

Predicción estadística de trayectorias de DERRAMES DE HIDROCARBUROS *y su aplicación en la lucha contra la contaminación*



En este proyecto de investigación se ha desarrollado una metodología basada en métodos estadísticos para predecir a medio-largo plazo (15 días-1 mes) la evolución de un derrame de hidrocarburos en el medio marino. Para ello se relacionan condiciones océano-meteorológicas actuales con bases de datos de reanálisis o históricas (presión atmosférica, viento y corrientes) con el objetivo de simular estadísticamente su evolución y con ello predecir la trayectoria del derrame. La metodología desarrollada se ha aplicado en el golfo de Vizcaya y se ha utilizado para simular durante 30 días la evolución de una mancha observada entre Galicia y Asturias, durante el accidente del *Prestige* (noviembre 2002). Los resultados del proyecto muestran la capacidad de la metodología desarrollada y su utilidad para proporcionar información necesaria en la lucha contra la contaminación.

Por **ANA J. ABASCAL SANTILLANA**. Doctora por la Universidad de Cantabria. Investigadora del Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria). **M. CÁRDENAS MILÁN**. Licenciada en Ciencias del Mar. Estudiante de Doctorado de la Universidad de Cantabria. Becaria del Programa de Formación de Personal Investigador (FPI) del Ministerio de Economía y Competitividad. **S. CASTANEDO BÁRCENA**. Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Profesora Titular de la Universidad de Cantabria. **R. MEDINA SANTAMARÍA**. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director General del Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria) y Catedrático de la Universidad de Cantabria.



El trabajo desarrolla una metodología basada en métodos estadísticos para precedir a medio-largo plazo la evolución de un derrame de hidrocarburos en el medio marino

La contaminación por derrames de hidrocarburos es un problema creciente y global que supone la llegada al océano de millones de toneladas de estos productos cada año y representan la contaminación sistemática del litoral. Su origen procede de diversas fuentes de contaminación, como las operaciones de prospección, la carga y descarga de hidrocarburos, los derrames durante su transporte e incluso las descargas intencionadas e ilegales en la limpieza de sentinas de los buques. Para responder con rapidez y éxito a un accidente medioambiental de esas características, es necesario que las personas involucradas en la lucha contra la contaminación dispongan de herramientas, datos y conocimientos del medio que permitan una respuesta adecuada en cada situación. Una de estas herramientas es la predicción de la evolución de un derrame en el medio marino mediante la utilización de modelos numéricos de transporte de hidrocar-



Las consecuencias del accidente del *Prestige*, que causó importantes daños medioambientales en el mar y la costa, son tomadas como modelo para el desarrollo del presente trabajo.

buros (Spaulding *et al.*, 1992⁽¹⁾; Daniel, 1996⁽²⁾; Beegle-Krause, 1999⁽³⁾; Abascal, 2009⁽⁴⁾).

Cuando un hidrocarburo es derramado en el mar, este se mueve principalmente por efecto del viento, el oleaje y las corrientes, siendo estos los fuerza-

mientos océano-meteorológicos que condicionan su transporte o deriva. Actualmente existen sistemas operacionales basados en modelos numéricos que proporcionan predicciones de las condiciones océano-meteorológicas a corto plazo (2-5 días), lo que permite reali-

zar la predicción de la evolución de un vertido como máximo en un periodo de 2 a 5 días. Pero este horizonte de predicción es insuficiente si se produce un derrame de hidrocarburos a kilómetros de la costa y el vertido permanece más de ese periodo a la deriva. En este caso sería muy útil para planificar la respuesta, conocer cómo evolucionará y hacia dónde se dirigirá en un intervalo de tiempo mayor (15 días - 1 mes). Hoy en día, los sistemas operacionales no proporcionan predicciones océano-meteorológicas a esa escala temporal, por lo que no se puede realizar operacionalmente la predicción de deriva de un vertido con ese horizonte temporal.

Con base en esta problemática, en este proyecto de investigación se ha desarrollado una metodología para la predicción estadística de trayectorias de derrames a medio-largo plazo, que permita mejorar los sistemas de prevención y respuesta frente a la contaminación por hidrocarburos. Para ello se combinan diversas técnicas estadísticas como son: las técnicas de clasificación (Méndez *et al.*, 2009⁽⁶⁾; Camus *et al.*, 2010⁽⁶⁾), los métodos de análogos (Lorenz, 1969⁽⁷⁾), los esquemas de «Tipos de tiempo» (*Weather Typing Schemes*) (Ansell *et al.*, 2009⁽⁸⁾) y los procesos estocásticos, concretamente cadenas de Markov de primer orden (Sperandio y Coelho, 2006⁽⁹⁾). Las técnicas investigadas y aplicadas en este trabajo han sido utilizadas en otras disciplinas como meteorología y clima marítimo, pero resultan novedosas en el campo de la oceanografía operacional y predicción del transporte de hidrocarburos.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la metodología desarrollada. En la sección 3 se muestra la aplicación al golfo de Vizcaya. Se presenta la clasificación de patrones de circulación atmosférica y estados de viento en la zona de

estudio. Asimismo, se muestran los resultados obtenidos de la simulación de una de las manchas observadas en el golfo de Vizcaya durante el accidente del *Prestige* y la comparación con avistamientos reales. Finalmente, en la sección 4 se recogen las conclusiones del estudio realizado.

Metodología

El objetivo de la metodología desarrollada es la predicción estadística de trayectorias de derrames a medio-largo plazo. Para ello se relacionan las condiciones océano-meteorológicas actuales

con bases de datos de reanálisis (bases de datos históricas basadas en modelado numérico) de presión atmosférica, viento y corrientes. Estas bases de datos de amplia cobertura espacial y temporal (más de 20 años) se utilizan para estudiar el comportamiento y evolución de los patrones meteorológicos y oceanográficos en el pasado. Una vez conocido el comportamiento en el pasado, esta información es utilizada para predecir cómo evolucionará una situación océano-meteorológica actual a futuro y con ello predecir de forma probabilística la trayectoria del derrame.

La metodología se estructura en las siguientes partes (véase la figura 1):

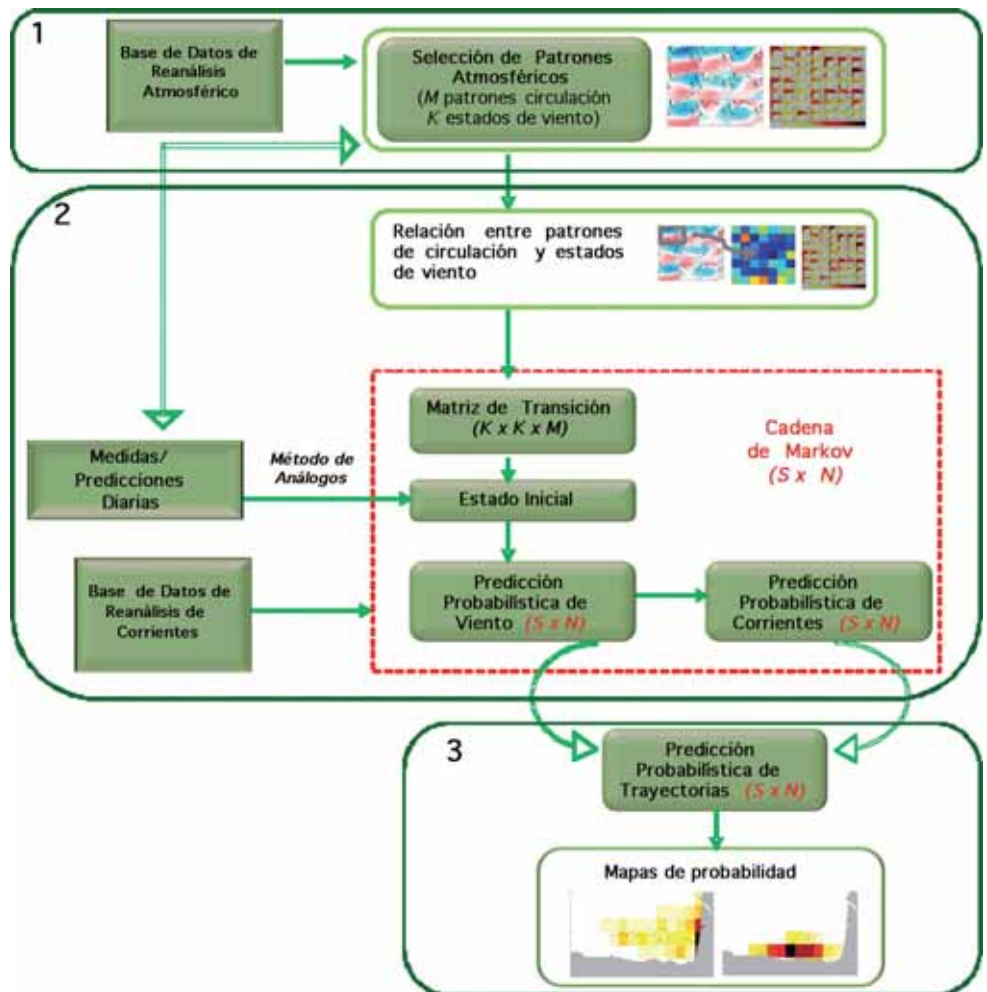


Figura 1. Esquema de la predicción probabilística de la evolución de las trayectorias de un derrame a medio-largo plazo.

Clasificación y selección de patrones atmosféricos

Las bases de datos de reanálisis de presión atmosférica y viento son clasificadas mediante la aplicación de análisis de componentes principales (PCA) y técnicas de clasificación (*K-Medias*)⁽⁶⁾. Como resultado se obtienen M patrones de circulación atmosférica (o tipos de tiempo) y K estados de viento representativos de la base de datos de partida.

Predicción probabilística de la evolución de viento y corrientes mediante cadenas de Markov

- Los resultados de la clasificación se utilizan para determinar los estados de viento asociados a cada patrón de circulación y con ello establecer la relación entre ambas variables. De esta forma se puede conocer el número de eventos que en el pasado han estado asociados a cada estado de viento y patrón de circulación. Es importante destacar que la probabilidad de ocurrencia de cada estado de viento varía en función del patrón de circulación.
- A partir de las bases de datos de presión y viento clasificadas y de la relación obtenida en el paso anterior, se genera la matriz de transición. Esta matriz proporciona para cada paso de tiempo la probabilidad de pasar de un estado de viento ' i ' a un estado de viento ' j ' teniendo en cuenta el patrón de circulación atmosférica del estado inicial. Nótese que la evolución de los estados de viento está condicionada por el patrón de circulación, lo que, como se mostrará posteriormente (véase la sección 3.4.2), será fundamental para calcular la trayectoria del vertido.
- En caso de accidente, se simulará la evolución a medio-largo plazo de las

condiciones océano-meteorológicas actuales mediante la aplicación de cadenas de Markov. El estado inicial de la cadena de Markov se busca mediante técnicas de análogos, que relacionan las condiciones iniciales de presión atmosférica y viento (que pueden ser proporcionadas por predicciones diarias o medidas reales) con el patrón de circulación atmosférica y el estado de viento resultante de la clasificación. Con base en la matriz de transición se realizan N simulaciones de la evolución del campo de viento y corrientes en el periodo de predicción establecido (S días), obteniéndose un conjunto de $N \times S$ simulaciones de viento y corrientes.

Predicción probabilística de la evolución del vertido

A partir de los resultados obtenidos en el paso 2 se simulan N trayectorias de vertidos durante un periodo de S días. Las simulaciones se realizan con el modelo de transporte de hidrocarburos TE-SEO (Abascal *et al.*, 2007). De esta forma, se obtienen $S \times N$ simulaciones de trayectorias equiprobables que son utilizadas para calcular la probabilidad de contaminación originada por el vertido.

En la figura 1 se muestra un esquema general de la metodología desarrollada para obtener la predicción probabilística de la evolución de la trayectoria de un derrame.

Caso de estudio: aplicación de la metodología en el golfo de Vizcaya

La metodología desarrollada se ha aplicado en el golfo de Vizcaya, por lo que podría utilizarse para predecir la trayectoria de un hipotético derrame que se produjera hoy en día en esta zona. Con

el objetivo de comparar los resultados con datos reales, se ha simulado la evolución de una mancha observada entre Galicia y Asturias, durante el accidente del *Prestige*. Para ello, se ha simulado durante 30 días su evolución a partir del día 27/11/2002, fecha del avistamiento (Cedre, 2003⁽¹¹⁾), y se ha calculado la probabilidad de contaminación.

A continuación se describen las bases de datos utilizadas y los resultados obtenidos.

Bases de datos de reanálisis

Para la aplicación de la metodología en el golfo de Vizcaya, se han analizado las bases de datos de forzamientos existentes en la zona y se han seleccionado las más adecuadas: (1) datos de viento del reanálisis SeaWind-EraInterim (Menéndez *et al.*, 2011⁽¹²⁾), que proporciona velocidad y dirección del viento en Europa en el periodo de tiempo comprendido entre 1989 y 2009; (2) base de datos de presión atmosférica a nivel del mar en el periodo 1957-2011 procedentes del reanálisis global NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996⁽¹³⁾) desarrollado por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), y (3) base de datos de corrientes de marea meteorológica (2D) (generadas por gradientes de presión y viento) en el periodo 1989-2009 procedentes del reanálisis GOS (Abascal *et al.*, 2011⁽¹⁴⁾) realizado por IH Cantabria en el sur de Europa.

Clasificación y selección de patrones atmosféricos

El primer paso en la metodología es obtener los patrones de circulación atmosférica y los estados de viento que caracterizan la zona de estudio, el golfo de Vizcaya. Para ello, se clasifican las bases de datos de presión atmosférica (1957-2011) y de viento (1989-2009) mediante la aplicación de análisis de componen-

tes principales (PCA) y técnicas de clasificación (K-Medias).

Para la selección de los patrones de circulación atmosférica, se han considerado las anomalías medias mensuales de la presión a nivel del mar, lo que permite obtener las variaciones interanuales. Con respecto al dominio, se ha seleccionado un área que abarca el noreste atlántico, cubriendo desde la latitud 25° a la 65°N y desde la longitud 52.5°E a la 15°W. El dominio seleccionado abarca la zona de generación de borrascas al sur de Groenlandia, los anticiclones procedentes de las Azores y la oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO), que es el patrón dominante de la variabilidad atmosférica en el Hemisferio Norte, especialmente sobre el sector europeo Atlántico. La NAO consiste en un patrón bipolar de anomalías de presión, con un centro localizado en Islandia y el otro centro de signo opuesto localizado en las Azores. La fase positiva de la NAO se caracteriza por un acentuamiento de las bajas presiones sobre las latitudes altas del Atlántico Norte y de las altas presiones sobre el Atlántico Norte central, el este de EE.UU. y el oeste de Europa. La fase negativa presenta un patrón opuesto de las anomalías de presión.

El resultado de la clasificación proporciona los patrones de circulación atmosférica o tipos de tiempo (WT, del inglés *Weather Type*) estadísticamente más representativos de los datos de partida. En la figura 2 se muestran las nueve situaciones sinópticas obtenidas de la clasificación. Cada uno de los grupos muestra un patrón de anomalías de presión atmosférica (milibares), donde en color azul se representan las anomalías negativas, es decir, aquellas zonas en las que la presión es inferior a la presión media mensual, y en color rojo las anomalías positivas. Se puede observar que los nueve patrones obtenidos son diferentes entre sí. A modo de ejemplo, el

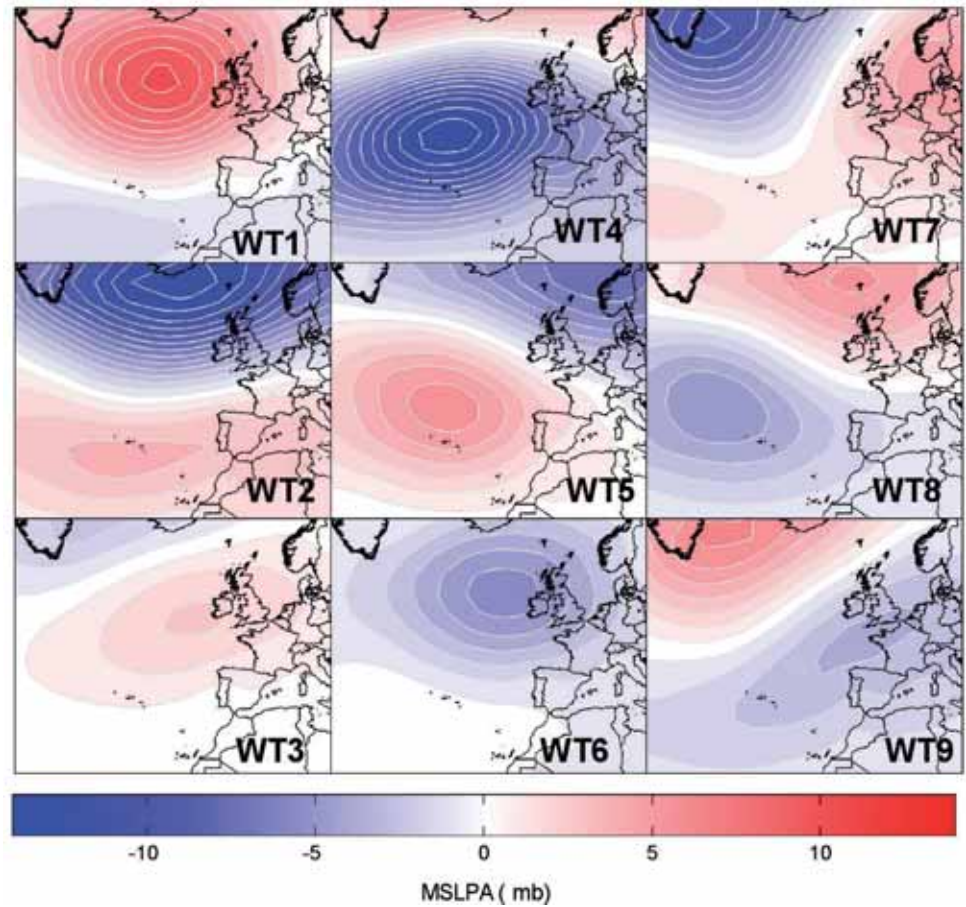


Figura 2. Clasificación de las anomalías medias mensuales de presión (MSLPA) de la base de datos NCEP-NCAR en nueve subconjuntos.

patrón de circulación atmosférica localizado en el centro de la primera columna (WT2) representa una situación sinóptica con una anomalía de presión positiva centrada sobre las islas Azores y una anomalía de presión negativa centrada en el sur de Islandia, que correspondería espacialmente a una situación sinóptica de la fase positiva del índice NAO. Por otro lado, en la esquina superior izquierda (WT1) se observa una situación muy distinta a la descrita anteriormente. Esta situación se encuentra caracterizada por una anomalía positiva centrada en el noroeste de Europa.

Para la selección de los estados de viento se han considerado medias diarias en un dominio que abarca el golfo de Vizcaya, desde 38°N a 49°N en latitud y desde 12.5°W a 1°W en longitud. El resultado de la clasificación de los datos medios diarios de viento son los 49 estados

de viento estadísticamente más representativos de la base de datos de partida. En la figura 3 se muestra el conjunto de los 49 grupos seleccionados. Los vectores indican la dirección del viento y el mapa de colores la intensidad (colores más oscuros representan mayor velocidad del viento). Se aprecia cómo la clasificación realizada recoge diferentes estados de viento que representan la variabilidad de la zona de estudio, tanto en dirección como en intensidad. Por ejemplo, se pueden observar estados de viento de componente suroeste (grupos 1, 2 y 3), vientos de componente oeste (grupo 14) o componente norte (grupo 44). Asimismo, se representan tanto casos extremos, donde el viento puede llegar a alcanzar los 20 m/s, por ejemplo en las posiciones 4 y 44, como periodos de calma, como se observa en las posiciones 18 y 22.

La metodología desarrollada incluye tres partes: clasificación y selección de patrones atmosféricos, predicción probabilística de viento y corrientes mediante cadenas de Markov y predicción probabilística de la evolución del vertido

Predicción probabilística de la evolución del viento y corrientes

Como se ha comentado previamente, se va a simular la evolución de una mancha observada en el golfo de Vizcaya el 27 de noviembre de 2002, durante un periodo de 30 días (27/11/2002 – 25/12/2002). Para ello, partiendo de las condiciones meteorológicas del día inicial, se va a predecir estadísticamente su evolución durante los siguientes 30 días. La predicción se va a realizar con base en las cadenas de Markov y va a estar fundamentada en tres partes: (1) generación de la matriz de transición, (2) selección

del estado inicial y (3) aplicación de las cadenas de Markov.

–Matriz de transición y estado inicial

La matriz de transición se genera a partir de los patrones de circulación atmosférica y estados de viento previamente clasificados. Se obtiene una matriz de $49 \times 49 \times 9$ (49 estados de viento y nueve patrones de circulación). Esta matriz proporciona la probabilidad de pasar del estado de viento 'i' al estado de viento 'j' en cada instante de tiempo, condicionado al patrón de circulación atmosférica del estado inicial.

La cadena de Markov se inicializa con las condiciones atmosféricas (viento y presión) correspondientes al día del avistamiento de la mancha en el golfo de Vizcaya, el 27/11/2002. Para la fecha que se está considerando, el patrón de circulación y estado de viento correspondientes son el patrón 6 (véase el WT6 en la figura 2) y el grupo 2 de la clasificación de estados de viento (véase la figura 3). En la figura 4 se muestra la anomalía de presión del mes de noviembre de 2002 (figura 4a), el patrón de circulación atmosférica inicial (WT6 indicado por un cuadrado verde en la figura 4b) y la matriz de transición entre estados de viento condicionada a este patrón de circulación ($49 \times 49 \times 1$) (panel c). Los colores más oscuros indican mayor probabilidad de tránsito entre estados de viento.

–Cadena de Markov

A partir de este momento comienza la cadena de Markov, que consiste en lanzar N ($N=1000$) simulaciones para calcular la evolución del campo de viento inicial. Cada una de las simulaciones proporciona la evolución del viento diario durante un periodo de 30 días (27/11/2002 – 25/12/2002), por lo que cada simulación consta de 30 ($S=30$) iteraciones. En cada paso de tiempo (o iteración) se calcula una probabilidad de forma aleatoria, y dada esta probabilidad y el estado de viento i en un instante t del proceso, se pasa al estado j en el instante $t+1$ utilizando la probabilidad de paso de un estado a otro proporcionada por la matriz de transición. El resultado del proceso es la predicción probabilística de los campos de viento para cada una de las N simula-

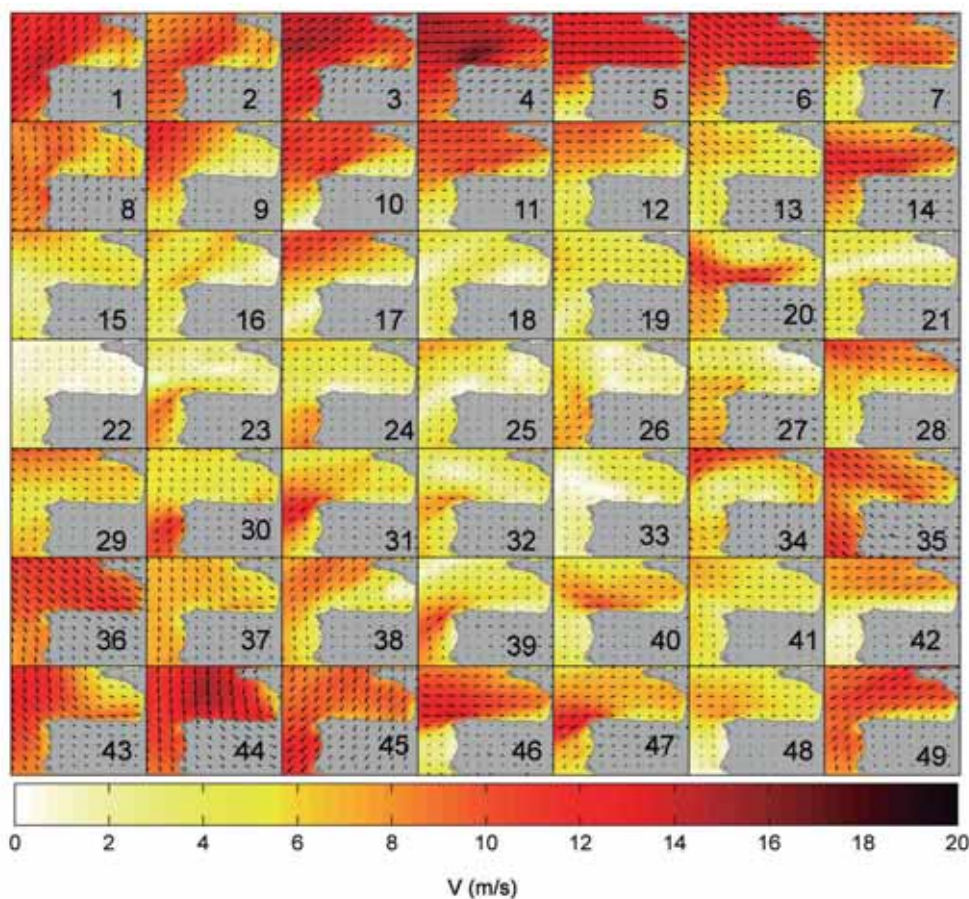


Figura 3. Clasificación de los datos medios diarios de la base de datos de viento SeaWind-Eralinterim (1989-2009) en 49 subconjuntos.

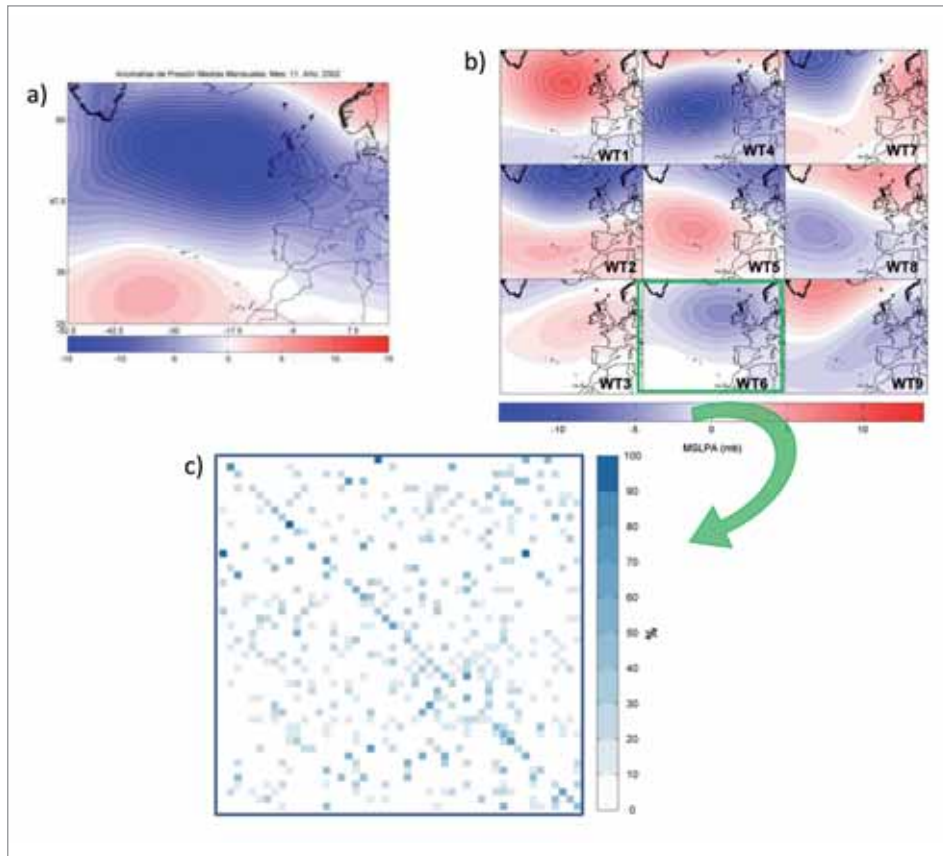


Figura 4. a) Anomalia del campo de presión para el mes de noviembre de 2002, b) patrón de circulación del estado inicial (noviembre de 2002) indicado por el cuadrado verde y c) matriz de transición con las probabilidades de paso de un estado de viento a otro condicionada al patrón de circulación inicial.

ciones. Para ilustrar el proceso, en la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para algunas de las simulaciones de la cadena de Markov. Se puede ver cómo han evolucionado los estados de viento para diferentes simulaciones (simulación 1, 50, 100, 400, N) durante seis días.

Por ejemplo, para la simulación 1 el estado de viento inicial (grupo 2) evolucionó a los grupos 20, 13, 8, 9, 30 y 36 (ver figura 2) durante los seis días siguientes. Esta evolución se corresponde con viento de componente suroeste durante los tres primeros días, que cambia de dirección a componente noroeste a partir del día 4 y vira hacia el este el día 6. Una vez conocida la evolución del viento, se asocian las corrientes medias diarias correspondientes a la misma fecha, obtenidas de la base de datos de corrientes de marea meteorológica GOS.

Predicción probabilística de la trayectoria de del derrame

-Evolución de una mancha durante el periodo del 'Prestige'

Una vez que se han obtenido los campos de viento y de corrientes, se utiliza esta información para simular la trayectoria de una mancha observada en el golfo de Vizcaya (entre Galicia y Asturias) durante 30 días (27/11/2002-25/12/2002). Para ello se utiliza el modelo numérico de transporte de hidro-

carburos TESEO⁽¹⁰⁾, un modelo lagrangiano bidimensional, basado en el modelo desarrollado por la Universidad de Cantabria durante el accidente del *Prestige* (Castanedo *et al.*, 2006⁽¹⁵⁾).

Como resultado se obtiene la evolución de las 1.000 trayectorias equiprobables del derrame para los 30 días de simulación, las cuales son utilizadas para calcular los mapas de probabilidad de contaminación originados por el derrame. Nótese que las simulaciones están forzadas con viento y corrientes de marea meteorológica. A la escala temporal analizada (medias diarias), estas son las dinámicas más relevantes en la trayectoria del vertido. Sin embargo, hay procesos de la circulación general que no se están considerando, cuya importancia será analizada en futuros desarrollos.

La figura 5 muestra la posición final de las mil trayectorias simuladas después de siete (azul) y 30 días (magenta) de predicción. El círculo verde indica el inicio de la simulación. Los resultados muestran que la mayor parte de las simulaciones se dirigen hacia el este, penetrando en el golfo de Vizcaya y alcanzando después de un mes la costa de Francia.

Las N(N=1000) trayectorias simuladas se utilizan para calcular la probabilidad de contaminación originada por el vertido en diferentes instantes temporales. En la figura 6 se muestra el mapa de probabilidad acumulada de contaminación para el día 30 de la simulación. La mayor probabilidad de contaminación se localiza en el golfo de Vizcaya, principalmente en la costa de Asturias y Cantabria. Des-

Tabla 1. Ejemplo de resultados de la cadena de Markov.

	1	50	100	400	N
Día 1	20	43	21	18	21
Día 2	13	47	28	21	36
Día 3	8	8	9	21	28
Día 4	9	13	46	18	28
Día 5	30	20	3	5	48
Día 6	36	36	3	34	33

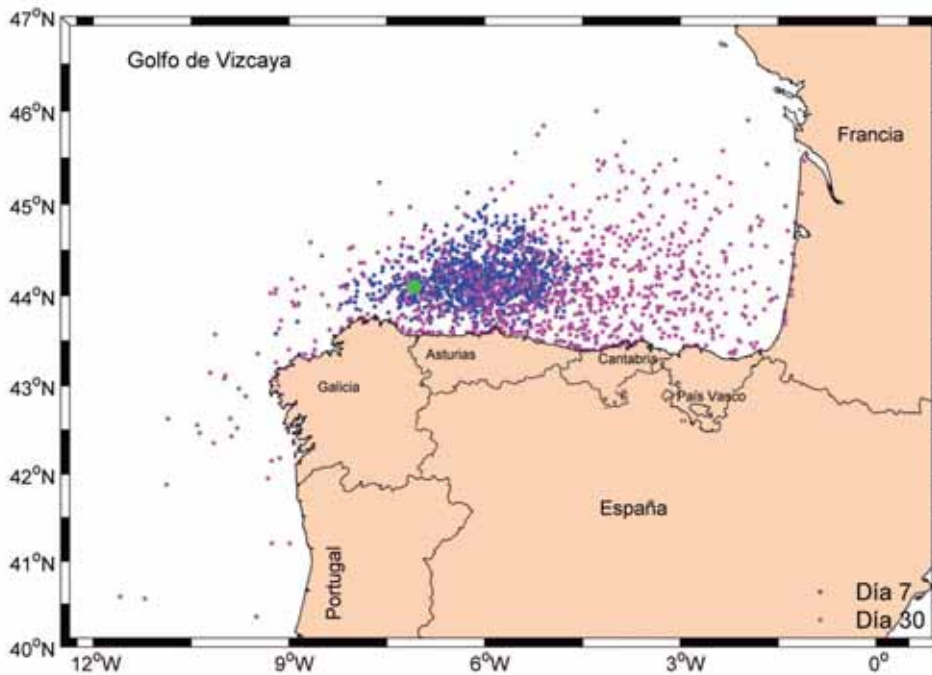


Figura 5. Posición final de las 1.000 trayectorias después de siete (azul) y 30 (magenta) días de simulación. El punto verde indica el punto inicial del derrame.

pués de un mes existe probabilidad de que el vertido alcance la costa de Francia y de que se dirija hacia el suroeste llegando a Galicia y derivando hacia Portugal. La validación de resultados probabilísticos es un proceso complejo, puesto que se necesitaría una gran cantidad de datos reales para poder estimar la probabilidad real de contaminación. Aunque no se dispone de tal cantidad de información, en este trabajo se han utilizado algunas de las observaciones del *Prestige* para comparar los resultados con datos reales (puntos negros en la figura 6). La comparación con los avistamientos de las manchas muestra un comportamiento acorde a la evolución del vertido durante aquel periodo.

-Influencia del patrón de circulación atmosférica en la evolución del vertido

Los patrones de circulación atmosférica proporcionan información sobre el paso de borrascas o anticiclones por la zona de estudio, que pueden afectar a la evolución del viento y del vertido. En es-

te estudio se ha analizado cómo se vería afectada la trayectoria de la mancha observada durante el caso del *Prestige*, si el patrón de circulación inicial hubiera sido diferente. Es decir, dado un estado de viento, ¿evolucionará de forma diferente en función del campo de presión inicial?, ¿afectará esto a la trayectoria del vertido?. Para responder a estas cuestiones se ha repetido la simulación anterior (mismo punto de vertido y periodo de predicción), considerando el mismo estado de viento inicial y variando el patrón de circulación con los resultados de la clasificación (véase la figura 2).

En las figuras 7 y 8 se muestra la posición final de las 1.000 trayectorias simuladas después de 30 días considerando, respectivamente, el patrón 1 y 2 como condición sinóptica inicial (WT1 y WT2 en la figura 2). Se observa que la

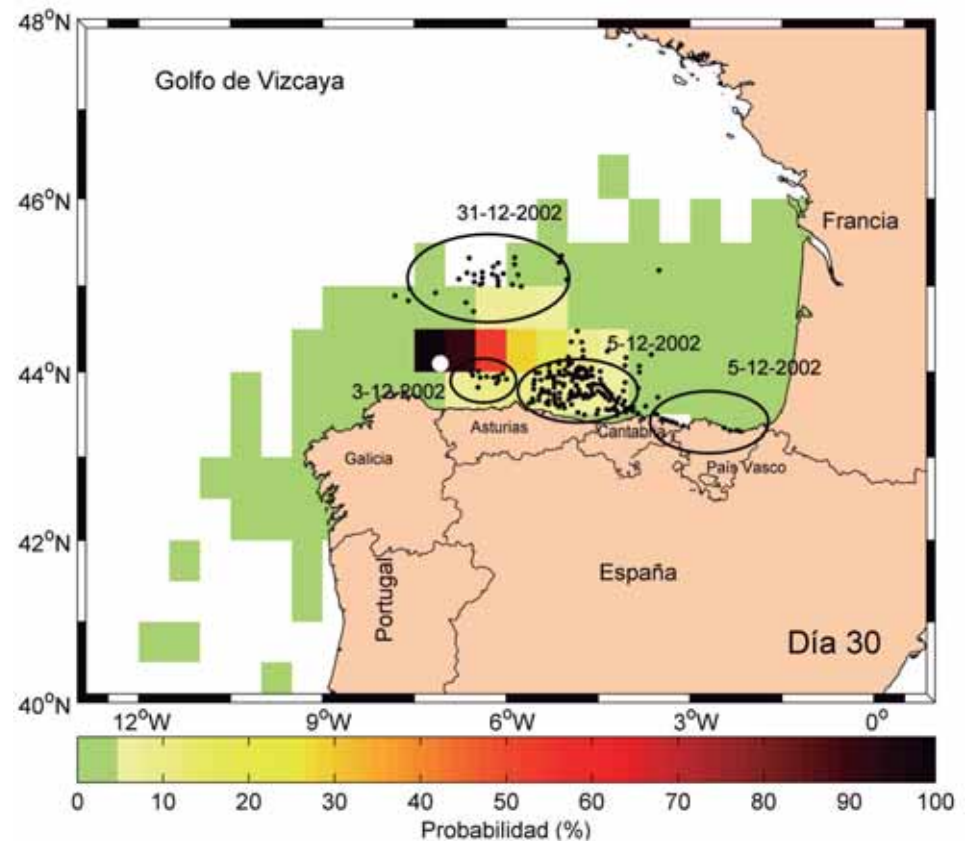


Figura 6. Mapas de probabilidad acumulada de contaminación para el día 30 de simulación. El punto blanco es el punto inicial del derrame numérico y los puntos negros son las observaciones de las manchas.

La metodología desarrollada puede implementarse de forma operacional en los sistemas de predicción de deriva, siendo una innovación y una mejora en los sistemas de prevención y respuesta frente a la contaminación por hidrocarburos en la costa y en el medio marino

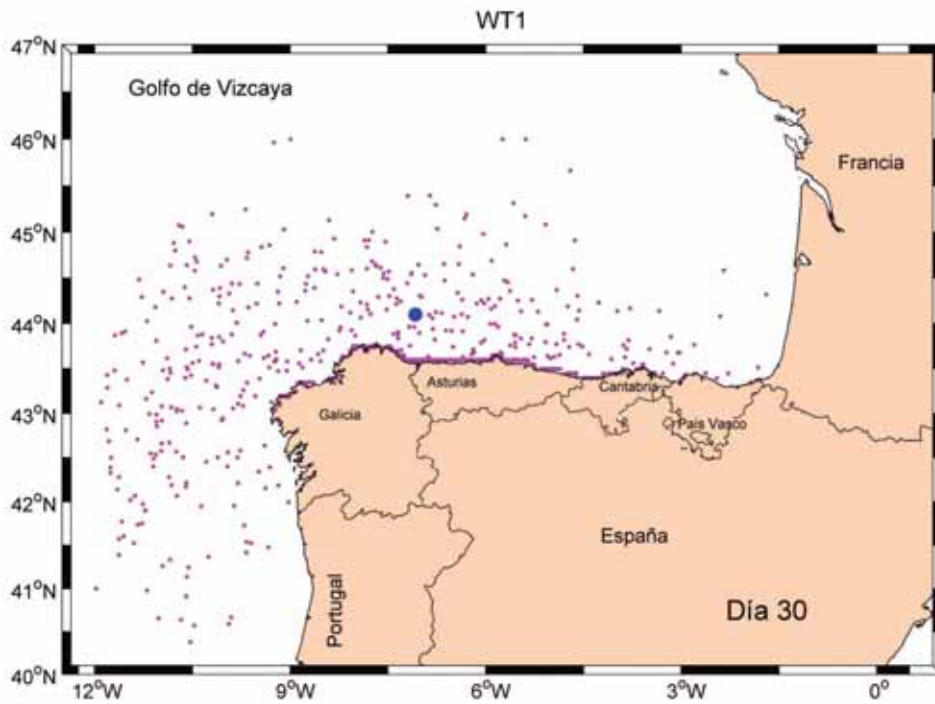


Figura 7. Posición final de las 1.000 trayectorias simuladas (después de 30 días) considerando el patrón de circulación 1 (WT 1).

evolución de las trayectorias, y por lo tanto, las zonas afectadas por la contaminación, varía en función del patrón inicial. Bajo un patrón de circulación atmosférica tipo WT1, que representa una anomalía positiva de presión centrada en el norte de Europa (véase la figura 2), la mayor parte de las trayectorias se dirigen hacia el oeste y suroeste, contaminando las costas de Cantabria, Asturias, Galicia y dirigiéndose hacia Portugal. Por el contrario, bajo un patrón de circulación tipo WT 2, similar a la NAO (véase la figura 2), la mayor parte de las trayectorias penetran en el golfo de Vizcaya afectando principalmente la costa de Francia. Cabe destacar que en este caso la mayor parte de las simulaciones permanecen en el mar después de 30 días. Nótese las diferencias con la evolución del vertido presentada en la sección an-

terior (correspondiente a un WT6), donde la mayor probabilidad de contaminación corresponde al litoral cantábrico, principalmente Asturias y Cantabria (véase la figura 6). Estos resultados muestran la importancia de tener en cuenta el patrón de circulación atmosférica del estado inicial para simular estadísticamente la trayectoria del derrame.

Conclusiones

En este proyecto de investigación se ha desarrollado una metodología basada en métodos estadísticos para predecir a medio-largo plazo la evolución de un derrame de hidrocarburos en el medio marino. La metodología desarrollada permite relacionar las condiciones océano-meteorológicas actuales con ba-

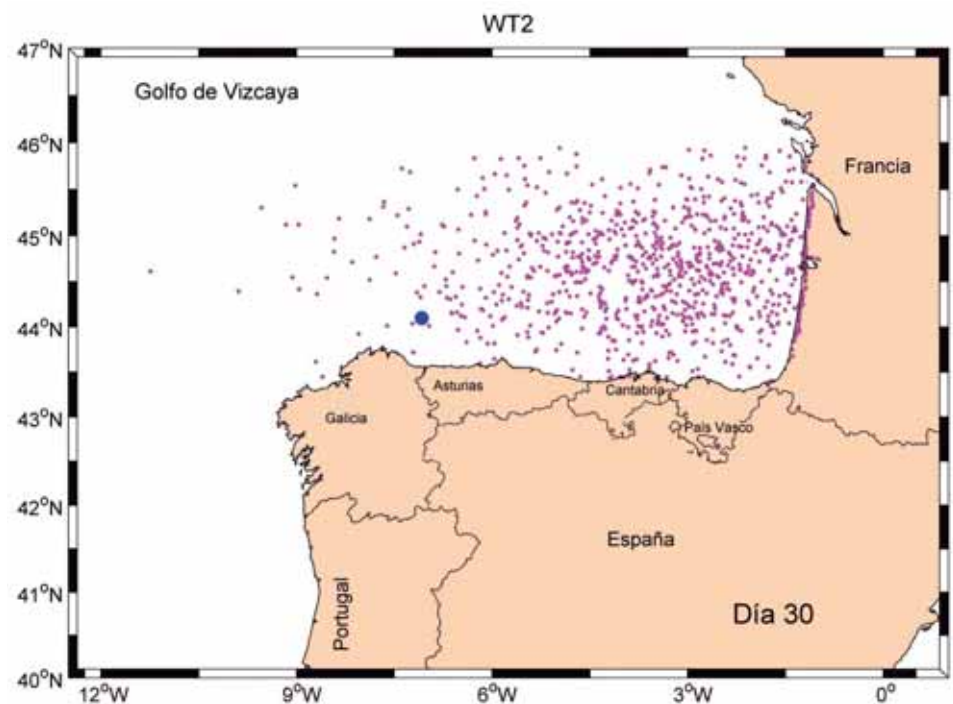


Figura 8. Posición final de las 1.000 trayectorias simuladas (después de 30 días) considerando el patrón de circulación 2 (WT 2).

ses de datos de reanálisis o históricas (presión atmosférica, viento y corrientes) con el objetivo de simular su evolución a medio-largo plazo en términos estadísticos. Una vez conocida la evolución del campo atmosférico y oceanográfico, esta información es utilizada para predecir estadísticamente la trayectoria del derrame.

La metodología desarrollada se estructura en las siguientes partes: (1) Clasificación y selección de patrones atmosféricos, (2) Predicción probabilística de la evolución de viento y corrientes mediante cadenas de Markov y (3) Predicción probabilística de la evolución del vertido. Como resultado se obtiene la probabilidad de contaminación originada por el vertido.

La metodología desarrollada se ha aplicado en el golfo de Vizcaya. Con el objetivo de comparar los resultados con datos reales, se ha simulado durante 30 días la evolución de una mancha observada entre Galicia y Asturias, durante el acci-

dente del *Prestige* (noviembre de 2002). Los resultados obtenidos muestran que la mayor parte de las trayectorias se dirigen hacia el este, penetrando en el golfo de Vizcaya. Las zonas con más probabilidad de contaminación son las costas de Asturias y Cantabria, alcanzando después de un mes la costa de Francia, acorde a la evolución del vertido en aquel período. Por otro lado, se ha estudiado cómo afecta el patrón de circulación atmosférica (relacionado con el paso de borrascas y anticiclones) en la evolución estadística de la trayectoria del vertido, encontrándose que la evolución del vertido y la probabilidad de contaminación depende del patrón de circulación atmosférica inicial.

Los resultados obtenidos muestran la capacidad de la metodología desarrollada y su utilidad para proporcionar información necesaria en la planificación y respuesta ante un derrame de hidrocarburos al medio marino. Una aplicación inmediata es su integración en los

sistemas operacionales de predicción de deriva para dar respuesta en tiempo real. En caso de accidente, el sistema operacional proporcionaría la predicción a corto plazo (2-5 días) basada en las técnicas ya existentes, y la predicción estadística a medio-largo plazo (para los próximos 15 días – 1 mes) con base en la metodología presentada. La incorporación de esta metodología en los sistemas operacionales de predicción supone una innovación y una mejora en la planificación y respuesta frente a la contaminación por hidrocarburos en la costa y en el medio marino.

En futuros desarrollos se analizará la sensibilidad de los resultados al número de patrones de circulación atmosférica y se incluirán las corrientes generales en la metodología. Asimismo, la validación de los resultados se complementará con más avistamientos del periodo *Prestige* y con las trayectorias seguidas por boyas de deriva lanzadas en el golfo de Vizcaya. ♦

PARA SABER MÁS

- [1] Spaulding, M.L.; Howlett, E.; Anderson, E.; Jayk, K. Oilmap: A global approach to spill modeling. 15th Annual Arctic and Marine Oilspill Program, Technical Seminar, Edmonton, Alberta, Canada, 1992.
- [2] Daniel, P. Operational forecasting of oil spill drift at Meteo-France. Spill Science and Technology Bulletin, 1996 (3(1)) 53-64.
- [3] Beegle-Krausse, C.J. Gnome: NOAA's Next-generation spill trajectory model. Ocean's 99 MTA/IEEE, 1999 (3) 1262-1266.
- [4] Abascal, A.J. Avances en el modelado de transporte de hidrocarburos. Aplicación en la respuesta a vertidos marinos accidentales. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, 2009.
- [5] Méndez, F.J.; Camus, P.; Cofiño, A.; Medina, R. Analyzing the multidimensional wave climate with self organizing maps. Ocean's 2009, IEEE, Bremen, 2009.
- [6] Camus, P.; Méndez, F.J.; Medina, R.; Cofiño, A.S. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. Coastal Engineering, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.02.003, 2010.
- [7] Lorenz, E. N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. J. Atmos. Sci., 1969 (26) 636-646.
- [8] Ancell, R.; Bermejo, M.; Oviedo, L. Cambios observados en los tipos de tiempo. AME Boletín, 2009 (25) 32-36.
- [9] Sperandio, M.; Coelho, J. Constructing Markov models for reliability assessment with self-organizing maps. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Sweden, 2006.
- [10] Abascal, A.J.; Castanedo, S.; Gutiérrez, A.D.; Comerma, E.; Medina, R.; Losada, I.J. TESEO, an Operational System for Simulating Oil Spills Trajectories and Fate Processes. ISOPE-2007 (International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference), 2007 (3) 1751-1758.
- [11] Cedre, 2003. http://www.cedre.fr/fr/accident/prestige/carto_nov02.htm (último acceso, marzo 2008).
- [12] Menéndez, M.; Tomás, A.; Camus, P.; García-Díez, M.; Fita, F.; Fernández, J.; Méndez, F.J.; Losada, I.J. A methodology to evaluate regional-scale offshore wind energy resources. Oceans '11, IEEE, Santander, 2011.
- [13] Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. The NCEP/NCAR 40-years reanalysis project, Bulletin of the American Meteorological Society, 1996 (77 (3)) 437-471.
- [14] Abascal, A.J.; Castanedo, S.; Cid, A.; Medina, R. High resolution dynamic downscaling of storm surge in Southern Europe (GOS, Global Ocean Surges). Twelfth Session of the Gloss Group of Experts, Gloss GE XII and associated Workshops, France- November 7-11, 2011.
- [15] Castanedo, S.; Medina R.; Losada, I.J.; Vidal, C.; Méndez, F.J.; Osorio, A.; Juanes, J.A.; Puente, A. The *Prestige* oil spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: Operational forecasting system for quick response, risk assessment and protection of natural resources, J. Coast. Res., 2006 (22 (6)) 1474-1489.