

Modelos para toma de decisiones en el litoral andaluz

R. Perriñez y A. Pascual-Granged

Departamento de Física Aplicada 1, EUITA, Universidad de Sevilla

RESUMEN

Se han desarrollado tres modelos de dispersión de respuesta rápida que cubren el litoral andaluz en su totalidad para su uso en caso de emergencia tras un vertido radiactivo. Estos modelos pueden ayudar en el proceso de toma de decisiones tras un hipotético accidente en estas aguas. Esencialmente los modelos consisten en un modelo hidrodinámico que proporciona las corrientes en cada punto e instante de tiempo y el modelo de dispersión propiamente dicho, que se basa en técnicas lagrangianas. En este trabajo damos una breve descripción de los modelos y algunos ejemplos de resultados.

ABSTRACT

Three rapid response dispersion models for the shores of Andalusia have been developed. These models have been designed to support the decision making process after a radioactive spill in these waters. Essentially, models are based upon a hydrodynamic model which provides the water currents at each position and time and the dispersion model, which makes use of lagrangian, or particle-tracking, techniques. A brief description of the models and some examples of applications are given in this paper.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años se ha ido progresivamente extendiendo el desarrollo y uso de modelos numéricos como herramienta de gestión de vertidos accidentales de radionúclidos en aguas costeras [1-3]. Estos modelos proporcionan información sobre la dispersión de los radionúclidos inducida por mareas, vientos y corrientes y constituyen una ayuda al proceso de toma de decisiones tras el accidente pues permiten estimar si, por ejemplo, el vertido alcanzará una determinada localidad costera y cuál será la concentración del radionúclido en cuestión en el agua. Un requisito fundamental de estos modelos es que deben proporcionar una respuesta rápida (típicamente en unos segundos). Además, deben ser fáciles de usar para alguien no experto en cálculo numérico.

El estrecho de Gibraltar es la única conexión entre el Atlántico y el Mediterráneo y, en consecuencia, sopor-

ta un intenso tráfico marítimo. Más de 70000 barcos mercantes navegan a lo largo de él anualmente, con el 30 % de ellos declarando mercancías peligrosas, y se producen en torno a 12000 travesías anuales entre las costas norte y sur [1]. Debemos mencionar también el tránsito de submarinos nucleares. El intenso tráfico y las frecuentes condiciones meteorológicas adversas (fuertes vientos y un 54 % de días con visibilidad reducida o pobre) aumentan las probabilidades de un accidente, como de hecho se han producido ya [1]. Las aguas del golfo de Cádiz y del mar de Alborán, que también son pasos obligados, son por tanto igualmente susceptibles de verse afectadas por un vertido radiactivo.

En la Universidad de Sevilla se ha venido trabajando en el desarrollo de modelos de respuesta rápida que cubren el litoral andaluz en su totalidad para su uso en situación de emergencia. Se trata de los modelos GISPART, ALBPART y CADPART (para el estre-

cho de Gibraltar, el mar de Alborán y el Golfo de Cádiz respectivamente), cuyas extensiones geográficas pueden verse en la figura 1. Los modelos CADPART y ALBPART cubren la totalidad del litoral andaluz, incluyendo ALBPART el estrecho de Gibraltar. No obstante, ya que la zona del estrecho es la más potencialmente expuesta a un accidente y debido a su interés económico y ecológico, se ha decidido estudiarla en más detalle. Así el modelo GISPART cubre únicamente el estrecho de Gibraltar con una resolución espacial más elevada que la de los modelos CADPART y ALBPART. El objetivo de este trabajo es proporcionar una descripción general de los modelos y algunos ejemplos de su funcionamiento.

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

Los tres modelos poseen básicamente la misma estructura. Se trata de modelos lagrangianos en los que el vertido radiactivo se describe mediante un



número discreto de partículas, cada una de ellas equivalente a un número determinado de unidades (por ejemplo Bq). La trayectoria de cada partícula es determinada a lo largo del tiempo, siendo la difusión turbulenta y el decaimiento radioactivo calculados mediante técnicas de montecarlo. Al final de la simulación, la densidad de partículas por unidad de volumen permite calcular la concentración del radionúclido. Los detalles de las técnicas matemáticas pueden consultarse en otros trabajos [4]. Cada modelo de dispersión lleva asociado un modelo hidrodinámico que proporciona las corrientes inducidas por las mareas y las corrientes residuales (circulación media o geostrofica). Estos modelos hidrodinámicos se ejecutan a priori y la información por ellos generada se almacena en ficheros que son después leídos por los programas de dispersión, lo que permite un cálculo extremadamente rápido de la corriente en cualquier punto del dominio y en cualquier instante de tiempo. Los modelos hidrodinámicos se someten a un cuidadoso proceso de calibración y validación, comparando las corrientes y mareas por ellos calculadas con medidas. Una vez que la respuesta de ellos se considera adecuada, se generan los ficheros necesarios para los modelos de dispersión y no es necesario volver a correr los modelos hidrodinámicos. La estructura de cada modelo hidrodinámico viene determinada por la propia oceanografía de cada zona y la comentaremos con un poco de más detalle posteriormente.

Los modelos hidrodinámicos se resuelven empleando esquemas de diferencias finitas con condiciones de contorno adecuadas [4]. Para resolver las mareas las condiciones de contorno consisten en especificar la amplitud y fase de las mareas, a partir de observaciones, a lo largo de las

fronteras abiertas. Una vez que se obtiene una solución periódica estable se emplea una técnica estándar de análisis de mareas [5]. Esta consiste en determinar la amplitud y fase de la marea en cada punto del dominio (constantes de marea). Estas constantes son después leídas por el programa de dispersión

para un rápido cálculo de la corriente en cualquier instante de tiempo. Se han incluido las dos mareas principales en todos los modelos: la lunar y la solar semidiurnas, denominadas M2 y S2 respectivamente. Para obtener la circulación residual especificamos bien la elevación promedio de la superficie del agua a lo largo de las fronteras abiertas, bien el flujo de agua que entra o sale por ellas. La corriente total en cada punto es la suma de la corriente de marea en el instante considerado más la corriente geostrofica, que es constante.

Se pueden simular descargas instantáneas y continuas de radioactividad. Hay que remarcar que el modelo de dispersión es tridimensional, mientras que la hidrodinámica proporciona corrientes promediadas en la vertical. Por este motivo, a partir de dicha corriente promediada se genera un perfil vertical de velocidad [1,4,5].

Los efectos del viento se incorporan como es típico en modelos de respuesta rápida, asumiendo que la superficie del agua se desplaza en la dirección

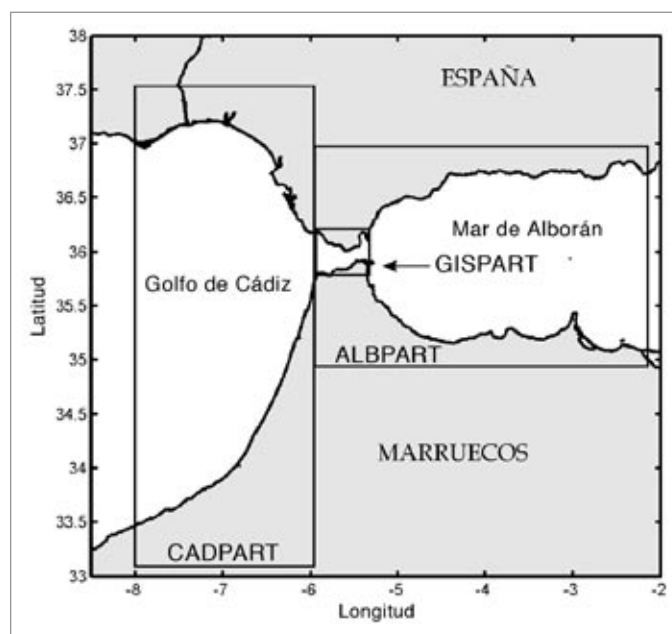


Figura 1: Dominio espacial de los tres modelos.

del viento a una velocidad del 3 % de la velocidad del viento medida a 10 m sobre el nivel del mar [4,5]. Esta velocidad disminuye con la profundidad siguiendo un perfil logarítmico hasta una profundidad de unos 20 m, por debajo de la cual los efectos del viento son inapreciables [4,5].

GISPART

Este modelo cubre únicamente el estrecho de Gibraltar, resolviéndose la hidrodinámica con una resolución espacial de 1000 m. Es bien sabido [6,7] que las mareas en el estrecho pueden, en muy buena aproximación, considerarse como barotrópicas. Ello quiere decir que las diferencias espaciales en la densidad del agua pueden despreciarse y es una aproximación razonable resolver las mareas mediante un modelo 2D promediado en la dirección vertical.

CADPART

En el Golfo de Cádiz usamos la misma aproximación que en el estrecho

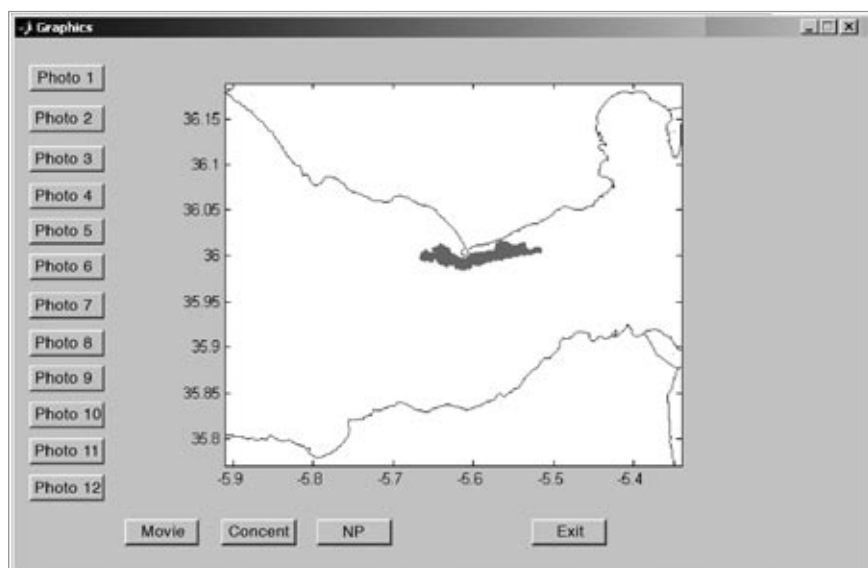


Figura 2: Interfaz gráfico de salida de resultados del modelo GISPART.

de Gibraltar: un modelo 2D integrado en la vertical para resolver las mareas y la corriente residual. En este caso la resolución espacial es de 2 minutos (unos 3 km aproximadamente a esta latitud).

ALBPART

De nuevo empleamos un modelo 2D para resolver las mareas. No obstante, la circulación geostrofica en el mar de Alborán es notablemente compleja, siendo el giro del oeste su característica más singular. En efecto, el agua entra en el mar de Alborán desde el Atlántico en una capa superficial de unos

150 m de espesor. Este flujo forma el denominado jet atlántico [8], que penetra en el mar de Alborán en una dirección noreste siguiendo la costa española. Posteriormente el jet se curva hacia el sur a unos -3.5° de longitud y una parte de él gira aún más hacia el oeste completándose un giro anticiclónico conocido como WAG (Western Alborán Gyre), una estructura casi permanente en el mar de Alborán. Esta circulación es inducida por procesos baroclinicos (diferencias de densidad entre el agua atlántica y el agua mediterránea, más densa, que fluye hacia el Atlántico por debajo de la capa superficial de agua atlántica). Más

detalles sobre la oceanografía física de la zona pueden verse en trabajos especializados [8,9]. Para resolverla empleamos el modelo hidrodinámico más sencillo capaz de reproducir la circulación en la capa superficial, que es el modelo de gravedad reducida [10]. Esencialmente se trata de un modelo bicapa en el que la capa inferior se considera infinitamente profunda y en reposo. De este modo la interfase entre ambas capas de agua puede deformarse sin que se produzca ningún movimiento en el agua de la capa inferior. Se han obtenido dos esquemas de circulación con este modelo: el que muestra el WAG y el conocido como modo costero, que a veces se da en invierno y se caracteriza por la desaparición del giro [9]. En este caso el agua atlántica fluye hacia el este a lo largo de la costa de Marruecos. El modo costero se obtiene reduciendo el flujo de agua atlántica. La resolución espacial del modelo es, igual que CADPART, de dos minutos en longitud y latitud.

Es preciso comentar que, debido a la hidrodinámica usada en los modelos, por el momento sólo pueden simularse vertidos que ocurran en la superficie, permaneciendo por tanto en la capa superficial de agua atlántica (no podemos calcular el flujo de agua mediterránea que se dirige en profundidad hacia el oeste), si bien en el futuro pretendemos ampliar los modelos para obtener una hidrodinámica totalmente tridimensional. Excepto en las zonas costeras afectadas directamente por las plumas de los principales ríos que descargan a lo largo del litoral andaluz, las concentraciones de partículas en suspensión son muy bajas, por debajo de 1 mg/l [11], por lo que las interacciones de los radionúclidos disueltos con la materia en suspensión se han despreciado.

La información que el usuario debe introducir para ejecutar los modelos

Coordenadas del punto de descarga
Seleccionar entre descarga instantánea o continua
Fichero que contiene los datos sobre los vientos (duración, velocidad, dirección)
Fecha de la descarga
Hora de la descarga (UTC) y duración (si es continua)
Tiempo de simulación
Magnitud de la descarga
Constante de decaimiento radioactivo
Seleccionar WAG o modo costero (sólo ALBPART)

Tabla 1: Información que el usuario de los modelos debe introducir.

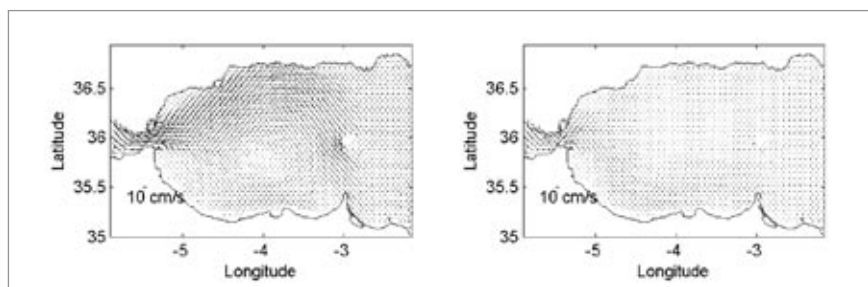


Figura 3: Circulación geostrofica en la capa superficial del mar de Alborán mostrando el WAG (izquierda) y el modo costero (derecha).

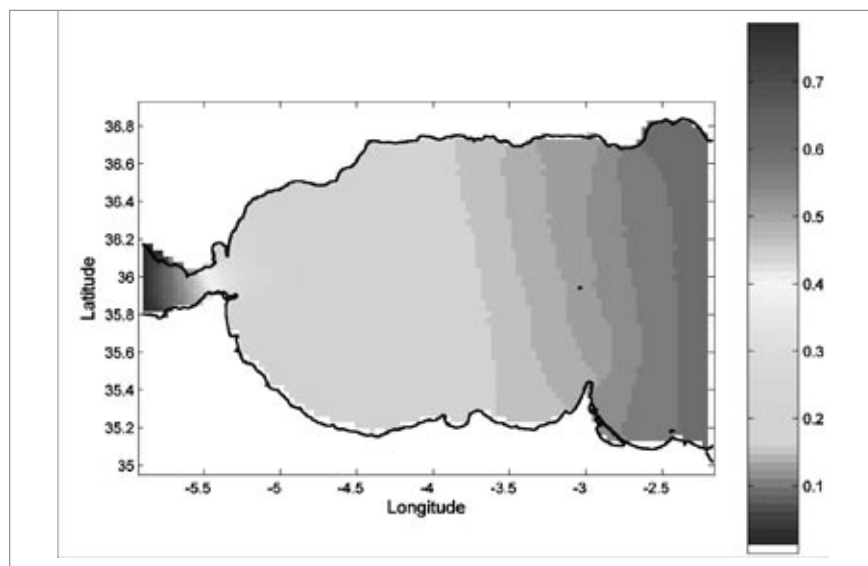


Figura 4: Amplitud (m) de la marea M2 calculada por el modelo hidrodinámico en el mar de Alborán.

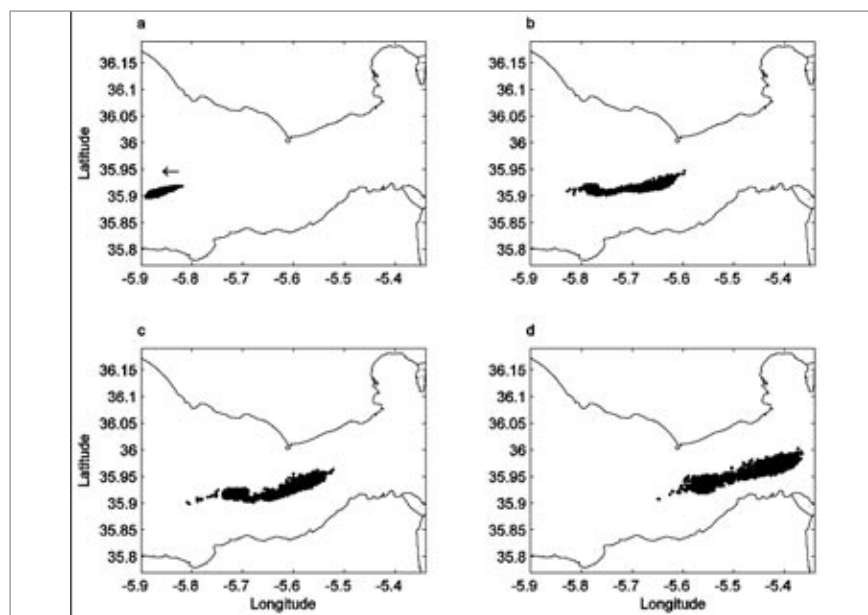


Figura 5: Posición de las partículas 8 (a), 16 (b), 20 (c) y 24 (d) horas tras un vertido instantáneo en el estrecho de Gibraltar en la posición indicada por la flecha. Se considera un viento del este a 15 m/s.

se resume en la Tabla I. En particular, la fecha y hora de la descarga deben introducirse pues la dispersión inicial va a depender del estado de la marea. En ALBPART debemos seleccionar si la circulación residual corresponde a la situación usual (con el WAG) o al modo costero, en el que el giro no está presente. En el caso de GISPART se han creado GUIs (interfaces gráficas de usuario) para introducir las condiciones de la simulación y visualizar los resultados. A modo de ejemplo mostramos en la figura 2 la GUI de salida de resultados. Se obtiene una serie de 12 imágenes mostrando la mancha de contaminación en instantes equiespaciados a lo largo de la simulación. Ellas pueden verse individualmente o a modo de película, así como un mapa de concentraciones en el instante deseado. Opcionalmente, se puede obtener la evolución temporal de la concentración del radionúclido en un punto de interés. Ello permite determinar si la contaminación alcanzará una localidad costera, por ejemplo, cuándo llegará y cuál será la máxima concentración esperable. Los resultados generados son los mismos para los tres modelos. El tiempo de ejecución de los programas de dispersión es de 5.4 s por cada día de simulación en un Pentium 4 a 3.2 GHz y con 512 MB de memoria RAM.

RESULTADOS

A modo de ejemplo podemos ver en la figura 3 la circulación promedio en la capa superficial del mar de Alborán obtenida con el modelo de gravedad reducida. Se muestran los dos modos de circulación: aquél en el que aparece el giro del mar de Alborán y el modo costero. La amplitud de la marea en el mar de Alborán se muestra en la figura 4 para la componente M2 (marea lunar principal). Puede apreciarse

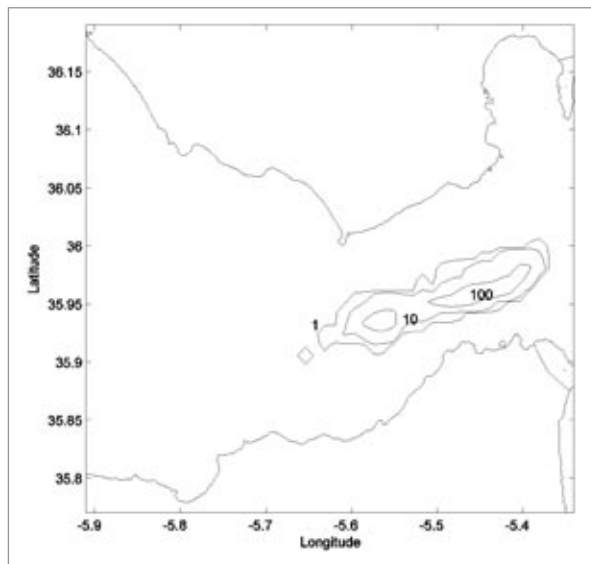


Figura 6: Actividad específica en agua (Bq/m^3) para el vertido de la figura 5 24 horas tras el mismo.

que la amplitud de la marea decrece rápidamente en el estrecho de Gibraltar, desde unos 80 cm en su entrada atlántica hasta unos 30 cm en la conexión con el Mediterráneo. En el mar de Alborán la marea sufre una reducción aún mayor, siendo la amplitud inferior a 10 cm a la longitud de Almería. Gráficos similares pueden obtenerse para el golfo de Cádiz y el estrecho de Gibraltar (con mayor resolución en este caso) a partir de los correspondientes modelos hidrodinámicos. Como hemos comentado, los resultados de los tres modelos hidrodinámicos se han validado mediante cuidadosas comparaciones con medidas de mareas y corrientes.

Afortunadamente, no se ha producido ningún vertido radioactivo de forma que podamos comparar los resultados de los modelos de dispersión con medidas de concentraciones de radionúclidos en las aguas andaluzas. Por ello mostramos algunos ejemplos de resultados de los modelos de dispersión aplicados a vertidos hipotéticos, simplemente para ilustrar su funcionamiento.

En la figura 5 podemos ver un ejemplo de vertido en el estrecho de Gibraltar. Las imágenes nos muestran la mancha radioactiva (posición de las

partículas) en cuatro momentos tras el accidente. Aunque hay un desplazamiento de la mancha hacia el este (en parte contrarrestado por el viento que se ha considerado que sopla desde esta dirección) debido a la circulación residual en la zona, la mancha oscila en la dirección este-oeste debido a la acción de las mareas. La concentración del radionúclido en agua 24 horas después del vertido puede

verse en la figura 6.

La figura 7 nos permite evaluar el funcionamiento de los modelos cuando se simula una descarga continua. En este ejemplo el accidente ocurre frente al puerto de Gibraltar y analizamos su efecto en el mar de Alborán. El vertido duró 5 días y se simuló su dispersión durante un mes. Debido a la naturaleza continua del vertido se obtiene una pluma muy alargada que se extiende a lo largo de la costa española, contaminada en su práctica totalidad, impulsada por el jet atlántico. Otros experimentos han mostrado que si el accidente sucede en la zona central del mar de Alborán, la mancha de contaminantes es retenida en el giro (si está presente) siendo muy lento el proceso de dilución de concentraciones. El tiempo típico para completar una rotación completa en el giro es del orden de 60 días.

Finalmente, en la figura 8 mostramos un ejemplo de resultados obtenido con CADPART. Suponemos que se produce un vertido accidental en la entrada de la ría de Huelva, y obtenemos la evolución temporal de la actividad específica que se alcanza en la entrada de la bahía de Cádiz, suponiendo que no sopla viento. La circulación promedio es anticiclónica

en el golfo de Cádiz [12], existiendo una corriente que circula hacia el estrecho de Gibraltar a lo largo de la costa española, por lo que efectivamente es esperable que parte de la contaminación alcance la bahía de Cádiz. Una parte de esa corriente penetra en el Mediterráneo y la restante se desplaza hacia el sur a lo largo de la costa de Marruecos, incorporándose a la corriente de Canarias. La magnitud del vertido (instantáneo) se ha fijado arbitrariamente como 1 TBq de un radionúclido de vida larga. Podemos ver en la figura 8 que la concentración máxima que se alcanza es de unos 210 Bq/m^3 , que la mancha de contaminación comienza a llegar unas 400 horas tras el accidente (17 días) y que el tiempo necesario para que sobrepase la zona es de unos 6 días. Por supuesto, estos tiempos se verán, en la práctica, muy afectados por las condiciones meteorológicas existentes en la zona tras el accidente.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo describimos muy brevemente, y damos algunos ejemplos de resultados, de un conjunto de modelos que se han desarrollado para ayudar en el proceso de toma de decisiones tras un vertido radioactivo en aguas del litoral andaluz. Los modelos cubren el litoral completo, desde Huelva hasta Almería, con una mayor resolución espacial en el estrecho de Gibraltar. Los modelos de dispersión se basan en técnicas lagrangianas, empleándose modelos hidrodinámicos que se ejecutan a priori (off-line) para obtener las corrientes necesarias para calcular el transporte. Esto se hace así pues es necesario dar una respuesta muy rápida si realmente se quiere ayudar en el proceso de toma de decisiones tras un accidente.

Un problema esencial cuando se trabaja con modelos es estimar la incertidumbre de sus predicciones. La interpolación de corrientes desde la malla en diferencias

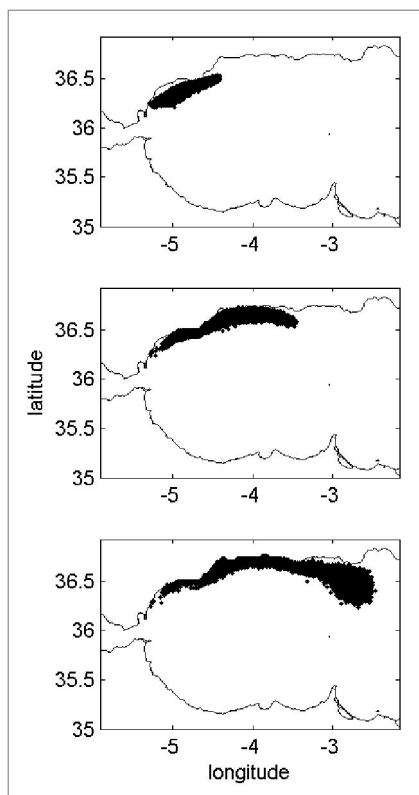


Figura 7: Posición de las partículas 7.5, 15 y 30 días (de arriba hacia abajo) tras un vertido continuo ocurriendo frente al puerto de Gibraltar.

finitas de los modelos hidrodinámicos realizada por los modelos de dispersión, así como el esquema en primer orden de aproximación que estos usan para calcular la advección de partículas, son fuentes de error. No obstante, en problemas de dispersión oceánicos estos errores son enmascarados por los efectos de la turbulencia. Por otra parte, aunque los resultados de los modelos hidrodinámicos se han comparado cuidadosamente con medidas experimentales, la calidad de la solución en todo el dominio no puede garantizarse. Finalmente, es necesario disponer de predicciones meteorológicas de calidad (velocidad y dirección del viento) sobre la escala de tiempo tras el accidente en la que se quiere realizar el cálculo. Como es bien sabido, la fiabilidad de una predicción meteorológica disminuye rápidamente conforme ampliamos su horizonte. A pesar de estos problemas, los modelos

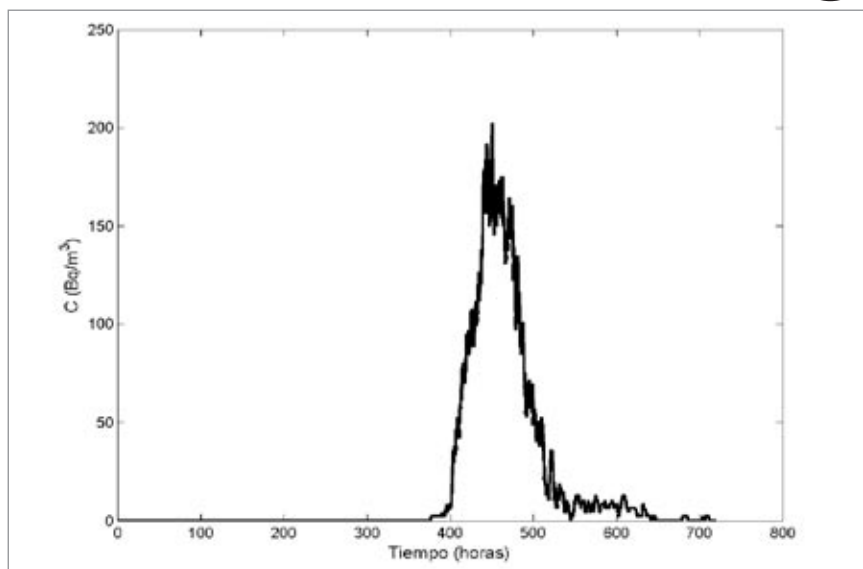


Figura 8: Evolución temporal de la actividad específica en la entrada de la bahía de Cádiz como consecuencia de un hipotético accidente en la entrada de la ría de Huelva.

de dispersión se han revelado como herramientas útiles para la gestión de accidentes. Por ejemplo, podemos realizar predicciones sobre el tiempo de llegada de una mancha de contaminación a una zona sensible bajo hipótesis más o menos conservativas, y se puede hacer de un modo extremadamente rápido.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo parcialmente financiado por el proyecto de excelencia RNM-419: Técnicas Ultrasensibles para la Determinación de Radionúclidos en Muestras Ambientales, Junta de Andalucía. Raúl Periañez agradece al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión de una ayuda dentro del Programa Nacional de Movilidad del Profesorado Universitario para permanecer durante tres meses en la Universidad de Gales, donde parte de este trabajo fue realizado.

REFERENCIAS

[1] Periañez R. A particle-tracking model for simulating pollutant dispersion in the Strait of Gibraltar. *Mar Pol Bull* 49: 613-23; 2004.
[2] Gómez-Gesteira M., Montero P., Prego R., Taboada J.J., Leitao P., Ruíz-Villareal M., Neves R., Pérez-Villar V. A two dimensional particle-tracking model for pollution dispersion in A

Coruña and Vigo rías (NW Spain). *Oceanol Acta* 22: 167-77; 1999.

[3] Elliott A., Wilkins B.T., Mansfield P. On the disposal of contaminated milk in coastal waters. *Mar Pol Bull* 42: 927-34; 2001.

[4] Periañez R. Modelling the Dispersion of Radionuclides in the Marine Environment. Springer-Verlag, Heidelberg; 2005.

[5] Pugh D.T. Tides, Surges and Mean Sea Level. Wiley, Chichester; 1987.

[6] Tejedor L., Izquierdo A., Kagan B.A., Sein D.V. Simulation of the semidiurnal tides in the Strait of Gibraltar. *J Geophys Res* 104: 13541-57; 1999.

[7] Tsimplis M.N., Bryden H.L. Estimations of the transports through the Strait of Gibraltar. *Deep Sea Res* 47: 2219-42; 2002.

[8] Perkins H., Kinder T., La Violette P. The Atlantic inflow in the western Alborán Sea. *J Phys Oceanog* 20: 242-63; 1990.

[9] Vargas-Yáñez M., Plaza F., García-La-fuente J., Sarhan T., Vargas J.M., Vélez-Belchí P. About the seasonal variability of the Alborán Sea circulation. *J Mar Syst* 35: 229-48; 2002.

[10] Werner F.E., Cantos-Figueroa A., Parrilla G. A sensitivity study of reduced gravity flows with applications to the Alborán Sea. *J Phys Oceanog* 18: 373-83; 1988.

[11] León-Vintró L., Mitchell P.I., Condren O.M., Doves A.B., Papucci C., Delfanti R. Vertical and horizontal fluxes of plutonium and americium in the western Mediterranean and the Strait of Gibraltar. *Sci Tot Environ* 237: 77-91; 1999.

[12] García-Lafuente J., Delgado J., Criado-Aldeanueva F., Bruno M., del Río J., Vargas J.M. Water mass circulation on the continental shelf of the Gulf of Cádiz. *Deep Sea Res II*: 53: 1182-97; 2006.