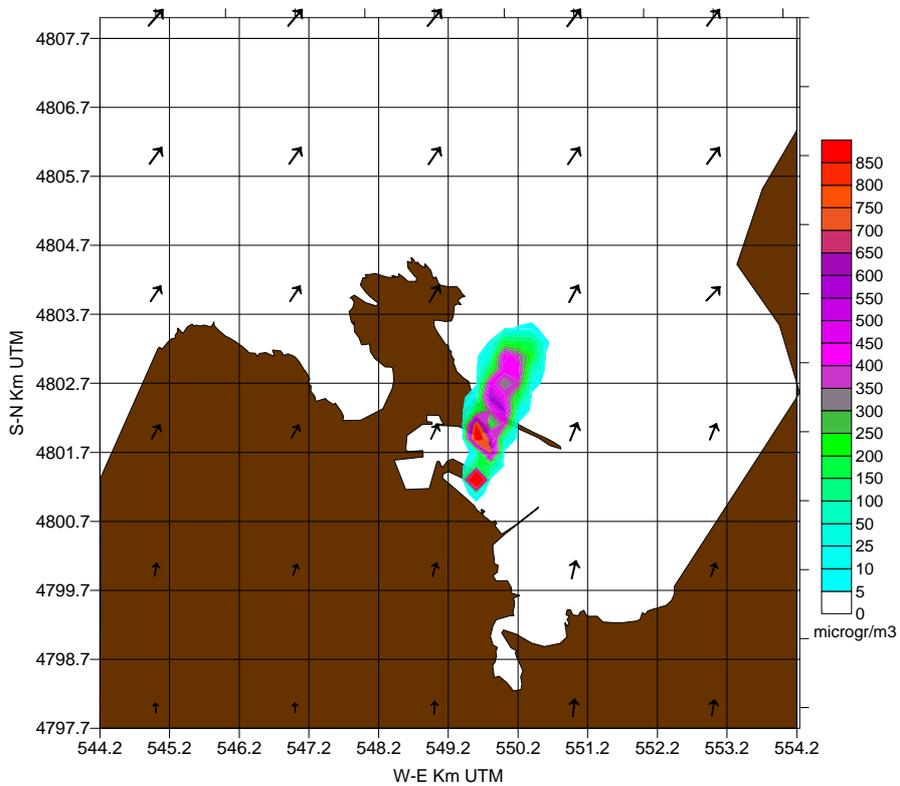


Figura 22. Concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras estimadas por PORTPUFF y campos de viento para las 23:00 del 16 de Abril de 2003

Adaptación del modelo CALMET

El modelo CALMET es un modelo de diagnóstico meteorológico muy apropiado para las escalas espaciales (60x60 Km²) utilizadas en este proyecto. Tiene por objeto realizar un downscaling de las predicciones de los modelos meteorológicos HIRLAM y MASS que pueda proveer de campos de variables meteorológicas y de turbulencia atmosférica que puedan alimentar al modelo de dispersión. En el caso del Puerto de A Coruña este proceso lo hace el binomio de modelos ARPS+ARPSINTPR (Universidad de Santiago de Compostela). Por otro lado, CALMET puede procesar también datos medidos en estaciones meteorológicas y proporcionar campos meteorológicos de alta resolución en tiempo real. Además de información meteorológica, CALMET necesita datos digitalizados de topografía y usos de suelo.

Los resultados de CALMET incluyen campos de viento y temperatura en malla tridimensional de los niveles verticales indicados por el usuario. Es recomendable que sea unos cinco niveles próximos al suelo y cubriendo el espesor de la capa límite atmosférica (por ejemplo, 10, 100, 500, 1200 y 2000 m sobre el nivel del suelo), así como, precipitación, velocidad de fricción y longitud de Monin-Obukhov en superficie, además de la altura de la capa de mezcla.

En el momento actual, CALMET está preparado para que sus resultados sean utilizados directamente por PORTPUFF y para que funcione con datos de estaciones meteorológicas. También se ha discutido el tipo de información que precisamos de los modelos MASS (Universidad de Barcelona) para los puertos de Barcelona, Tarragona, Valencia y Cartagena y HIRLAM (Instituto Nacional de Meteorología) para los puertos de Huelva, Santander y Bilbao. Estos datos consisten en:

1. Posición de los puntos de observación
 - Torres meteorológicas de superficie (UTM o Longitud/Latitud y altura sobre nivel del mar)
 - Puntos de la malla del modelo usados para perfiles verticales (UTM o Longitud/Latitud)
 - Observaciones sobre el agua (UTM o Longitud/Latitud y altura sobre la superficie del agua de la medida)
2. Datos meteorológicos superficiales

Para cada una de las torres incluidas en su dominio (también pueden ser datos que proporcione MASS y HIRLAM) para localidades concretas de forma rutinaria):

Valores horarios de:

- Velocidad y Dirección de viento
- Temperatura
- Cobertura de nubes
- Altura de las nubes bajas
- Presión en superficie
- Humedad relativa
- Tasa de precipitación

3. Datos en altura

Para cada uno de los puntos de la malla del modelo de incluidos en el dominio de simulación o próximos a él. Al menos es deseable coger los cuatro puntos de malla de MASS o HIRLAM más próximos a cada puerto y otro punto situado en el centro de cada uno. La información debe cubrir varias alturas por debajo de los 500 HPa:

Perfiles verticales horarios de:

- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura
- Presión
- Altura sobre el nivel del mar

Las predicciones deberían ser hasta 48 horas y obtenidas dos veces al día.

Estamos a la espera de recibir muestras de datos de la Universidad de Barcelona y del INM para proceder a la adaptación de lectura de datos y a la realización de simulaciones de prueba.

A continuación, se explica con cierto detalle las características del modelo de diagnóstico CALMET.

Existen en la actualidad varios modelos meteorológicos, normalmente acoplados a modelos de dispersión, encargados de proporcionar los datos necesarios para los cálculos de transporte y las concentraciones finales de uno o varios contaminantes en un dominio determinado. Dentro de estos modelos, se encuentra CALMET, un modelo meteorológico de diagnóstico que pertenece a la Agencia de Protección Medioambiental de los EE.UU (EPA) y que se encuentra acoplado al modelo CALPUFF, diseñado para el estudio de la dispersión de contaminantes en terrenos de topografía compleja.

En 1998, la EPA encargó a tres especialistas científicos, la tarea de realizar un enjuiciamiento sobre la recomendación del sistema de modelos CALMET/CALPUFF para investigaciones en el campo del transporte a larga distancia y aplicaciones para estudios de dispersión cercanos a las fuentes. Los resultados de las investigaciones realizadas, concluyeron en la recomendación de este sistema de modelos y destacaron que representaban un significativo avance respecto de los que actualmente se utilizan como reguladores de calidad del aire (Allwine et al., 1998).

El modelo CALMET ha sido sometido a varios procesos de evaluación y validación en diferentes escenarios meteorológicos (Allwine et al., 1998; Battaglia C., 1999). Aunque los resultados de la validación son favorables a la recomendación de la utilización de este modelo, la EPA aconseja seguir realizando ejercicios de validación a partir de la comparación de sus resultados con datos experimentales en diferentes escenarios meteorológicos y topográficos.

El núcleo del modelo CALMET está formado por un módulo de diagnóstico del campo de viento capaz de simular efectos locales, como los flujos de ladera, efectos

cinemáticos y de bloqueo del terreno (incluyendo un procedimiento de minimización de la divergencia del viento), y un módulo de capa límite, que tiene un tratamiento separado en función de si su desarrollo tiene lugar sobre tierra o sobre el agua (Scire et al., 1990; 1999). Estos módulos serán descritos en detalle a continuación.

Por otra parte, el modelo CALMET utiliza un sistema de coordenadas (x, y, z) en donde el eje x corresponde con la dirección Oeste-Este y el eje y con la dirección Sur-Norte. De esta forma, el sistema de coordenadas es compatible con las componentes horizontales (u, v) del viento. El modelo sigue la topografía definiendo la coordenada vertical z , de la siguiente manera:

$$Z = z - h_t \quad (51)$$

donde Z es la coordenada vertical que sigue el terreno (m) , z es la coordenada cartesiana vertical (m) y h_t es la elevación del terreno (m).

La componente vertical de la velocidad del viento, W , en este sistema de coordenadas se define como:

$$W = w - u \frac{\partial h_t}{\partial x} - v \frac{\partial h_t}{\partial y} \quad (52)$$

donde w es la componente vertical de la velocidad del viento (m/s) en coordenadas cartesianas.

El módulo de diagnóstico del campo de viento del modelo CALMET utiliza, como ya comentamos, una aproximación en dos etapas basadas en las investigaciones de Douglas y Kessler (1988). En la primera, el viento en el dominio se ajusta teniendo en cuenta los efectos cinemáticos del terreno (flujos de ladera, efectos de bloqueo, etc.) La segunda etapa consiste en un procedimiento de análisis objetivo que introduce los valores observados dentro del campo de viento obtenido en el paso anterior, para producir un campo final de viento que tenga en cuenta los datos medidos por estaciones meteorológicas en el dominio. En esta segunda etapa, se utiliza un esquema de interpolación que depende de la inversa del cuadrado de la distancia, con objeto de ponderar la importancia de los valores observados. Dicha interpolación se realiza según la siguiente expresión:

$$(u, v)_2 = \frac{\frac{(u, v)_1}{R^2} + \sum_k \frac{(u_{obs}, v_{obs})_k}{R_k^2}}{\frac{1}{R^2} + \sum \frac{1}{R_k^2}} \quad (53)$$

donde:

$(u_{obs}, v_{obs})_k$ son las componentes del viento observado en la estación k .

$(u, v)_1$ son las componentes del viento de la primera etapa en un punto de la malla del dominio.

$(u, v)_2$ son las componentes del viento de la segunda etapa en un punto de la malla del dominio.

R_k es la distancia de la estación k al punto de la malla.

R es un parámetro de ponderación especificado por el usuario para el campo de vientos de la primera etapa.

El resultado final de este esquema de interpolación es el de darle mayor importancia a los valores observados del viento en las regiones del dominio cercanas a las estaciones de medida, mientras que los campos de viento obtenidos por la primera etapa prevalecen en las regiones en las que no existen valores observados.

El usuario introduce unos radios de influencia de las estaciones de medida, de forma que una observación será excluida del proceso de interpolación si la distancia desde la estación a un punto particular de la malla excede este radio de influencia.

Por último, el modelo realiza un proceso de suavizado de los campos de viento resultantes con objeto de reducir discontinuidades en los resultados finales.

La componente vertical del viento se obtiene mediante un procedimiento de minimización de la divergencia que consiste en un proceso iterativo que ajusta las componentes horizontales del viento (u, v) a un valor de la componente vertical w en cada punto de la malla, de forma que la divergencia sea menor que un cierto valor:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} < \epsilon \quad (54)$$

Este proceso de minimización de la divergencia asegura que los campos de viento finales sean consistentes con el principio de conservación de la masa.

Respecto de la capa límite, el módulo utilizado por el modelo para simular el desarrollo de dicho estrato sobre tierra está basado en el método del balance de energía de Holtslag y Van Ulden (1983), lo que permite obtener valores horarios en los puntos de la malla de variables como flujo de calor sensible (Q_h), velocidad de fricción (u_*), longitud de Monin-Obukhov (L) y velocidad de escala convectiva (w_*). La altura de la capa de mezcla se obtiene a partir del flujo de calor sensible y los perfiles de temperatura utilizando el método de Carson (1973) con algunas modificaciones basadas en resultados de Maul (1980). Las clases de estabilidad y los valores horarios de precipitación son salidas opcionales del modelo. Para el caso de que el dominio incluya superficies marinas, la capa límite es evaluada por CALMET a partir del método de los perfiles, ya que dicho procedimiento se ajusta mejor a las particulares características aerodinámicas y térmicas que deben ser consideradas en entornos marinos.

El modelo CALMET utiliza una parametrización de la capa límite sobre tierra basada en el cálculo del flujo de calor sensible, a partir de la ecuación del balance de energía (Holtslag y Van Ulden, 1983). Dicha ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$Q_* + Q_f = Q_h + Q_e + Q_g \quad (55)$$

En la expresión anterior, Q_* representa la radiación neta, Q_f es el flujo de calor antropogénico o asociado a actividades humanas, Q_h es el flujo de calor sensible, Q_e es el flujo de calor latente y Q_g es el término asociado al flujo de calor acumulado en el suelo.

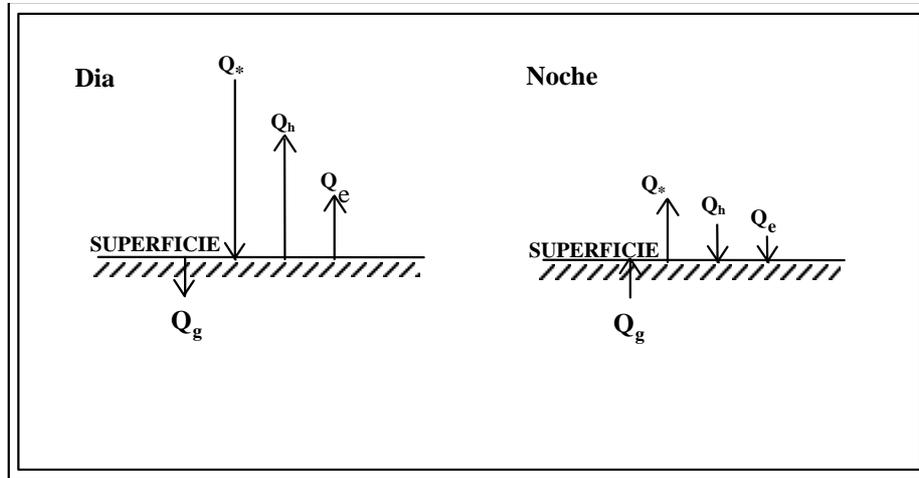


Figura 23.. Balance de energía tierra-atmósfera.

El proceso de reparto de energía es el siguiente: durante el día la superficie terrestre se calienta al recibir la aportación de radiación neta solar, Q_* . Esa energía recibida es transmitida a las capas bajas de la tierra calentándola, Q_g , de forma que a partir de un determinado momento, el exceso de calor recibido por la superficie es transmitido hacia la atmósfera en forma de calor sensible Q_h y latente Q_e . El flujo de calor sensible constituye la aportación calorífica a la atmósfera en la que no intervienen cambios de fase, mientras que el flujo de calor latente se manifiesta cuando se producen procesos de cambios de fase (evaporación o condensación, por ejemplo). Durante la noche, sin embargo, los flujos de calor se invierten, tal y como se observa en la figura 23.

La relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente viene definida por la razón de Bowen:

$$B = \frac{Q_h}{Q_e} \quad (56)$$

El significado de la razón de Bowen es el de representar el grado de turbulencia convectiva en función de la relación entre la porción de energía repartida entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente. El valor que toma este parámetro depende de los usos de suelo, y es introducido en el modelo a partir de los datos por defecto que propone el modelo y que pueden ser modificados por el usuario. Los valores típicos de la razón de Bowen varían entre 0.1 sobre el agua hasta 10 en zonas desérticas. Durante el verano, en California y en algunas zonas de Australia, se pueden dar valores entre 5 y 10 (Scire et al., 1990; 1999).

Respecto del flujo de calor en el suelo o en los materiales de construcción, Q_g , la parametrización de este término se realiza en términos de la radiación neta (Oke, 1978; Holtslag y Van Ulden, 1983) a partir de la siguiente expresión:

$$Q_g = C_g Q_* \quad (57)$$

siendo C_g la constante del flujo terrestre que depende de las propiedades del terreno. Los valores recomendados para esta constante varían entre los 0.05-0.25 de zonas rurales y los 0.25-0.30 para las áreas urbanas (Oke, 1982), superiores a los rurales debido a la conductividad térmica y capacidad calorífica de los materiales urbanos. Holtstag y Van Ulden (1983) recomiendan un valor de 0.1 para superficies herbáceas.

El flujo de calor antropogénico, Q_f , es función de la densidad de población de cada área en concreto. Oke (1978) recoge unas estimaciones sobre los valores promedio anuales y estacionales de este parámetro en diferentes ciudades. Según este autor, un análisis de escala de los términos de la ecuación del balance de energía, conduce a considerar que el error que se cometería al despreciar este parámetro no sería excesivamente elevado en la mayoría de las aplicaciones de dicha ecuación.

Por otro lado, la radiación neta, Q_* , puede expresarse como la suma de la radiación de onda corta y larga (Holtstag y Van Ulden, 1983; Landsberg, 1981) de la siguiente manera:

$$Q_* = Q_{sw}(1 - A) + Q_{w-d} - Q_{w-u} \quad (58)$$

donde Q_{sw} es la radiación de onda corta incidente formada por la suma de la radiación solar directa, Q_{sw-s} , y la radiación difusa, Q_{sw-d} . El parámetro A representa el albedo de la superficie y los dos últimos términos, Q_{w-d} y Q_{w-u} , son la radiación de onda larga incidente de la atmósfera y la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre.

El resultado de la estimación de la radiación neta mediante el procedimiento de Holtstag y Van Ulden (1983), se resume en la siguiente expresión:

$$Q_* = \frac{(1 - A)Q_{sw} + c_1 T^6 - s T^4 + c_2 N}{1 + c_3} \quad (59)$$

donde el valor de la radiación de onda corta incidente se obtiene a partir de:

$$Q_{sw} = (a_1 \text{sen } f + a_2)(1 + b_1 N^{b_2}) \quad (60)$$

siendo, en estas expresiones, T la temperatura del aire, s la constante de Stefan-Boltzmann, N es la fracción de cielo cubierto y f es el ángulo de elevación solar.

La tabla siguiente recoge los valores de las constantes de estas expresiones que pueden ser modificadas en el modelo:

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
c_1	$5.31 \times 10^{-13} \text{ W/m}^2/\text{K}^6$
c_2	60 W/m^2
c_3	0.12
a_1	990 W/m^2
a_2	-30 W/m^2
b_1	-0.75 W/m^2
b_2	3.4

Tabla 3. Valores de las constantes.

A partir de la expresión del balance de energía y teniendo en cuenta la definición de la razón de Bowen, se llega a la siguiente expresión:

$$Q_h \approx \frac{B(1 - C_g)}{1 + B} Q_* \quad (61)$$

Conocido el flujo de calor sensible, la altura de la capa de mezcla *convectiva* en el instante $t+dt$ se calcula en el modelo a partir de la siguiente expresión:

$$h_{t+dt} = \left[h_t^2 + \frac{2Q_h(1+E)dt}{\mathbf{j}_1 \mathbf{r} C_p} - \frac{2d\mathbf{q}_t h_t}{\mathbf{j}_1} \right]^{1/2} + \frac{d\mathbf{q}_{t+dt}}{\mathbf{j}_1} \quad (62)$$

donde \mathbf{j}_1 es el gradiente de temperatura potencial encima de la capa de mezcla h_t , E es una constante aproximadamente igual a 0.15 y $d\mathbf{q}$ es la diferencia de temperatura en la cima de la capa de mezcla en grados Kelvin. El valor de $d\mathbf{q}_{t+dt}$ se determina en el modelo a partir de la siguiente expresión:

$$d\mathbf{q}_{t+dt} = \left[\frac{2\mathbf{j}_1 E Q_h dt}{\mathbf{r} C_p} \right]^{1/2} \quad (63)$$

El modelo CALMET calcula también una altura de la capa límite *mecánica* mediante la siguiente fórmula:

$$h = \frac{B u_*}{[f N_B]^{1/2}} \quad (64)$$

siendo f el parámetro de Coriolis aproximadamente igual a 10^{-4} s^{-1} en nuestras latitudes, B es una constante aproximadamente igual a $2^{1/2}$ y N_B es la frecuencia de Brunt-Väisälä de la capa superior estable.

Una vez obtenidos los valores convectivo y mecánico, el modelo selecciona como valor final de capa límite, el máximo entre los dos.

Para las superficies acuosas del dominio, la determinación del espesor de capa límite se realiza a partir de un procedimiento diferente, como consecuencia de la ausencia de intensos flujos de calor sensible sobre dichas superficies, utilizando la expresión:

$$h_{agua} = \frac{Cu_*}{f} \quad (65)$$

donde el valor que se recomienda de la constante C es de 0.16, u_* es la velocidad de fricción y f es el parámetro de Coriolis.

Para obtener el campo de temperaturas, el modelo CALMET utiliza los datos de radiosondeos en altura y superficie así como la estimación de la altura de la capa de mezcla convectiva determinada en función de la ecuación del balance de energía. En primer lugar, el modelo realiza una interpolación espacial de las temperaturas recogidas en los radiosondeos en los niveles seleccionados por el usuario. Así mismo, realiza una interpolación temporal entre los sondeos consecutivos para disponer de los valores de temperatura horarios en cada nivel. El modelo realiza un promediado espacial de los campos de temperatura finales y recalcula los valores sobre la superficie y altura en un estrato de espesor igual a la capa de mezcla asumiendo un gradiente de temperatura adiabático.

Preparación de datos adicionales

Los modelos a implantar en el sistema informático de control y predicción de la contaminación en puertos precisan de información adicional del siguiente tipo:

- Coordenadas geográficas (preferiblemente UTM huso 30) de la ubicación de estaciones meteorológicas y de contaminación
- Planos digitalizados de los puertos incluyendo las dimensiones y ubicación de los edificios principales próximos a las áreas de operaciones con graneles sólidos.
- Datos digitales de topografía de alta resolución y usos de suelo en los alrededores de cada puerto

Respecto de la ubicación de estaciones meteorológicas y de contaminación, estará completamente disponible en cuanto se termine la instalación de las nuevas estaciones previstas en este proyecto.

Respecto de los demás datos, en Octubre de 2003, elaboramos un documento explicativo de los datos que se necesitaban para que las autoridades portuarias pudieran proporcionarlos. Este documento indicaba lo siguiente:

1. Topografía digital del terreno.

CIEMAT dispone de datos de elevación del terreno para toda España en celdas de 1x1 Km². Para afinar los cálculos con el modelo de dispersión en una malla más fina, se necesitaría, especialmente, en aquellos puertos con una orografía abrupta, datos de elevación del terreno (en metros) sobre el nivel del mar con una resolución de 100x100 m² en un área de al menos 10x10 Km² centrada en cada puerto.

Los datos deben ser provistos en fichero ASCII indicando las coordenadas X e Y en UTM (metros) huso 30 y la elevación en metros siguiendo un formato de tres columnas:

Coordenada X, Coordenada Y y Altura sobre nivel del mar

Cada línea de ese fichero dará información sobre coordenadas X e Y del centro de cada celda y de la elevación del mismo.

Ejemplo:

```
"X_coord" "Y_coord" "Altura"  
373320 4972780 143  
374320 4972780 140  
375320 4972780 143  
376320 4972780 145  
.....  
.....  
385320 4971780 152  
386320 4971780 140  
387320 4971780 111  
388320 4971780 100  
389320 4971780 90  
.....  
.....  
etc
```

2. Usos de suelo

Al igual que en el caso de la topografía, sería bueno disponer de datos del tipo de uso de suelo en celdas de dos mallas:

- Malla de 60x60 Km² con celdas de 1x1 Km². Esta malla debe cubrir un área tal que aproximadamente un tercio de la misma sea mar y dos tercios sea tierra firme. Por ejemplo, en puertos con una línea de costa orientada de norte a sur, tendríamos que tomar un área que fuera desde 40 Km tierra adentro hasta 20 Km mar adentro (en dirección X) con el puerto centrado en la dirección Y (estando a unos 30 Km hasta los bordes Norte y Sur del área seleccionada).
- Malla de aproximadamente 10x10 Km² (en los puertos más grandes puede ser mayor, pero no superior a 20x20 Km²) con celdas de 100x100 m².

Los datos deben ser provistos en ficheros ASCII (uno para cada malla) indicando las coordenadas X e Y en UTM (metros) huso 30 y el código de uso de suelo en metros siguiendo un formato de tres columnas:

Coordenada X, Coordenada Y y Código de uso de suelo

Cada línea de ese fichero dará información sobre coordenadas X e Y del centro de cada celda y del código de uso de suelo correspondiente.

Ejemplo:

```
"X_coord" "Y_coord" "Código de uso de suelo"
373320 4972780 14
374320 4972780 14
375320 4972780 03
376320 4972780 12
.....
.....
385320 4971780 15
386320 4971780 15
387320 4971780 07
388320 4971780 10
389320 4971780 16
.....
.....
etc
```

Sería deseable que la codificación a seguir se ajustase a la que estamos usando para el Puerto de A Coruña. Si no fuera coincidente, se deberá adjuntar los códigos utilizados.

Códigos de usos de suelo de Galicia-Puerto de A Coruña:

```
03 Pastizales
04 Pastos y matorral
07 Bosque perenne
06 Bosque caduca
10 Cultivos
11 Marismas
12 Matorral
14 Agua
15 Terrenos antrópicos
16 Sin vegetacion
17 Bosque mixto
```

3. Edificios más importantes en el Puerto.

Para que el modelo de dispersión pueda calcular el efecto de los edificios sobre la dispersión de contaminantes, necesitamos conocer la localización de los edificios más voluminosos del puerto indicándose las coordenadas X e Y en UTM (metros) huso 30 de las cuatro esquinas del edificio así como la altura del mismo.

Los datos deberán estar en un fichero ASCII en columnas tal como muestra el ejemplo siguiente:

Nº edific.	Coord sup izquierda	Coord sup derecha	Coord Inf Derecha	Coord Inf Izquierd	Alt.(m)				
E	x	y	x	y	x	y	x	y	h
1	423239	4429150	423317	4429138	423286	4428959	423208	4428973	30
2	423230	4428882	423315	4428923	423402	4428728	423317	4428688	40
3	423350	4428635	423507	4428635	423507	4428542	423350	4428542	40
4	423566	4429002	423721	4428914	423587	4428680	423432	4428769	45
5	423511	4429188	423577	4429307	423772	4429193	423706	4429072	40
.....									
.....									
etc.									

Los datos de topografía de alta resolución y usos de suelo (100x100 m) son especialmente necesarios en puertos con una topografía compleja alrededor (A Coruña, Barcelona, Cartagena, Santander y Bilbao) con objeto de garantizar que los resultados de los modelos sean de la mayor calidad posible. El modelo de dispersión PORTPUFF modelos pueden funcionar con una topografía suavizada (datos cada kilómetro), pero sus resultados, sin ser desechables, seguramente no serían tan buenos.

Hasta la fecha, hemos recibido datos digitalizados ASCII de Huelva, tanto de topografía como de usos de suelo. Tenemos que trabajar en casar los tipos de uso suelo utilizados con los habituales de los modelos. Los demás puertos están trabajando en la preparación de los datos anteriores. No obstante, de algunos puertos hemos recibido cartografías digitales en formato DXF de AUTOCAD (Bilbao, Tarragona, Huelva, Santander y Tarragona) y una ortofoto del Puerto de Bilbao.

El Puerto de Huelva también ha proporcionado información de muy buena calidad de alturas de todos los edificios del Puerto, aunque habrá que procesarla para extraer la necesaria y ponerla en los formatos requeridos.

Del Puerto de Valencia también disponemos por otros proyectos anteriores de información suficiente de topografía y edificios relevantes, aunque habrá que revisar la información de usos de suelo.

Además, CIEMAT ha adquirida la base de datos de usos de suelo NATLAN de la Agencia Europea de Medio Ambiente que da información muy detallada para toda Europa con una resolución de 250x250 m² con un número enorme de tipos de uso de suelo que habría que casar con los tipos utilizados. La forma en que están almacenados los datos es bastante compleja y necesitaría un tratamiento laborioso con ARCINFO o ARCGIS.

Desarrollo e implantación del módulo SEDPORT

En un principio, se pensó en este módulo para el tratamiento exclusivo de partículas sedimentables, es decir, aquellas de tamaño superior a 10 micras de diámetro que pudieran estar afectadas significativamente por la sedimentación gravitacional. Sin embargo, en el desarrollo de los trabajos se comprobó que era mucho más conveniente desarrollar e implantar un nuevo módulo para el tratamiento del depósito de todo tipo de partículas en suspensión según su tamaño e teniendo en cuenta la mayor parte de los procesos implicados.

SEDPORT se ha diseñado entonces como un nuevo esquema de cálculo del depósito de partículas y ha sido implantado dentro del modelo PORTPUFF como un conjunto de subrutinas encargadas de estimar la cantidad de partículas depositadas en la superficie.

El depósito seco de gases y partículas atmosféricas sobre una superficie receptora responde a la ecuación (42) y está gobernado por la concentración en aire de contaminante, por el transporte turbulento en la capa límite atmosférica, por la naturaleza físico-química de las especies que se depositan y la capacidad de la superficie para capturar y/o absorber esos gases y partículas. El transporte de gases y partículas desde la atmósfera hasta las proximidades de la superficie receptora está gobernado por el nivel de turbulencia atmosférica la cual se genera por procesos mecánicos (cizalla del viento, rozamiento, efectos debidos a obstáculos sobre la superficie receptora tales como montañas, edificios, etc.) o por procesos térmicos (corrientes convectivas principalmente). Cuanto mayor sea la turbulencia, con mayor eficacia se transportará el contaminante hacia la superficie receptora y, por tanto, menor será el gradiente vertical de concentración de contaminante en la capa atmosférica sobre la superficie receptora. Es decir, en una capa límite inestable la generación de turbulencia es importante y, por tanto, el intercambio vertical de contaminante es también importante, lo que induce a una reducción de los gradientes verticales de concentración de contaminante. Por contra, una capa límite con estratificación estable actúa como inhibidora de los movimientos verticales y, por tanto, también de los intercambios verticales de contaminante con lo cual existe una tendencia a mantener al menos los gradientes verticales originales de contaminante. Estos gradientes pueden verse incrementados por la emisión de nuevos contaminantes, ya que los gradientes dependen también de la configuración y localización vertical de las fuentes emisoras de contaminante. Por todo esto, en general, los gradientes verticales de contaminante son más intensos en situaciones de estabilidad atmosférica que en las de inestabilidad.

Podemos distinguir dentro de la capa límite dos subcapas: una capa turbulenta propiamente dicha y otra capa cuasi-laminar. La segunda capa se sitúa entre la primera capa y la superficie receptora y su espesor es muy pequeño (del orden de mm). En la capa cuasi-laminar, el transporte está dominado por la difusión molecular, mientras que en la capa turbulenta es la turbulencia la encargada de ese transporte. De todos es conocido que la difusión molecular es mucho menos eficaz que la difusión turbulenta.

Una vez que el contaminante ha llegado a la superficie, su captura y absorción vienen determinadas por la naturaleza química, biológica y física de la superficie y del contaminante mismo. Por ejemplo, la captura de gases por la superficie receptora está controlada por la habilidad de la superficie para absorber especies químicas específicas; más concretamente, el SO₂ como gas soluble es fácilmente incorporado a través de los

estomas o a través de la cutícula de la hoja o a través de las películas de agua sobre la superficie de la hoja o del suelo.

El modelo de resistencias para el cálculo de la velocidad de depósito de un contaminante dado (recordar ecuación 42) se basa en el concepto de la resistencia que opone cada uno de los medios implicados al transporte del contaminante hasta la superficie receptora. Surge como una analogía a la circulación de corriente eléctrica a lo largo de un circuito. Son tres los tramos que recorre un contaminante hasta que es absorbido por la superficie receptora. Primero, a través de la capa turbulenta atmosférica; segundo, a través de la capa cuasi-laminar y por último, el contaminante debe ser capturado y absorbido por la superficie receptora. Cada uno de estos tramos ofrece una resistencia al transporte del contaminante. Por consiguiente, tenemos las resistencias aerodinámica (R_a), cuasi laminar (R_b) y la resistencia superficial (R_c) que se corresponden a cada uno de los tramos antes indicados. La velocidad de depósito (V_d) será entonces la inversa de la resistencia total considerando que las anteriores mantienen una configuración en serie.

$$V_d = \frac{I}{R_a + R_b + R_c} \quad (66)$$

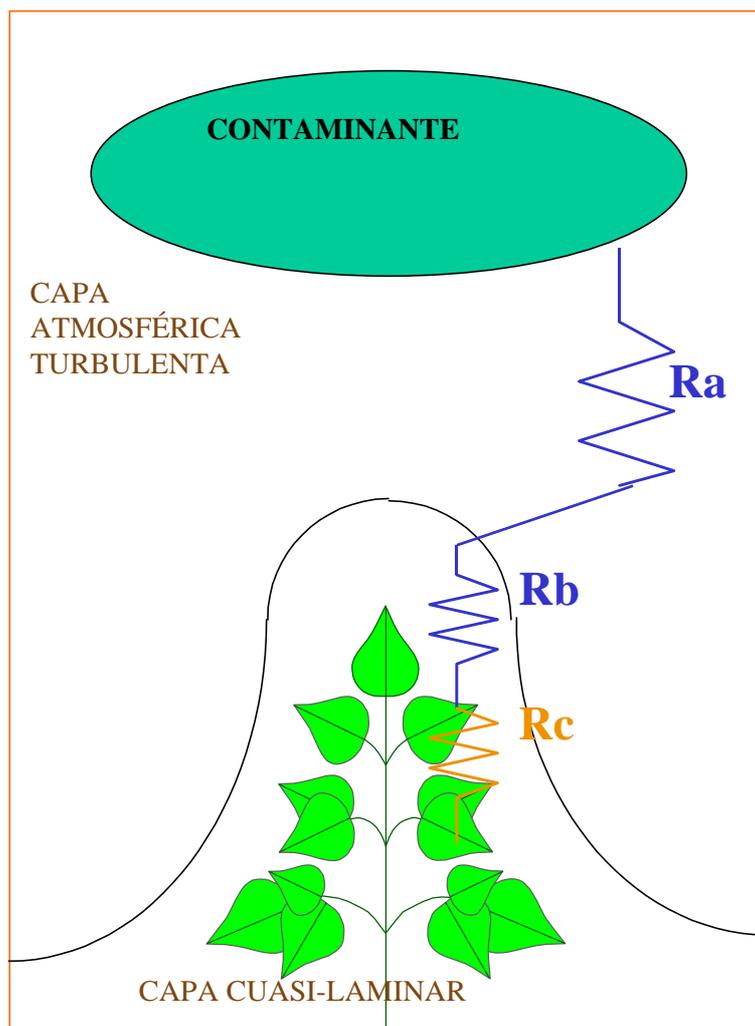


Figura 24. Esquema de resistencias al depósito de contaminantes.

La resistencia aerodinámica es básicamente función de la velocidad de fricción, de la altura de desplazamiento y de la rugosidad. Estos parámetros dependen de las características del suelo y también de la velocidad del viento. Además, la resistencia aerodinámica no es constante con la altura.

La resistencia cuasi-laminar depende de las características turbulentas y de la difusión molecular del contaminante considerado. El transporte del contaminante a través de la capa cuasi-laminar por difusión molecular depende del espesor de la capa, del gradiente de concentración sobre ésta y de la constante de difusión del contaminante.

La resistencia superficial solamente depende de la superficie receptora. A su vez, puede descomponerse en varias resistencias: del estoma, del mesófilo, de la cutícula, del dosel vegetal, exterior y del suelo. Estas dependen en gran medida de la humedad y temperatura de la superficie, del “leaf área index”, del PH y de la radiación global entre otras variables.

Más detalles sobre la metodología de resistencias para la estimación del depósito seco de contaminante puede encontrarse en (Hicks et al, 1987 y Fowler, 1986).

La incorporación del modelo de resistencias para el cálculo del depósito de contaminantes ha exigido la inclusión en PORTPUFF de nuevas subrutinas y funciones y la incorporación de datos de uso de suelo y parámetros asociados como rugosidad del terreno y resistencia superficial. La resistencia superficial toma distintos valores dependiendo de la estación del año y de si es día o noche. Por el momento este modelo de resistencias sólo es utilizado para el SO₂, pero se extenderá su uso a otros contaminantes.

El depósito de partículas atmosféricas presenta diferencias notables respecto a los gases. De hecho, $R_c = 0$, ya que se considera que al chocar con la superficie permanecen sobre ella. Además las partículas están afectadas por la sedimentación gravitacional V_g , lo que supone un camino adicional para depositar contaminante que no tiene aplicación en el caso de los gases. Por tanto, en el caso de las partículas, la velocidad de depósito implica también resistencias en paralelo:

$$V_d = \frac{I}{R_a + R_b + R_a R_b V_g} + V_g \quad (67)$$

La sedimentación gravitacional es función del tamaño de la partícula, forma y densidad. Resulta de considerar la acción de la fuerza de la gravedad y de la fuerza de arrastre (opuesta siempre al movimiento de la partícula) producida por la viscosidad del aire. Esto da lugar a la conocida ley de Stokes. Considerando partículas de forma prácticamente esférica, la ley de Stokes toma la siguiente forma:

$$V_g = \frac{[d_p^2 g (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_a) C]}{18\mathbf{m}} \quad (68)$$

donde d_p es el diámetro de la partícula (m), \mathbf{r}_p es la densidad de la partícula (g/m^3), \mathbf{r}_a es la densidad del aire (g/m^3) y C es factor de corrección de Cunningham para partículas pequeñas:

$$C = 1 + (2I / d_p) \left[a_1 + a_2 e^{(-a_3 d_p / I)} \right] \quad (69)$$

siendo I el recorrido libre medio de las moléculas de aire ($I=6.53 \cdot 10^{-6}$ cm) y a_1 , a_2 y a_3 son constantes (=1.257, 0.40 y 0.55 respectivamente).

La resistencia aerodinámica responde a:

$$R_a = \frac{\text{Ln}(z_R / z_0) - \Psi_H}{ku_*} \quad (70)$$

siendo z_R la altura de referencia sobre el suelo a que se calcula la velocidad de depósito, z_0 la altura de rugosidad del terreno, Ψ_H una función de la estabilidad atmosférica, k la constante de Von Karman y u_* la velocidad de fricción.

La resistencia cuasilaminar, en el caso de las partículas, engloba diversos procesos: movimiento browniano, el impacto e intercepción de las mismas con o por la superficie terrestre:

$$R_b = \frac{1}{e_0 u_* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_I} \quad (71)$$

donde E_B , E_{IM} , E_{IN} son las eficiencias de difusión Browniana, impacto e intercepción, respectivamente; R_I es un factor de corrección representando a la fracción de partículas que golpean y se pegan al terreno y e_0 es una constante empírica que toma el valor de 3 independientemente del tipo de terreno.

La eficiencia de la difusión Browniana puede ser estimada mediante:

$$E_B = Sc^{-g} \quad (72)$$

donde Sc es el número de Schmidt que es la razón entre la viscosidad cinemática y la difusividad Browniana. g toma valores entre 1/2 y 2/3 con valores mayores para superficies más rugosas.

La eficiencia del proceso de impacto de partículas con obstáculos del terreno viene dada por:

$$E_{IM} = \left(\frac{St}{a + St} \right)^b \quad (73)$$

donde a depende del tipo de suelo y β es igual a 2 y St es el número de Stokes.

La eficiencia del proceso de intercepción de partículas por obstáculos del terreno se estima mediante:

$$E_{IN} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{A} \right)^2 \quad (74)$$

donde d_p es el diámetro de la partícula y A es el radio característico de los elementos colectores del terreno. Este, por tanto, dependerá del tipo de terreno.

Las partículas mayores de 5 micras pueden rebotar una vez que golpean el terreno. La fracción de partículas que se quedan pegadas a él se calcula con:

$$R_1 = \exp(-St^{0.5}) \quad (75)$$

Se asume que las partículas que chocan con una superficie húmeda no rebotan.

Sobre esta formulación, se ha desarrollado el módulo SEDPORT, que a su vez ha sido incorporado a PORTPUFF. En las tablas 4 y 5, pueden verse los tipos de suelo considerados y los valores de los distintos parámetros. Para más detalles sobre el esquema propuesto, se recomienda consultar el trabajo de Zhang et al. (2001).

Table 2
Land use categories (LUC) and seasonal categories (SC) used in
Canadian Aerosol Module

Category	Description
<i>Land use categories (LUC)</i>	
1	Evergreen-needleleaf trees
2	Evergreen broadleaf trees
3	Deciduous needleleaf trees
4	Deciduous broadleaf trees
5	Mixed broadleaf and needleleaf trees
6	Grass
7	Crops, mixed farming
8	Desert
9	Tundra
10	Shrubs and interrupted woodlands
11	Wet land with plants
12	Ice cap and glacier
13	Inland water
14	Ocean
15	Urban
<i>Seasonal categories (SC)</i>	
1	Midsummer with lush vegetation.
2	Autumn with cropland that has not been harvested.
3	Late autumn after frost, no snow.
4	Winter, snow on ground and sub-freezing.
5	Transitional spring with partially green short annuals.

Tabla 4. Tipos de uso de suelo y categorías de estación del año utilizadas en SEDPORT (Zhang et al., 2001)

Table 3
Parameters for 12 land use categories (LUC) and five seasonal categories (SC)^a

LUC		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Z_0 (m)	SC 1	0.8	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 2	0.9	2.65	0.85	1.05	1.15	0.1	0.1	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 3	0.9	2.65	0.80	0.95	1.15	0.05	0.02	0.04	0.03	0.1	0.02	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 4	0.9	2.65	0.55	0.55	1.15	0.02	0.02	0.04	0.03	0.1	0.02	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
	SC 5	0.8	2.65	0.60	0.75	1.15	0.05	0.05	0.04	0.03	0.1	0.03	0.01	$f(u)$	$f(u)$	1.0
A (mm)	SC 1	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 2	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 3	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 4	2.0	5.0	5.0	10.0	5.0	5.0	5.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
	SC 5	2.0	5.0	2.0	5.0	5.0	2.0	2.0	na	na	10.0	10.0	na	na	na	10.0
α		1.0	0.6	1.1	0.8	0.8	1.2	1.2	50.0	50.0	1.3	2.0	50.0	100.0	100.0	1.5
γ		0.56	0.58	0.56	0.56	0.56	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.50	0.50	0.56

^aNote: $f(u)$ represents a function of wind speed (u) and na represents not applicable.

Tabla 5. Valores asignados a distintos parámetros de SEDPORT según los tipos de uso de suelo y categorías de estación del año (Zhang et al., 2001)

En la figura 25, se muestra como varía la velocidad de depósito de las partículas en función de su tamaño para unas condiciones atmosféricas y de la superficie dadas según el esquema de Zhang et al.(2001). Se puede apreciar como el movimiento Browniano es el responsable de que las velocidades de depósito en partículas muy pequeñas sean mayores de lo que se podría esperar; como se produce un mínimo en esa velocidad en torno a diámetros de 1 a 2 micras; como los procesos de impacto e intercepción tienen efecto notable en diámetros entre 2 y 20 micras y, por último, como la sedimentación gravitacional domina de forma clara a partir de 20 micras.

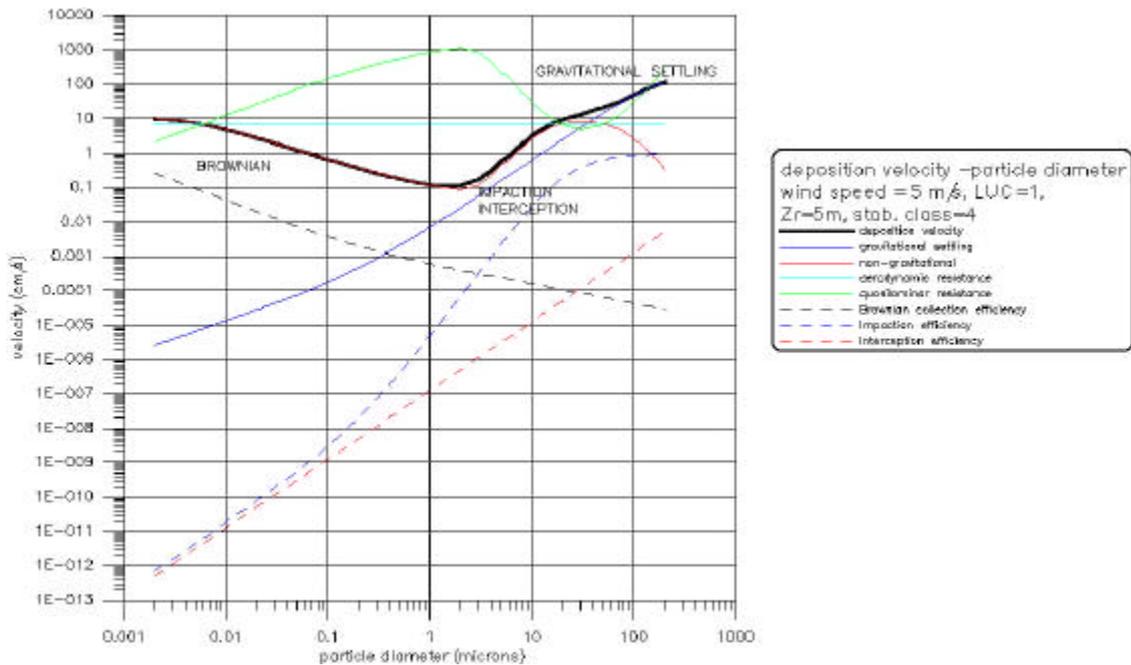


Figura 25. Velocidad de depósito frente al diámetro de las partículas y procesos más relevantes implicados.

Con objeto de verificar el funcionamiento de SEDPORT y su implantación en PORTPUFF se han realizado algunas pruebas que se detallan a continuación. Estas han consistido en simular la dispersión y depósito de partículas según su tamaño en función

de la densidad de la partícula, rugosidad del terreno, velocidad del viento y estabilidad atmosférica y considerando una única fuente de emisión de partículas emitiendo 100 Kgr/h de cada tipo de partícula.

En la figura 26, se muestra el depósito y la concentración de partículas en los cinco rangos de tamaños propuestos, en condiciones de viento, rugosidad, estabilidad y densidad indicados. En el caso de las partículas mayores (diámetro > 20 micras), la velocidad de depósito es lo suficientemente alta para que la inmensa mayoría de las mismas se depositen junto a la fuente emisora. La zona afectada por depósito de partículas y concentraciones significativas de contaminantes se va alargando según disminuye el tamaño de las partículas. En la tabla adjunta a la figura, se observan las concentraciones y depósitos máximos estimados. Puede verse claramente que ambas evolucionan de forma opuesta en función del tamaño de la partícula. Los máximos de concentración y los depósitos más bajos se observan en las partículas pequeñas, mientras que en las partículas grandes es al contrario.

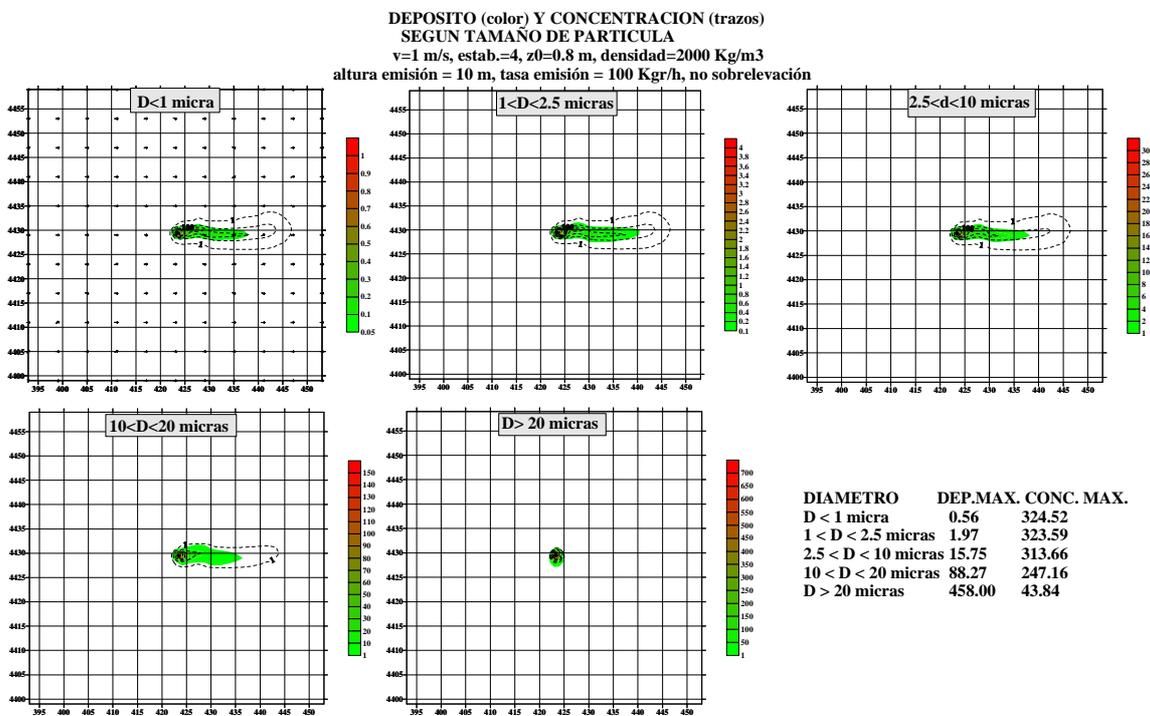


Figura 26. Depósito y concentración de partículas en los cinco rangos de tamaños propuestos, en condiciones de viento, rugosidad, estabilidad y densidad indicados.

Los efectos de la estabilidad atmosférica se exponen en las figuras 27 a 30. El resultado evidente es que el depósito de contaminantes es más rápido (mayores velocidades de depósito) cuanto mayor sea la inestabilidad (estabilidad 1) en todos los rangos de tamaños debido al aumento de las resistencias aerodinámicas y cuasilaminar con el grado de estabilidad (figura 27). Por otro lado, la dispersión atmosférica es más efectiva con una atmósfera inestable debido a una mayor turbulencia. Esto da lugar a que el área afectada por depósito sea más pequeña y las concentraciones en aire también sean menores. Como el depósito de partículas resulta de

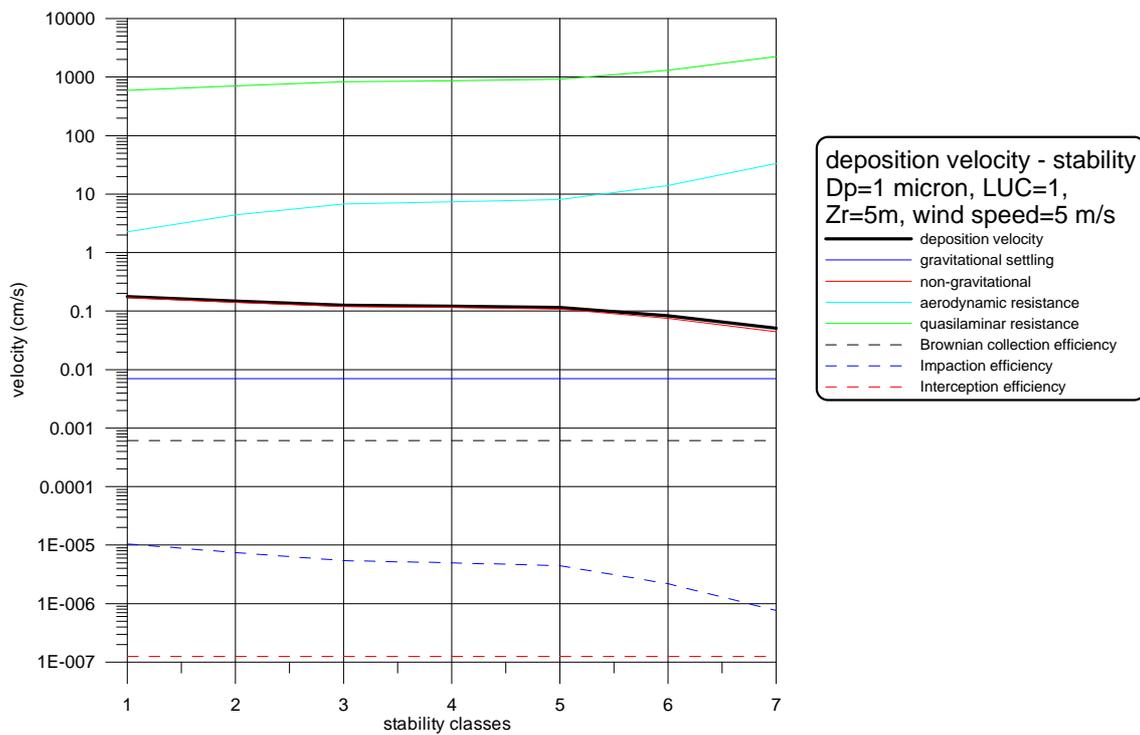
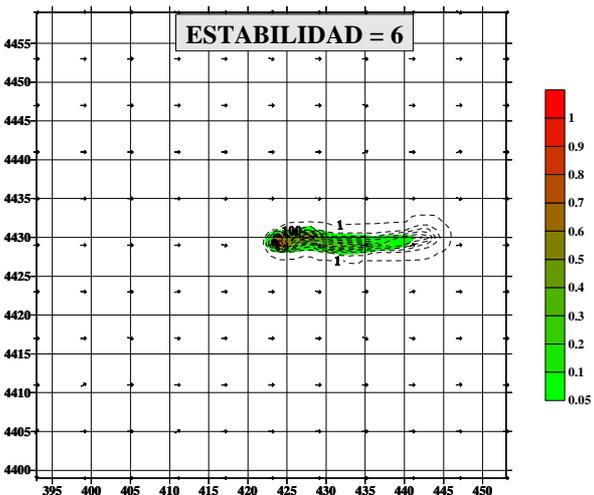
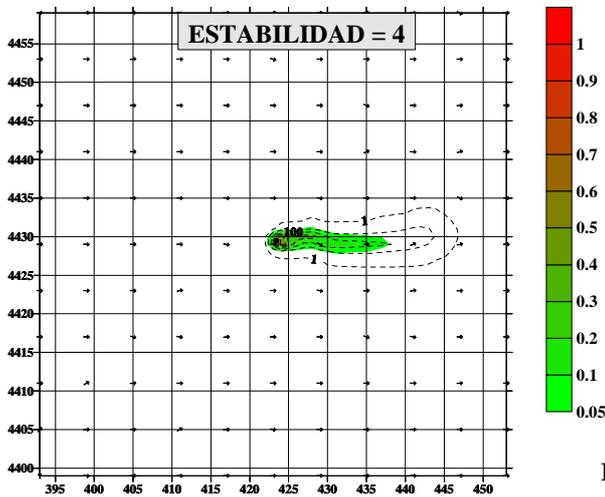
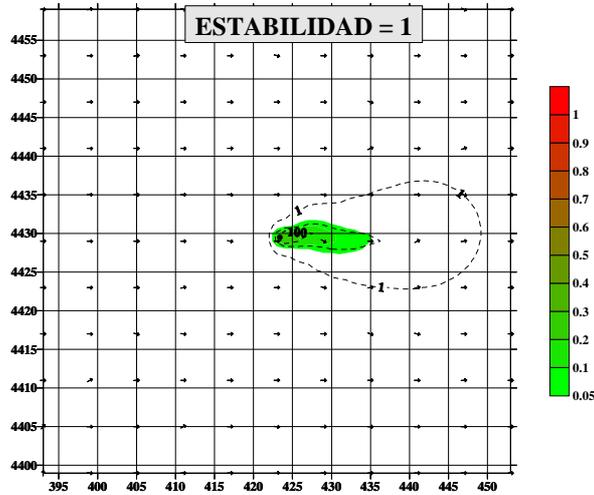


Figura 27. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función del grado de estabilidad atmosférica (1=muy inestable, 4=neutra, 7=muy estable) en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD
 diametro <1 micra, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emision = 10 m, tasa emision = 100 Kgr/h, no sobrelevacion



ESTABILIDAD	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	0.30	133.90
4	0.56	324.52
6	0.91	625.68

Figura 28. Depósito y concentración de partículas menores de 1 micra en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD
 2.5 < diametro < 10 micras, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación

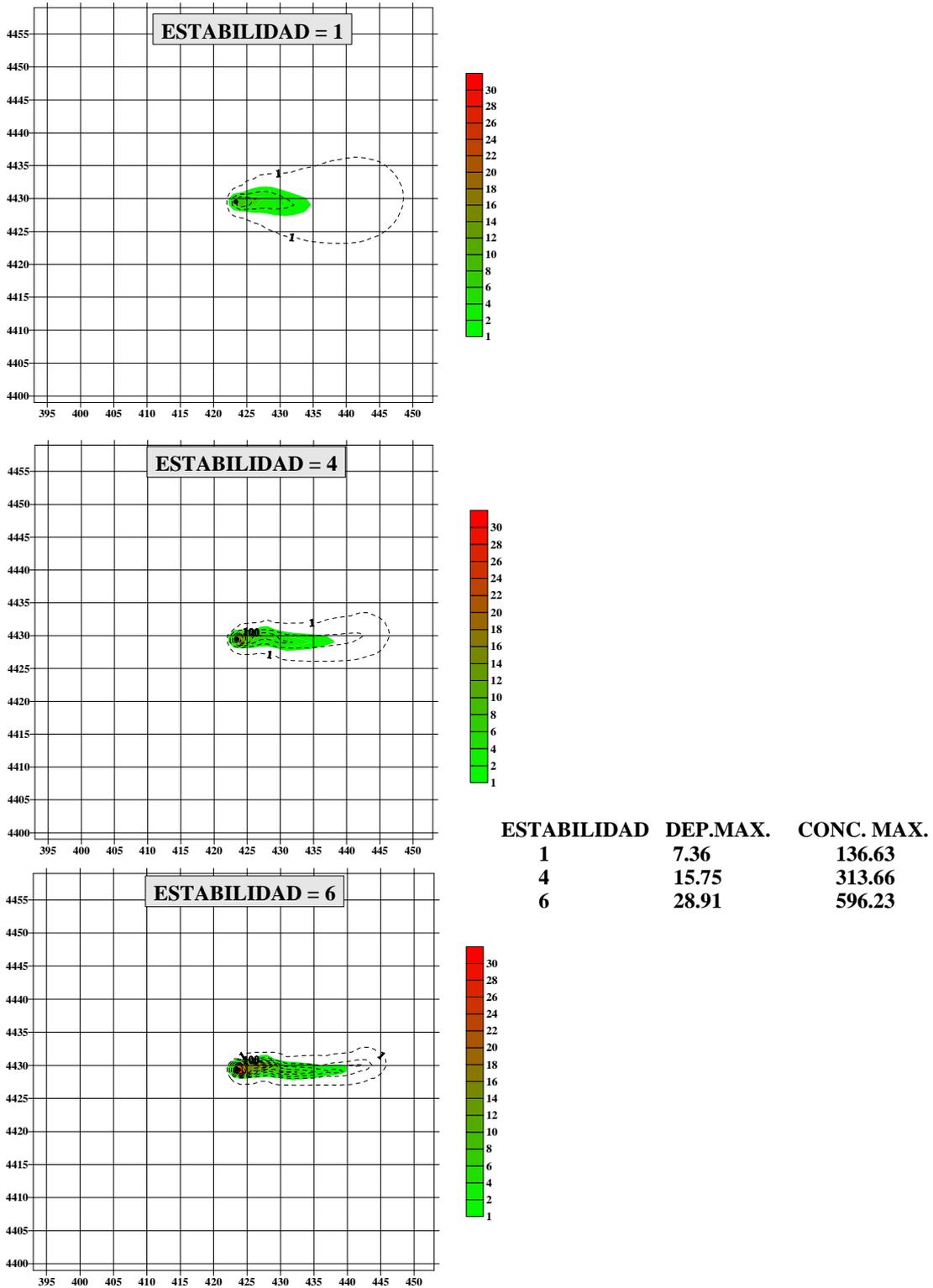
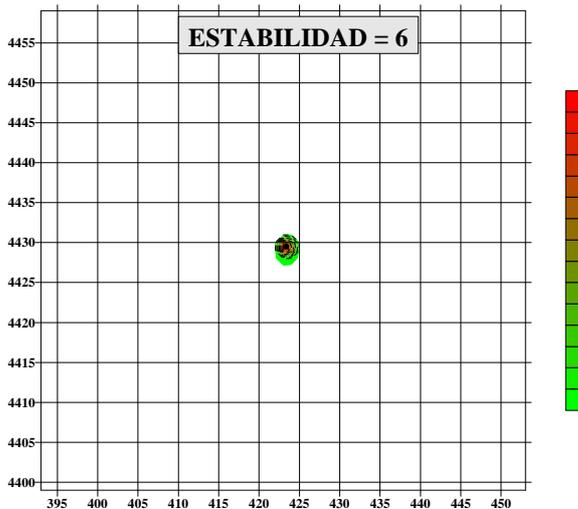
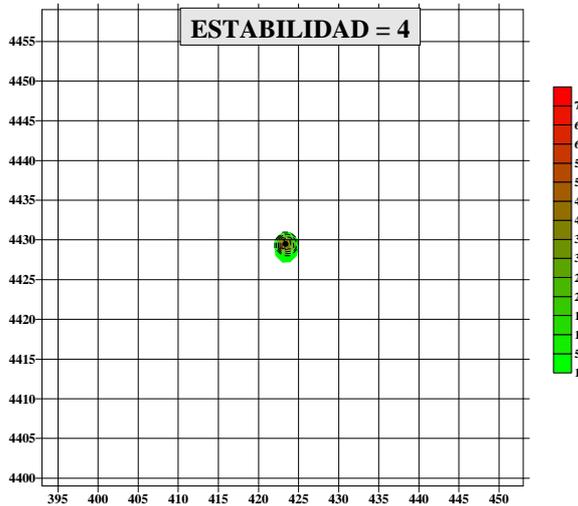
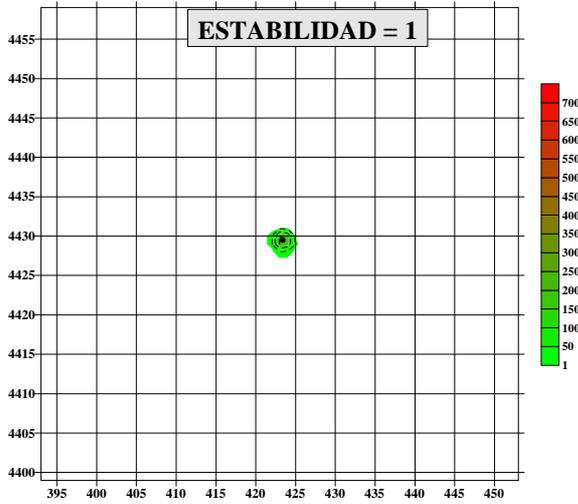


Figura 29. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN ESTABILIDAD**
 diametro > 20 micras, v=1 m/s, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



ESTABILIDAD	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	222.68	20.73
4	458.00	43.84
6	631.97	61.22

Figura 30. Depósito y concentración de partículas mayores 20 micras en tres tipos de clases de estabilidad (1, inestable; 4 neutra, 6 estable) en condiciones de viento, rugosidad y densidad indicados.

El efecto de la velocidad del viento puede apreciarse en las figuras 31 a 34. Existe una marcada tendencia a que la velocidad de depósito aumente con la velocidad del viento debido a la disminución en las resistencias aerodinámicas y cuasilaminares. Además la dispersión atmosférica aumenta con la velocidad del viento al existir mayor turbulencia mecánica. El área afectada por depósito de partículas es mayor cuanto mayor es el viento debido a un transporte atmosférico más efectivo. No obstante, las concentraciones en aire son menores.

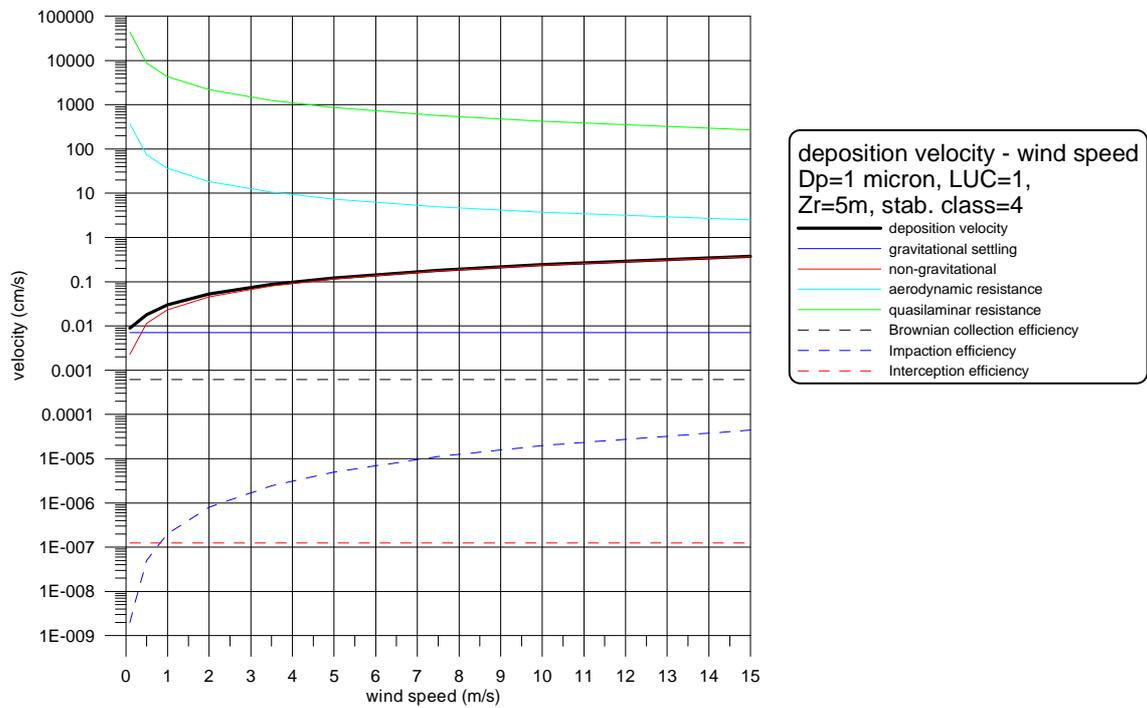
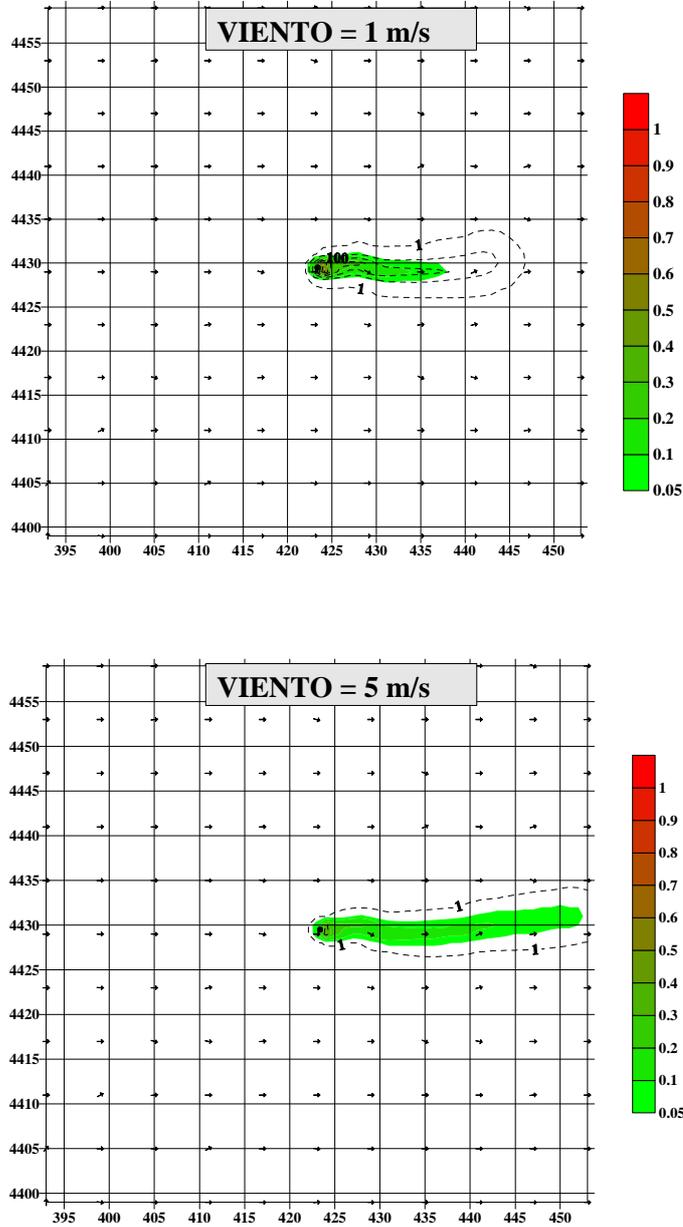


Figura 31. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función de la velocidad del viento en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO
 diametro <1 micra, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación

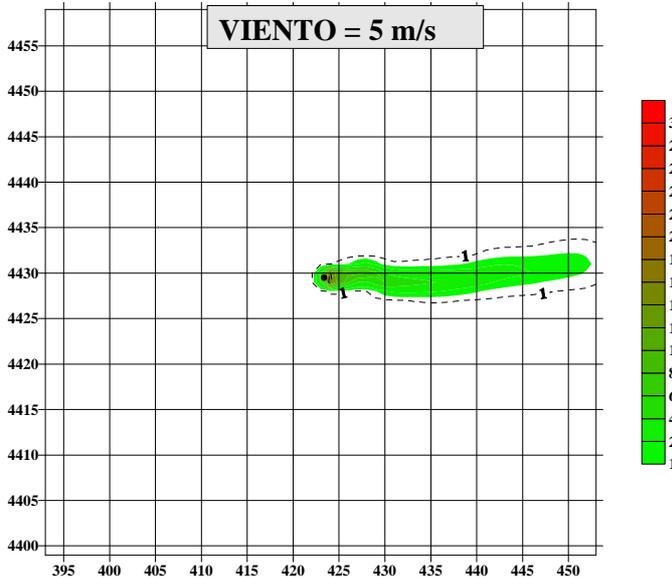
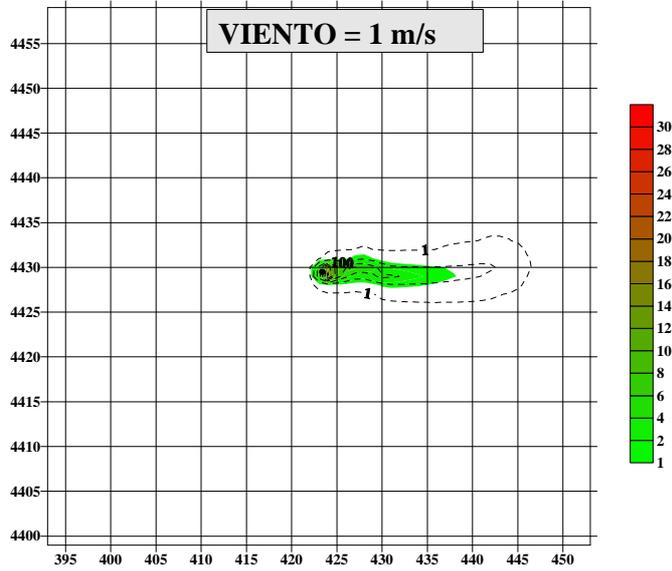


VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	0.56	324.52
5	0.37	56.78

Figura 32. Depósito y concentración de partículas menores de 1 micra para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO**

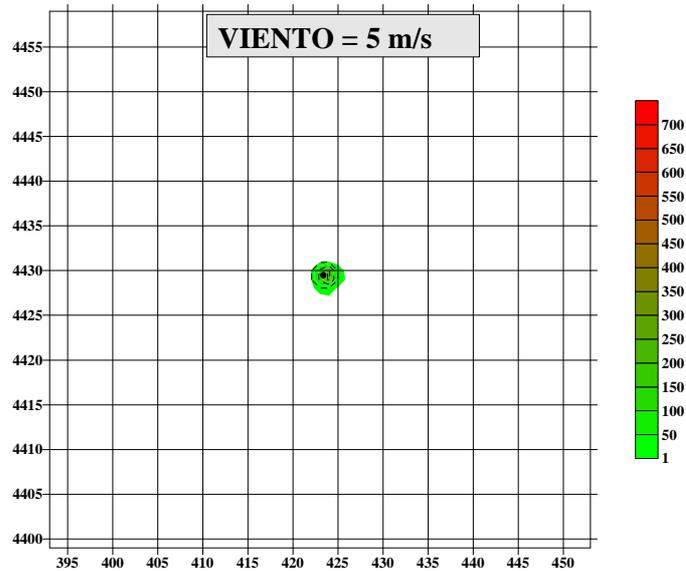
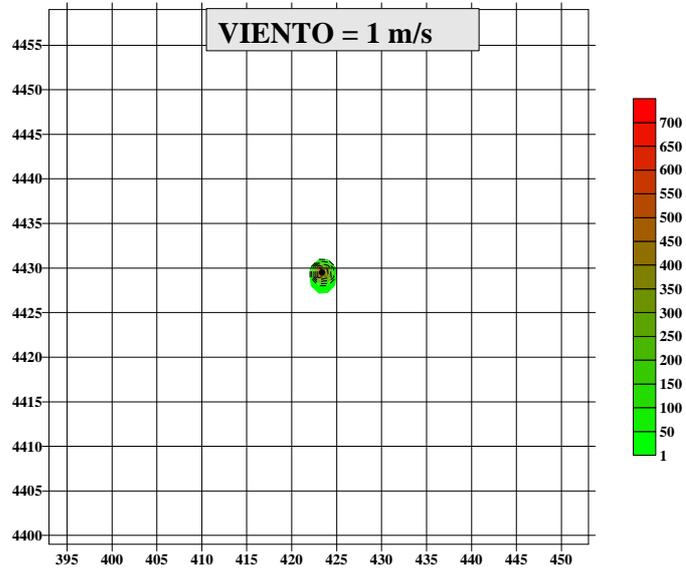
**2.5 < diametro <10 micras, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación**



VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	15.75	313.66
5	16.15	55.22

Figura 33. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

**DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN VIENTO**
**diametro > 20 micras, estabilidad = 4, z0=0.8 m, densidad=2000 Kg/m3
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación**

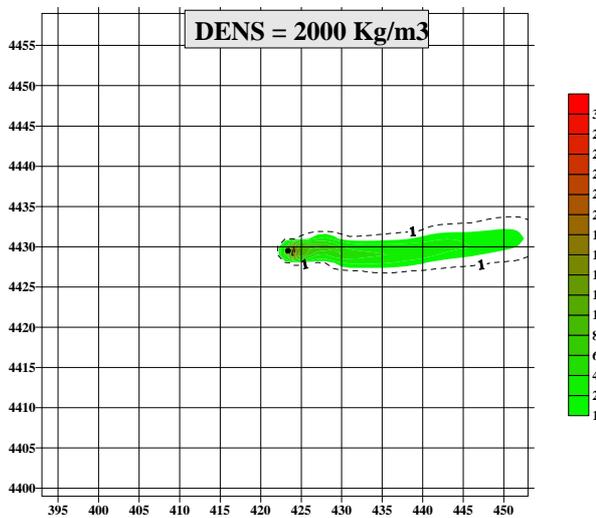
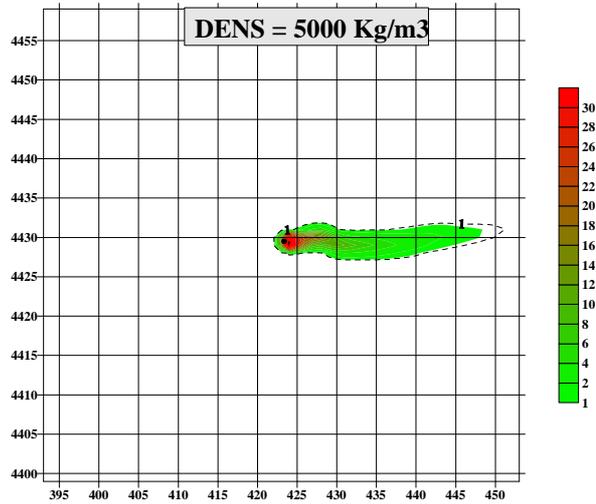


VIENTO	DEP.MAX.	CONC. MAX.
1	458.00	43.84
5	231.29	21.91

Figura 34. Depósito y concentración de partículas mayores de 20 micras para dos velocidades de viento en condiciones de estabilidad, rugosidad y densidad indicados.

El efecto de la densidad de las partículas es evidente, ya que a mayor densidad mayor movimiento de las partículas hacia la superficie y, por tanto, mayor depósito de las mismas (figura 35).

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN DENSIDAD DE LA PARTICULA
 2.5 < diametro <10 micras, estabilidad = 4, v = 5 m/s, z0 = 0.8 m
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



DENSIDAD	DEP.MAX.	CONC. MAX.
5000	49.51	51.66
2000	16.15	55.22

Figura 35. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos densidades de partículas en condiciones de estabilidad, rugosida, y viento indicados.

Una mayor rugosidad del terreno favorece la agitación turbulenta (disminuye la resistencia aerodinámica) y facilita la captura de partículas por los obstáculos del terreno (disminuye la resistencia cuasilaminar) (ver figura 36).

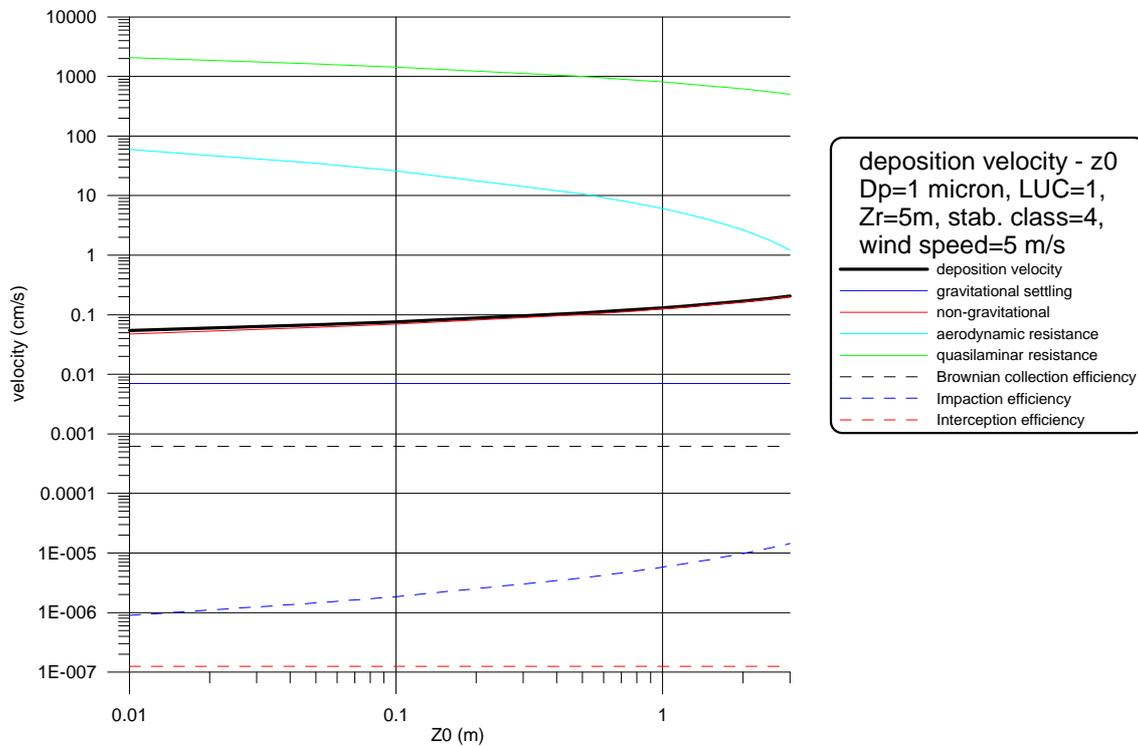
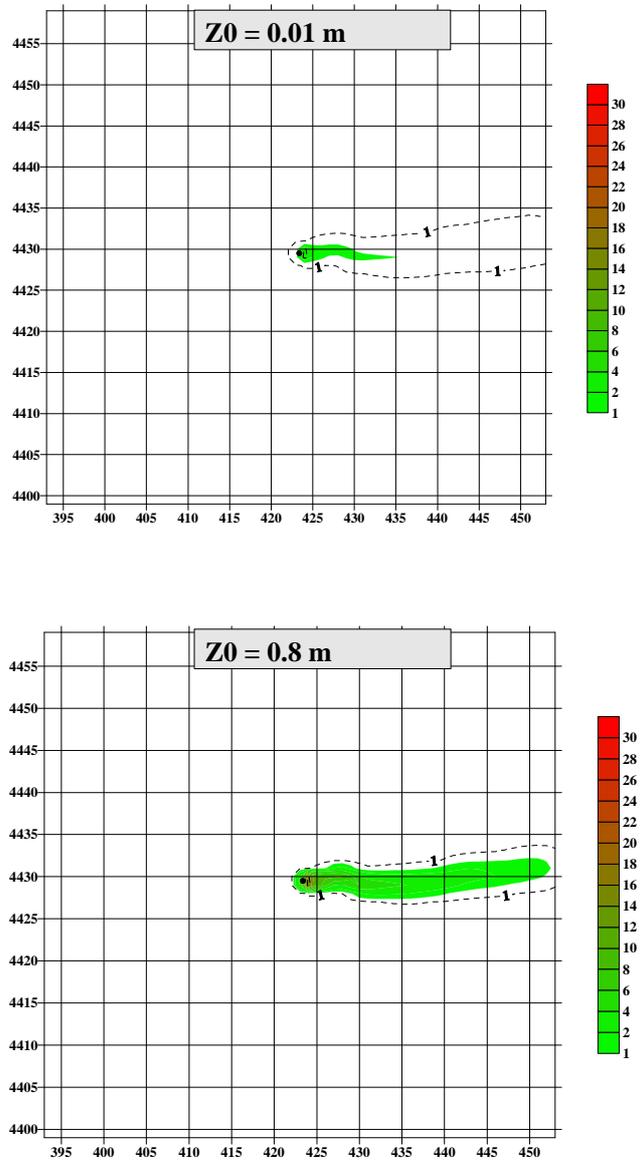


Figura 36. Velocidades de depósito y componentes de la misma en función de la rugosidad del terreno en el caso de partículas de 1 micra de diámetro aerodinámico.

El efecto resultante es que una mayor rugosidad del terreno aumenta el depósito de contaminantes de una forma importante (ver figura 37).

Con lo visto en esta sección, puede concluirse que SEDPORT está bien desarrollado e implantado en PORTPUFF.

DEPOSITO (color) Y CONCENTRACION (trazos)
SEGUN RUGOSIDAD
 2.5 < diametro < 10 micras, estabilidad = 4, v = 5 m/s, densidad=2000 Kg/m³
 altura emisión = 10 m, tasa emisión = 100 Kgr/h, no sobrelevación



Z0	DEP.MAX.	CONC. MAX.
0.01	2.95	56.60
0.8	16.15	55.22

Figura 37. Depósito y concentración de partículas entre 2.5 y 10 micras para dos rugosidades del terreno en condiciones de estabilidad, densidad y viento indicados.

Análisis de las concentraciones de partículas debidas a fuentes ajenas a los puertos

En los puertos donde haya información suficiente, se realizará un análisis de las concentraciones de partículas debidas a fuentes ajenas a los puertos para caracterizar la concentración de fondo en el entorno de cada recinto portuario y diferenciar claramente la contribución de las actividades portuarias a la contaminación en relación con otras fuentes de contaminación. Estos datos se incluirán en el modelo de dispersión. Para ello, se analizarán los datos medidos tanto meteorológicos como de contaminación en estaciones distribuidas alrededor de los puertos.

Para poder hacer esta labor, es necesario recopilar la información de calidad del aire existente en estaciones de las poblaciones próximas al puerto. Esta información es propiedad de los ayuntamientos o de las comunidades autónomas. Por lo que se deberá gestionar la adquisición de los datos solicitándolos a las autoridades competentes.

Estos trabajos no han podido realizarse todavía, pero se espera su comienzo lo antes posible.

Desarrollo e implantación del modelo de emisiones EMIPORT

Un dato clave en la estimación y predicción de los niveles de concentración de contaminantes es conocer cuanto contaminante se ha emitido, cuando, dónde y en qué condiciones. Las respuestas a cuándo y dónde se ha emitido el contaminante puede responderse de una forma bastante aproximada en el caso de un puerto delimitado la zona afectada por operaciones con graneles sólidos y acotando el período de tiempo en el que se desarrollan. Esta labor debe ser realizada por los gestores medioambientales del puerto para lo cual necesitan tener conocimiento lo más exacto posible de las operaciones portuarias.

Las demás preguntas (cuanto y en qué condiciones se emite el contaminante) no tienen una respuesta sencilla, ya que no estamos tratando chimeneas que puede ser monitorizadas incluso en continuo, sino que tratamos con lo que se conocen como fuentes difusas o fugitivas. Las operaciones portuarias pueden ser diversas (carga, descarga, transporte, almacenamiento, etc), puede ser realizadas de formas muy diversas y con herramientas diferentes (grandes grúas con cucharones de diversos tamaños, tolvas, apilamiento en parvas, carga y descarga en camiones, etc) y el cuidado y precaución con el que se realizan también puede ser muy diferente. A esto hay que añadir la diversidad de materiales y la disparidad de condiciones atmosféricas y del material que pueden influir de forma muy clara en la emisión de partículas a la atmósfera.

Es muy difícil, por no decir imposible, pretender un control y conocimiento absoluto de cómo se están realizando las operaciones con graneles en todo momento. Por todo ello, se plantea el desarrollo de un modelo de emisiones bautizado como EMIPORT que sea capaz de proveer de tasas de emisión de los distintos rangos de tamaños de partículas en función del tipo de operación, material y condiciones del mismo y las condiciones de la atmósfera. Se pretende que ese modelo esté basado en la mejor información disponible y en la información que se pueda generar dentro de las actividades de investigación del presente proyecto. Se propone que sea un modelo flexible, que permita una rápida actualización de datos e incluso el recálculo de emisiones para obtener un mejor ajuste de la contaminación predicha por los modelos con los valores medidos en las estaciones.

Recopilación de información existente

El modelo EMIPORT está orientado a disponer de una base de datos de tasas de emisión de partículas a la atmósfera o de formulaciones en función del tipo de operación, material y condiciones del mismo y de la atmósfera. Para ello, está realizando una revisión de las formulaciones existentes en la literatura técnica, como es el caso de los informes AP-42 de la Environmental Protection Agency (EPA, <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>). En esta revisión, se han encontrado formulaciones para estimar factores de emisión en operaciones que pueden ser similares a las realizadas en puertos.

En cuanto a la circulación de vehículos sobre carreteras sin asfaltar, caminos y áreas con alto contenido en material pulverulento, la EPA (AP-42) recomienda la aplicación de la siguiente expresión para el cálculo de las emisiones por Km recorrido por vehículo:

$$E = \frac{k(s/12)^a (W/3)^b}{(M/0.2)^c} \quad (76)$$

donde:

E = factor de emisión (kg/Km-vehículo)

s = contenido de polvo del material en la superficie (%)

W = peso medio del vehículo (toneladas)

M = contenido de humedad del material de la superficie (%)

Constante	PM2.5	PM10	PM30
k (kg/Km-vehículo)	0.107	0.733	2.819
a	0.8	0.8	0.8
b	0.4	0.4	0.5
c	0.3	0.3	0.4
Nivel de calidad	Medio	Alto	Alto

Tabla 6. Valores de las constantes de la expresión 76.

En el caso de carga, descarga y manipulación de parvas, se establece que la cantidad de partículas emitidas por tonelada de material tratado por manipulaciones en parvas puede responder a la siguiente expresión:

$$E = 0.0016k \frac{(u/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \quad (77)$$

donde:

E = factor de emisión (kg/Tonelada)

u = velocidad media del viento (m/s)

M = contenido de humedad del material de la superficie (%)

Constante	PM2.5	PM10	PM30
k (kg/Tonelada)	0.11	0.35	0.74
Nivel de calidad	Muy alto	Muy alto	Muy alto

Tabla 7. Valores de las constantes de la expresión 77.

El viento por encima de cierta intensidad puede resuspender material depositado al aire libre. Esta resuspensión será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad del viento y dependerá de la disponibilidad y del tipo del material resuspendible. La resuspensión no será un fenómeno continuado, sino que existirá mientras haya material a resuspender. La disponibilidad de material a resuspender será menor según aumenta el periodo de exposición a vientos fuertes.

La EPA en su documento AP-42 da unas expresiones para calcular la cantidad de material potencialmente resuspendible (en el caso de que haya material fino disponible suficiente) desde acopios o parvas al aire libre después de que éstas han sido manipuladas (material adicional se vertido sobre ellas, se ha removido el material, etc.) en función del viento máximo observado en cada día. Establece que el factor de emisión E (Kg/m²) dependerá del potencial de erosión P de cada evento diario individual de viento fuerte:

$$E = kP = k[58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*)] \quad (78)$$

siendo u_t^* y u^* , la velocidad de fricción umbral de resuspensión y la correspondiente al viento medio medido en las horas de viento fuerte capaz de resuspender material, respectivamente. Cuando estemos por debajo del umbral, no habrá emisión

Constant	PM2.5	PM10	PM30
k	0.2	0.5	1.0

Tabla 8. Valores de las constantes de la expresión 78.

Con esta expresión se obtiene la emisión por unidad de superficie y día. Para repartir, esa emisión a lo largo del día hay que considerar el período de tiempo afectado por vientos fuertes por encima del umbral y el tiempo transcurrido desde la última manipulación de la parva o acopio. Además, hay que conocer el contenido de finos resuspendibles y cómo este contenido va reduciéndose en el transcurso de un evento de resuspensión por viento. El reparto puede hacerse en función de unos pesos asignados a cada hora, de tal forma que las emisiones horarias por unidad de superficie pueden estimarse entonces mediante una ponderación:

$$E_h = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} E \quad (79)$$

donde n es el número de horas afectadas por viento fuerte en cada día estudiado.

La velocidad de fricción se obtiene de la siguiente expresión:

$$u_z = \frac{u^*}{0.4} Ln \left[\frac{z}{z_0} \right] \quad (80)$$

donde u_z es la velocidad del viento en la altura z y z_0 es la rugosidad media del terreno.

Estimación de factores de emisión

En el desarrollo de EMIPORT, se pretende ir más allá de estas formulaciones determinando otras nuevas más específicas a las operaciones portuarias. Por este motivo, una de las actividades de este proyecto es la realización de campañas experimentales en el Puerto de Tarragona con el objeto de medir los niveles de contaminación de contaminantes en las proximidades de los puntos donde se están realizando operaciones específicas con graneles (CIEMAT-CSIC, 2003). Entre los objetivos de estas campañas llevadas a cabo por el un grupo del Instituto Jaume Almera del CSIC y otro grupo del CIEMAT, está la de proporcionar mediciones de alta calidad de concentración de partículas en distintos rangos de tamaños acompañadas de medidas de las condiciones atmosféricas y de un control exhaustivo de los tipos de operación que se están realizando y cuando y dónde se están realizando. En estas campañas se han cubierto un abanico bastante amplio de operaciones de carga, descarga y transporte de graneles diversos, resuspensión por paso de vehículos, etc. Se han utilizado un total de tres monitores GRIMM colocados en arco alrededor del punto de operación y a unas pocas decenas de metros de las mismas. Estas mediciones se hacían en periodos de tiempo corto y con una frecuencia de muestreo alta (6 segundos). Esto permitía poder tener muy bien identificados los picos de contaminación asociados a operaciones concretas.

Nuestro grupo de investigación ha trabajado en la puesta a punto de una metodología que permitiera mediante el uso de una versión de MELPUFF para microescala estimar las emisiones que con mayor probabilidad se podían corresponder a los valores de concentración registrados por los monitores instalados en las proximidades de la fuente.

Este trabajo ha supuesto:

1. Modificar MELPUFF para realizar un tratamiento de la dispersión a microescala considerando pasos temporales de 1 segundo frente a los pasos temporales habituales de 1 a 15 minutos que se usan a mesoscala.
2. Tener los datos de los monitores GRIMM, de las estaciones meteorológicas y el cronometraje de las operaciones portuarias bien sincronizados.
3. Ubicar en planos de una forma precisa la localización de la fuente emisora y la posición de los monitores.
4. Revisar los datos registrados por los monitores GRIMM con objeto de aislar los picos correspondientes a emisiones de partículas desde operaciones portuarias concretas.
5. Determinar los niveles llamados de fondo como aquellos que se observan antes y después de cada pico de concentración.
6. Analizar y procesar los datos meteorológicos con objeto determinar la dirección y velocidad de viento y la clase de estabilidad representativas de cada evento de emisión de partículas
7. Realizar simulaciones de la dispersión de partículas (en rangos de tamaño coincidentes con los medidos por los monitores GRIMM) emitidas en cada uno de los eventos individuales suponiendo unas tasas de emisión tentativas cubriendo un periodo de tiempo consistente con la extensión del pico de contaminación, la velocidad del viento y la distancia entre fuente de emisión y monitores.

8. Comparar las estimaciones de concentración del modelo con los datos observados con objeto de poder estimar las tasas de emisión reales mediante un procedimiento de regresión multilíneal.
9. Realizar simulaciones de verificación con las tasas estimadas.

Lo más novedoso de este procedimiento reside en el procedimiento de estimar las tasas de emisión. A continuación, se explica en detalle los puntos 7 a 9 tomando un caso ejemplo que se corresponde a la descarga de un camión de pellets de alfalfa en el muelle de Castilla del Puerto de Tarragona el día 3 de Junio.

En la figura 38, puede verse el registro de concentración de partículas PM10 registrado por el GRIMM 2 situado a 65 metros del punto de descarga del camión, en el que impactó de forma más clara la nube de partículas. Se alcanzó una concentración superior a 2600 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$. El ancho del pico cubrió 30 segundos. Por lo tanto, podemos pensar que como mucho la emisión duró 30 segundos. Durante esos instantes el viento sopló con una velocidad de 3.4 m/s y de dirección 228°. Considerando la distancia entre el foco emisor y el GRIMM2 (65 m) y la velocidad del viento se estima que la emisión comenzó unos 19 segundos antes del comienzo de pico, es decir, en el segundo 3353.

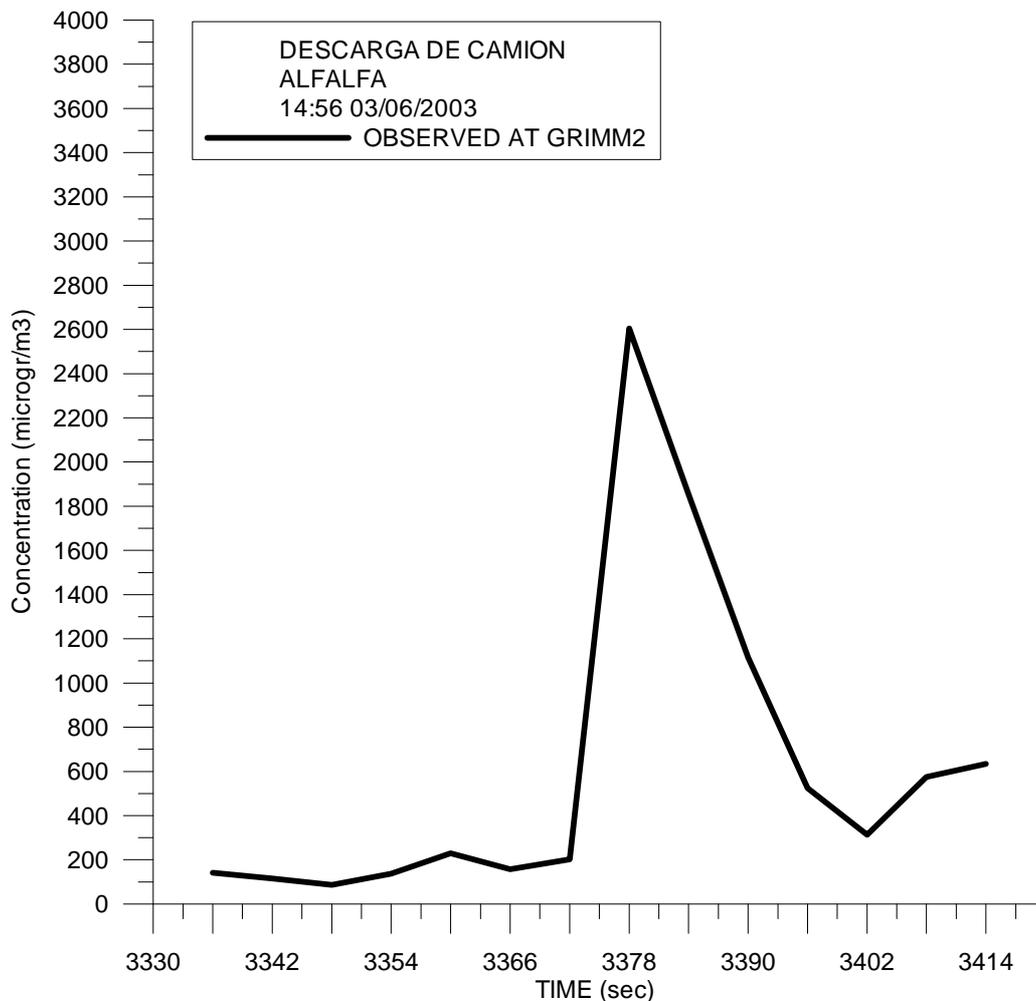


Figura 38. Concentración de PM10 observada en el GRIMM2 debida a la descarga de un camión con pellets de alfalfa en el Muelle de Castilla del Puerto de Tarragona el día 3 de Junio de 2003.

También hay que tener en cuenta que las nubes de contaminante durante el transporte aumentan su tamaño por difusión, lo que implica que se detectarían su llegada antes de lo previsto y tardarían en pasar por cada monitor un tiempo determinado (Figura 39). En las simulaciones preliminares realizadas, se apreció que la nube adquiere un diámetro de unos 70 u 80 metros y que tardaría en pasar sobre un monitor unos 20 segundos. Debido a que la nube continua creciendo, se observa una asimetría tardando aproximadamente 6 segundos (T1) hasta llegar a la zona de máximo y otros 14 (T2) después del máximo. Puede apreciarse que con, aproximadamente, 10 nubes emitidas una cada segundo cubriríamos el intervalo de 30 segundos correspondiente al máximo observado.

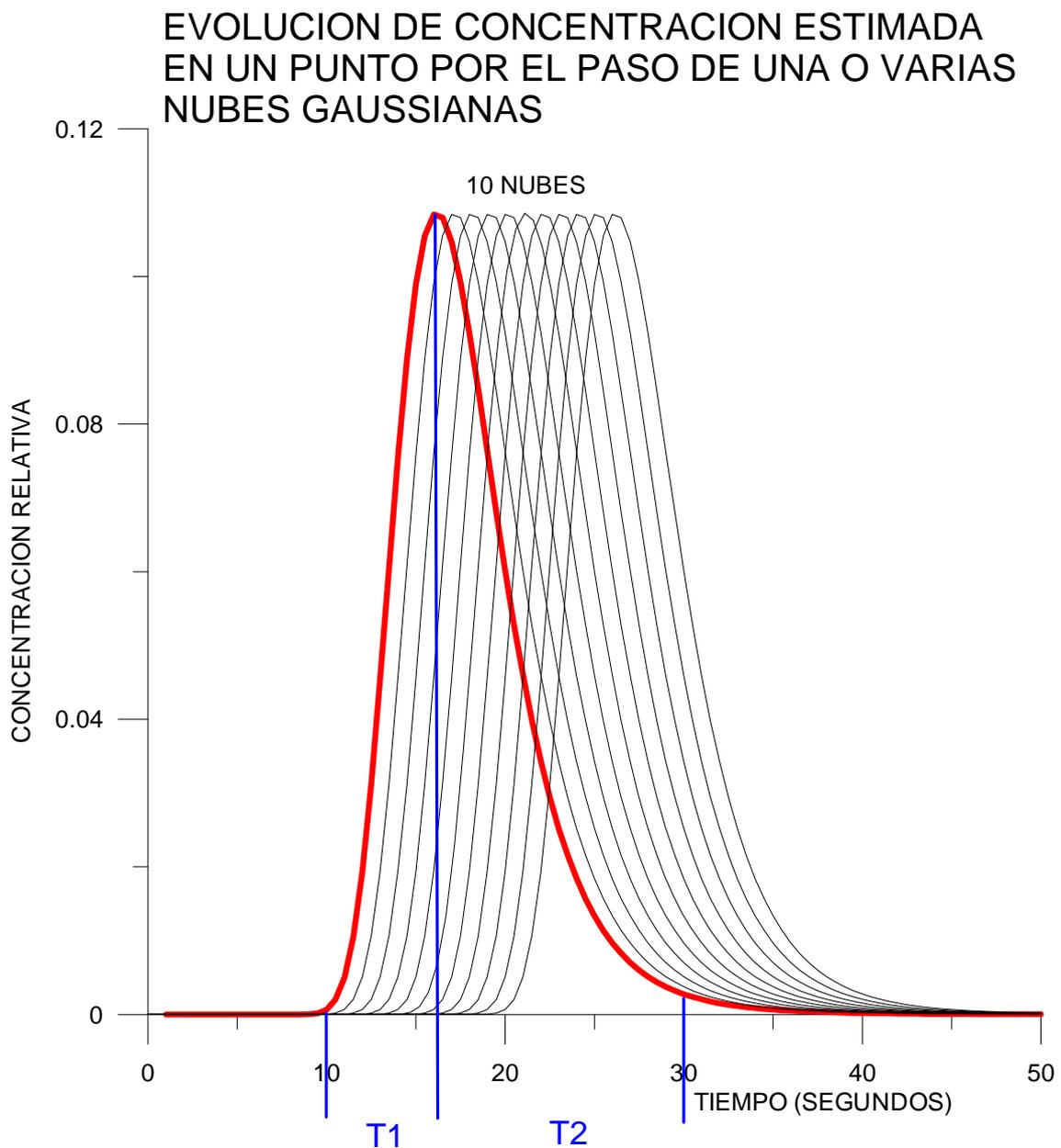


Figura 39. Evolución de concentración estimada en un punto por el paso de una o varias nubes gaussianas

Teniendo en cuenta este detalle, la duración de la emisión puede ser de alrededor de 10 segundos, notablemente más corta que los 30 segundos estimados inicialmente por inspección de pico medido en el GRIMM2. No obstante, es conveniente utilizar un intervalo intermedio.

Se realizó entonces una simulación con MELPUFF-microescala para un dominio de 210 x210 m² con una malla de 7x7 m² de resolución, asumiendo que se emitían 18 nubes PM10 de 10 gr cada una entre los segundos 3355 y 3372. En la figura 40, se muestra el resultado de la simulación correspondiente al segundo 3384.

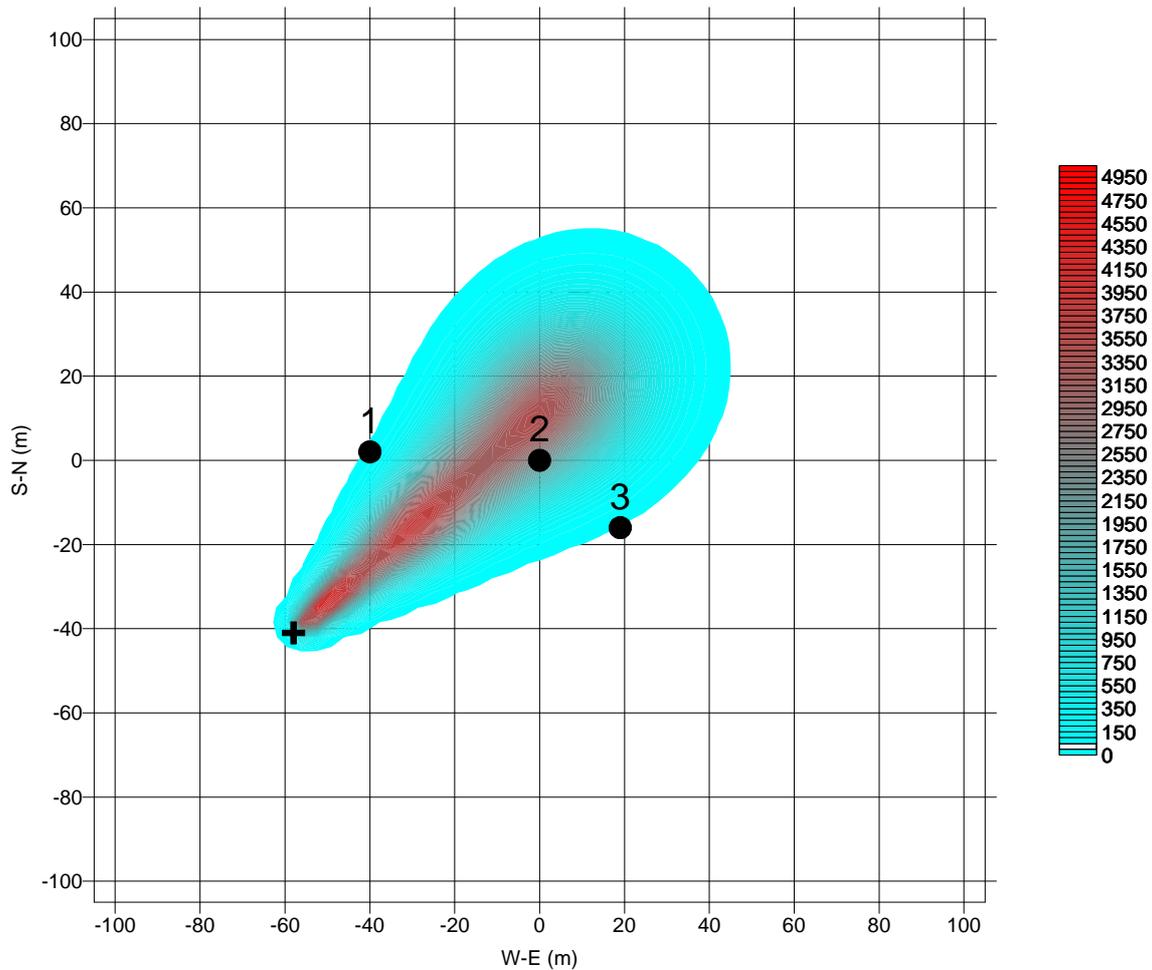


Figura 40. Resultado de la simulación de la dispersión de 30 nubes de 10 gr de PM10 cada una correspondiente al segundo 3384.

Uno de los resultado de MELPUFF-microescala es dar la estimación de la concentración de contaminante, C_{p_m} , en cada ubicación de los monitores GRIMM y la aportación de cada nube de contaminante en cada punto y en cada instante, $R_{m,i}$.

Si analizamos las ecuaciones 1 y 2, podemos comprobar que la concentración de un contaminante en un punto es proporcional a la cantidad de contaminante emitida o contenida en cada nube de contaminante. Es decir, podemos afirmar que la concentración observada en un punto y en un instante dado puede expresarse como una combinación lineal de las aportaciones de cada nube teórica emitida:

$$Co_m = \sum_i a_i R_{m,i} \quad (81)$$

siendo a_i unos coeficientes representativos de la cantidad real de contaminante existente en cada nube i . Nuestro objetivo será determinar el valor de esos coeficientes a_i a partir de los valores de $R_{m,i}$ estimados por el modelo en cada monitor m y de las concentraciones medidas en los monitores Co_m en diferentes instantes correspondientes a la aparición del pico de concentración seleccionado para ambas variables. En el caso expuesto, corresponden a mediciones y contribuciones de las nubes de contaminante entre los segundos 3372 y 3402. De esta forma, disponemos de un número de datos importante (18 medidas correspondientes a 6 medidas por monitor y 3 monitores) que permitirá mediante técnicas de regresión multilínea estimar los coeficientes a_i o lo que es lo mismo el contenido de contaminante de cada nube.

Este proceso llevó a que las concentraciones observadas en los monitores GRIMM puede corresponder a las emisiones por descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa expuestas en la tabla siguiente.

Tiempo (segundos)	Emisión (gramos)
3355	25.7
3356	0.0
3357	0.0
3358	0.0
3359	0.0
3360	0.0
3361	0.0
3362	0.0
3363	11.1
3364	0.0
3365	0.0
3366	0.0
3367	0.0
3368	0.0
3369	0.0
3370	0.0
3371	0.0
3372	4.5
TOTAL	41.3

Tabla 9. Emisión estimada por la descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa suponiendo emisiones de cada segundo.

Este mismo proceso se ha repetido pero asumiendo que se emite una nube de contaminante cada 6 segundos en sincronía con el intervalo de muestreo de los monitores GRIMM. En este caso, se supusieron 4 nubes emitidas entre los segundos 3354 y 3372. Los resultados obtenidos fueron los expuestos en la tabla 10.

Tiempo (segundos)	Emisión (gramos)
3354	17.8
3360	14.6
3366	10.2
3372	0
TOTAL	42.6

Tabla 10. Emisión estimada por la descarga de camión de 24 toneladas cargado con pellets de alfalfa suponiendo emisiones de cada 6 segundos.

Puede apreciarse que los resultados son muy parecidos a los mostrados en la tabla 9, especialmente en el total de emisión donde difieren en apenas un 2.5%. Aplicando la expresión 77, con la velocidad de viento existente (3.4 m/s) y suponiendo un material casi seco (2% de humedad), obtenemos para un camión de 24 toneladas una emisión de 23.7 gramos, que aunque es un valor bastante inferior, es del mismo orden de magnitud del estimado con nuestra metodología.

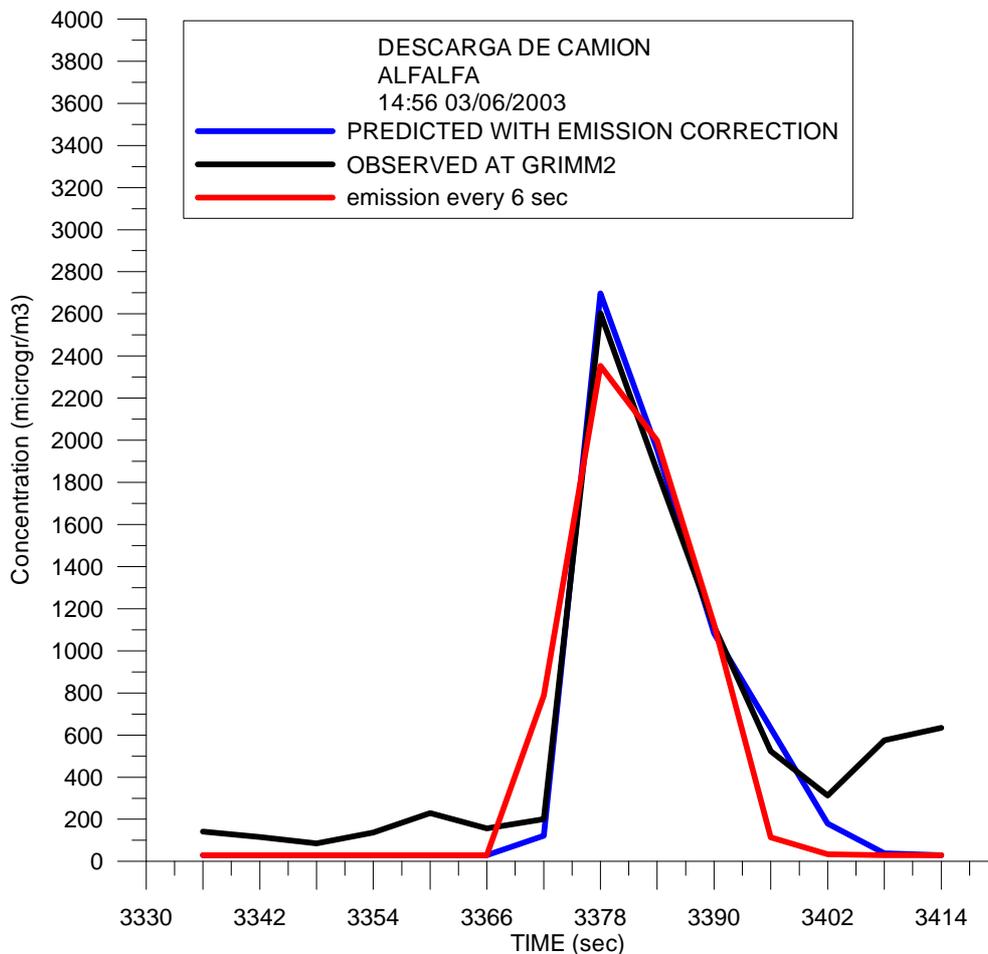


Figura 41. Concentraciones de PM10 observadas y predichas en el caso de emisiones estimadas cada segundo y cada 6 segundos para una descarga de un camión con pellets de alfalfa.

En la figura 41, se muestra la comparación de la concentración de PM10 observada con las estimadas utilizando las emisiones expuestas en las tablas 9 y 10. El ajuste es muy bueno en el caso de emisiones cada segundo y razonablemente bueno en el caso de emisiones cada 6 segundos. Esto muestra que la metodología puede ser muy adecuada para la estimación de tasas y factores de emisión.

Los resultados para emisiones cada segundo muestran períodos de emisión cero entre otros con emisión significativa. En un proceso de emisión como la descarga de un camión es de esperar cierta continuidad durante el intervalo de operación. Este resultado puede ser debido a que la resolución temporal de los GRIMM es 6 segundos frente a la pretendida resolución temporal de las emisiones estimadas. Creemos, por tanto, que es más conveniente suponer emisiones con el mismo período que el de muestreo de los GRIMM.

Con esto queda expuesta la metodología que se está aplicando para la estimación de tasas y factores de emisión asociadas a las operaciones portuarias que fueron objeto de las campañas experimentales realizadas en Junio de 2003 en el Puerto de Tarragona. Estas, como indica el informe (CIEMAT-CSIC, 2003) cubren un número notable de operaciones y materiales pero todavía quedan bastante por tratar.

Un aspecto importante de la metodología expuesta es la estimación de la incertidumbre. Las fuentes de error que podemos esperar pueden derivarse de las incertidumbres en las mediciones de los monitores GRIMM y de las variables meteorológicas (especialmente velocidad y dirección de viento), de las simplificaciones utilizadas para el tratamiento de la dispersión de contaminantes, de ciertos parámetros relativos a altura efectiva y tamaño iniciales de cada nube de contaminante (aunque aquí han servido de notable apoyo las fotografías y videos realizados durante las campañas. Para estimar las incertidumbres asociadas a los datos de entrada meteorológicos y otros datos iniciales, se pretende en lo posible aplicar el procedimiento expuesto suponiendo pequeñas variaciones en esos datos y analizar los resultados obtenidos. Por otro lado, la forma en que se realiza cada operación puede variar de un momento a otro y resultar que en operaciones similares con un mismo material tengas emisiones muy distintas. Es conveniente, por tanto, cubrir el mayor número de casos posible para cada tipo de operación con objeto de obtener valores promedio y márgenes de error.

Procedimiento de recálculo de emisiones

Hasta que no se disponga de información sobre todas las operaciones contaminantes del puerto, se utilizará otro procedimiento para la estimación de las tasas de emisión. Se basará en la comparación entre los valores obtenidos por el modelo en los puntos en los que se encuentra los monitores supuesta una tasa de emisión y los valores de concentración realmente medidos por el monitor o monitores y es factible gracias a la capacidad de PORTPUFF de dar la contribución de cada foco a la concentración de partículas en cada punto de interés

El procedimiento se usará en la modalidad de tiempo real cuando se desconozca la tasa de emisión y durante un periodo suficiente para que todas los focos que actúan y cuyas tasas de emisión sean desconocidas hayan tenido la ocasión de impactar en algún monitor.

Es imprescindible también disponer de unos valores de la concentración de fondo, observada por los monitores y que no son imputables a los focos de los que se pretende recalculan las tasas de emisión.

Este programa intenta resolver un sistema de M ecuaciones con N incógnitas ($N = n^{\circ}$ de focos, $M = n^{\circ}$ de periodos de 10' por el n° de monitores)

$$\begin{aligned} A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + \dots + A_{1N}X_N &= B_1 \\ A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + \dots + A_{2N}X_N &= B_2 \\ A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 + \dots + A_{3N}X_N &= B_3 \\ \dots & \\ A_{M1}X_1 + A_{M2}X_2 + A_{M3}X_3 + \dots + A_{MN}X_N &= B_M \end{aligned} \tag{82}$$

donde:

A_{ij} = Concentración predicha en el monitor i debida al foco j /tasa_emision_inicial(j). durante periodo p

B_i = Concentración observada en el monitor i menos la concentración de fondo durante periodo p

X_j = Tasa de emisión del foco j en kg/hora

El programa intenta, después de analizar la posibilidad de calcular las tasas de emisión de todos lo focos incluidos en el fichero de emisiones con tasas de emisión ficticias, obtener el valor de las X_j de una manera directa, es decir buscando aquellas ecuaciones dónde sólo haya un coeficiente A_{ij} distinto de cero y eliminar así el mayor número de incógnitas, X_j 's, del sistema de ecuaciones. Una vez modificados los coeficientes de las incógnitas restantes después de aplicar el procedimiento tantas veces como sea posible, se buscan las ecuaciones que tengan sólo dos coeficientes A_{ij} distintos de cero. Si existen al menos dos ecuaciones con los mismo A_{ij} , -los coeficientes de los mismos dos focos - distintos de cero se resuelve ese minisistema y se modifica las ecuaciones del sistema con los valores obtenidos para las incógnitas del minisistema, tantas veces

como sea posible. En muchos casos estos dos procedimientos parciales permite la resolución completa y por métodos directos del sistema de ecuaciones y por tanto del procedimiento de recálculo de emisiones.

Si no fuera así y quedasen tasas de emisión por recalcular y además el número de ecuaciones disponibles MI fuera mayor que el número NI de focos por determinar, el procedimiento construye todas las combinaciones posibles de NI ecuaciones y resuelve cada una de estos sistemas mediante el método de Gauss-Jordan. El valor de la tasa de emisión para cada foco, se obtiene como el valor medio obtenido para cada combinación de ecuaciones cuya matriz de coeficientes no sea singular, una posibilidad no demasiado remota.

Hay muchas razones para pensar que los sistemas de ecuaciones así contruidos y que se intentan resolver con este procedimiento adolecen de ciertos problemas asociados a que:

- a) La predicción del modelo y la realidad pueden diferir bastante en algunas situaciones, no hay que olvidar que un modelo es sólo una aproximación a la realidad.
- b) Los valores de fondo considerados para ese periodo de 10' han sido obtenidos como un valor medio para ese tipo de situaciones y no tiene porque coincidir exactamente con la realidad de ese momento
- c) Las tasas de emisión reales dependen, no sólo de lo que se carga/descarga sino también de la forma que se está haciendo (ritmo y cantidad en cada paletada...), y de las características meteorológicas del momento de la carga/descarga (viento, humedad) y estas condiciones cambian de un periodo de 10' a otro, es decir los valores de las incógnitas no son exactamente iguales de unos periodos a otros.
- d) Los monitores pueden sufrir alguna deriva o falta de calibración no advertidas, que desvirtúen los resultados observados.
- e) Puede haber operaciones que impactan sobre el monitor, como las producidas por trasiego de camiones en las proximidades de éste, que no han sido consideradas como focos en la ejecución del programa de dispersión y que sin embargo están potenciando un incremento en la concentración observada que no se debería imputar a los focos considerados. Sin embargo el sistema, al no tener conocimiento de estas operaciones, considera que todo lo que llega al monitor proviene de los focos considerados o es contaminación de fondo.

Todo esto junto al posible mal condicionamiento de las matrices resultantes de utilizar métodos numéricos, puede hacer que el sistema sea difícil de resolver, de ahí que, una vez que se han obtenido por el método directo el mayor número posible de incógnitas, se cree con el programa muchas combinaciones de ecuaciones para conseguir que haya alguna/s 'buena/s' (cuyo determinante sea distinto de cero) para ser resuelta.

Por todo lo anteriormente expuesto, este procedimiento deberá solo usarse para calcular tasas de emisión de las operaciones de las que no se dispongan de información ya definitiva en la base de datos de emisiones. La información de la que se dispondrá después de analizar los datos de las campañas de Tarragona de la que se habla en otro

apartado de este informe permitirán disminuir cada vez más a lo largo del tiempo el número de operaciones del puerto con la calificación de operación con tasa de emisión desconocida.

Debido a la cantidad de factores que hay que considerar para que este procedimiento dé un valor mas aproximado a la realidad, sería muy provechoso disponer de información de algunos puertos, en tiempo diferido, que incluyan para periodos extensos: operaciones que han tenido lugar, información meteorológica e información de monitores para poder, en gabinete, seleccionar los mejores periodos para la aplicación de este procedimiento e ir incorporando los resultados a la base de datos de tasas de emisión en las que se especifique tipo de operación, características del material, tipo de condiciones meteorológica, etc y disponer así de una primera estimación de tasas de emisión que se irá afinando con la acumulación de información. Sería un proceso iterativo que permitiría introducir en el procedimiento de recálculo, como tasas iniciales supuestas, valores cada vez más próximos a la realidad.

Comprobación y validación del sistema informático

La comprobación y validación del sistema informático será posterior a su implantación en cada puerto. Se realizará mediante simulaciones específicas. Además, se elaborarán informes, se impartirán cursos de formación a los técnicos de cada puerto sobre el sistema informático desarrollado e implantado, y desarrollará un plan de difusión de los resultados alcanzados.

Esta labor será la última a realizar por nuestro grupo y no podrá hacerse hasta que esté el sistema instalado en al menos un puerto.

CONCLUSIONES

De lo expuesto en este informe, podemos decir que los trabajos encargados a nuestro grupo en este proyecto están muy avanzados. Las principales conclusiones serían las siguientes:

1. El diseño conceptual del sistema informático está realizado.
2. Se han propuesto ubicaciones para la instalación de estaciones meteorológicas y de medida de la contaminación en los puertos.
3. Se ha desarrollado el modelo de dispersión de partículas atmosféricas PORTPUFF y se han realizado las adaptaciones pertinentes para usar las salidas del sistema de modelización meteorológica ARPS+ARPSINTPR de la Universidad de Santiago de Compostela. Se han realizado simulaciones de prueba con algunos días de Abril de 2003 para el entorno del Puerto de A Coruña obteniéndose buenos resultados. Estas pruebas continuarán con más días seleccionados del año 2003. Un fichero ejecutable de PORTPUFF y una muestra de los datos de entrada y salida junto con un informe explicativo han sido enviados a Soltek Consulting, que es la empresa encargada del desarrollo informático de sistema de control y predicción de la contaminación. El acoplamiento PORTPUFF+CALMET está resuelto, pero se está a la espera de recibir datos de ejecuciones de los modelos meteorológicos MASS (puertos mediterráneos) y HIRLAM (puertos de Huelva, Santander y Bilbao) para proceder a la adaptación del modelo de downscaling meteorológico CALMET. Ha habido contactos con la Universidad de Barcelona (modelo MASS) y con el INM (modelo HIRLAM).
4. Se está a la espera de recopilar todos los datos adicionales que precisan los modelos, mientras se está trabajando con la ya recibida y la que ya teníamos disponible en nuestro grupo.
5. Se ha desarrollado y validado el módulo SEDPORT para el cálculo de depósito de partículas en la superficie por vía seca. Este módulo ha sido implantado dentro de PORTPUFF.
6. Los trabajos para analizar las concentraciones de partículas debidas a fuentes ajenas a los puertos no han podido realizarse todavía, pero se espera su comienzo lo antes posible.
7. Se está trabajando muy intensamente en el desarrollo del modelo de emisiones EMIPORT. Se está haciendo una recopilación de formulaciones existentes en la literatura científico-técnica sobre factores de emisión. Se ha desarrollado una metodología para estimar tasas y factores de emisión mediante un modelo de dispersión a partir de datos tomados de campañas experimentales realizadas al efecto en el Puerto de Tarragona por dos grupos (uno de CIEMAT y otro del CSIC). Además, se ha elaborado un procedimiento de recálculo de emisiones de partículas por comparación entre predicciones del modelo y mediciones en monitores que será aplicable a la operativa normal del sistema informático de control y predicción de la contaminación.
8. La labor de comprobación y validación del sistema informático de control y predicción de la contaminación no se podrá realizar hasta que el sistema no esté implantado en al menos un puerto.

REFERENCIAS

Allwine, K. J., W. F. Dabberdt, and L.L. Simmons, 1998: Peer review of the CALMET/CALPUFF modeling system. KEVIRC Company Inc. Durham, NC. EPA Contract No., 68-D-98-092. Work Assignment No. 1-03. 160 pp.

Bander (1982). *PAVAN: An Atmospheric Dispersion Program for Evaluating Design Basis Accidental Releases of Radiactive Materials from Nuclear Power Stations*. NUREG/ CR-2858 (PNL-4413), U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.

Battaglia, C., 1999: CALPUFF and SAFE_AIR: comparisons and testing against field experiments above hilly terrain. Sixth international conference on harmonization. Abstract Proceedings. Rouen. Francia.

Briggs G.A. (1985). *Analytical parameterizations of diffusion: the convective boundary layer*. J. Clim. and Appl. Meteor., 24, 1167-1186, 1985.

Cagnetti, P., and V. Ferrara, (1980) *A simple formula for estimating airborne concentrations downwind of buildings for discharges near ground level*. Proc. of seminar on radioactive releases and their dispersion in the atmosphere following a hypothetical reactor accident. Riso, Denmark, CEC, V/4111/80.

Carson, D.J., 1973: The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer. Quart. J. R. Meteor. Soc., 99, 450-467.

CIEMAT-CSIC (2003). Caracterización experimental de niveles de concentración en aire de material particulado en el Puerto de Tarragona en diversas actividades de carga descarga y transporte de graneles sólidos. Informe para el Proyecto HADA. LIFE2 ENV/E/000274. Septiembre, 2003.

Crespí S.N., I. Palomino, B. Aceña, F. Martín, A. Guerra, D. Gomis, F. Torres y J. Sáez (2001). Development of a computer system for control and prevention of air pollution in the Valencia Port (Spain). Proceedings of the Seventh International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 365-369.

Douglas, S.G., and R.C. Kessler, 1988: User's guide to the diagnostic wind model (version 1.0). System Applications, Inc. San Rafael, California.

Draxler R.R. (1976). *Determination of atmospheric diffusion parameters*. Atmospheric Environ., 10, 99-105, 1976.

Fowler D. (1986). *The transfer of air pollutants to the ground by wet and dry deposition*. En Regional and Long-range Transport of Air pollution, Ispra, Italia.

Gifford F.A. (1976). *Consequences of effluent release*. Nuclear Safety, Vol 17, No. 1, pags. 68-86.

Hanna S.R., Briggs G.A. and Hosker Jr. R.P. (1982). *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Technical Information Center. U.S. Department of Energy. DOE/TIC-11223 (DE82002045).

Hicks B.B., Baldocchi D.D., Meyers T.P., Hosker Jr R.P. and Matt D.R. (1987). *A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities*. *Water, soil and Air Pollution*, 36, 311-330.

Holtzlag, A. A. M., and A. P. Van Ulden, 1983: A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 22, 517-529.

Irwin J.S. (1983) *Estimating plume dispersion - a comparison of several sigma schemes*. *J. Clim. and Appl. Meteor.*, 22, 92-114, 1983.

Landsberg, H.E., 1981: *The urban heat island*. Academic Press. New York.

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza. (1999). *SICAH: An Automatic System for Control and Prevention of Air Pollution in Huelva (Spain)*. Proceedings of the Sixth International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes.

Martín F., S. N. Crespí and M. Palacios (2001). Simulations of Mesoscale Circulations in the Center of the Iberian Peninsula for Thermal Low Conditions. Part I: Evaluation of the TVM model. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 40, Nº 5, 880-904

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza (2002a). *SICAH: An automatic system for control and prevention of air pollution in Huelva (Spain)*. *International Journal of Environment and Pollution*, 16, 1-6

Martín F., C. González, A. Bailador, E. Sánchez, I. Palomino, M. Palacios, S.N. Crespí and C. Gorostiza (2002b). *SICAH. Sistema Informático para el Control y Prevención de la Contaminación Atmosférica en Huelva. Manuales de Usuario y Teórico, Version 2.0*. Documentos CIEMAT. 323 pp.

Maul, P. R., 1980: Atmospheric transport of sulfur compound pollutants. Central Electricity Generating Bureau MID/SSD/80/0026/R. Nottingham, England.

Oke, T. R., 1978: *Boundary layer climates*. John Wiley & Sons. New York. 372 pp.

Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 108, 1-24.

Palomino I. y F. Martín (2001). Estudio de la dispersion de contaminantes emitidos desde una cementera en escenarios concretos. CIEMAT/DIAE/552/21310/03/01.

Ramsdell et al. (1982). *Turbulent Diffusion Coefficients Within and Above the Urban Domain*, final report to the U.S. Army Atmospheric Sciences Laboratory under Battelle, Pacific Northwest Laboratory contract 23111 05480, 95p.

Ramsdell et al. (1983). MESOI Version 2.0: An Interactive Mesoscale Lagrangian Puff Dispersion Model with Deposition and Decay. NUREG/CR-3344. PNL-4753. Pacific Northwest Laboratory. Richland. USA.

Ramsdell Jr. J.V. and K.W. Burk, (1991). *MESOILT2, A Lagrangian Trajectory Climatological Dispersion Model*. Hanford Environmental Dose Reconstruction Project. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington 99352.

Scire, J. S., E. M. Insley, and R. J. Yamartino, 1990: Model formulation and user's guide for the CALMET meteorological model. Report No. A025-1. California Air Resources Board. California.

Scire J., Robe F.R., Fernau M.E. and Yamartino R. (1999). A user's guide for the CALMET meteorological model (version 5.0). Earth Tech. Inc. MA.

Start G.E. y Wendell L.L. (1974). *Regional Effluent Dispersion Calculations Considering Spatial and Meteorological Variations*. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-44, 63 p.

Thunis, P., and A. Clappier, (2000) Formulation and evaluation of a nonhydrostatic mesoscale vorticity model (TVM), *Mon. Wea. Rev.*, 128, N°9, 3236-3251

Zhang L., Gong S., Padro J. and Barrie L. (2001). A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment* 35, 549-560.