Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE CONTAMINACIÓN POR DERRAMES ACCIDENTALES DE HIDROCARBUROS ORIGINADOS POR EXPLOSIONES PROFUNDAS (BLOWOUT) EN INSTALACIONES OFFSHORE.

APLICACIÓN EN EL MAR DEL NORTE.

Trabajo realizado por:
Andrés Martínez Gómez

Dirigido:
Ana Julia Abascal Santillana
Andrés García Gómez

Titulación:
Máster Universitario en Gestión Integrada de Sistemas Hídricos

Santander, octubre de 2020

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RESUMEN: *Métodología para la evaluación de la peligrosidad de contaminación por derrames accidentales de hidrocarburos originados por explosiones profundas (blowout) en instalaciones offshore.*

Autor: Andrés Martínez Gómez **Directores:** Ana J. Abascal Santillana; Andrés García Gómez **Convocatoria:** Octubre 2020

Palabras clave: derrame de hidrocarburos, explosión en profundidad o blowout, modelado numérico, Montecarlo, peligrosidad

INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico, en particular el que tuvo su origen en la revolución industrial, en el siglo XVIII, trajo consigo un incremento en el consumo global de energía, que aún se sostiene en el tiempo. En 2019, el consumo global de energía primaria creció un 1.3 %. Este consumo se conformó, en un 84.3 %, por combustibles fósiles; un 57.3 % entre, únicamente, petróleo y gas natural (BP, 2020). Los combustibles fósiles se encuentran en la corteza terreste; bien sea continental (*onshore* o en tierra) u oceánica (*offshore* o en alta mar), enterrados bajo capas de sedimento y roca. Si se desea tener acceso a ellos es preciso perforar estas capas (excavar un pozo). Esta operación se conoce con el nombre de extracción o producción y, junto con las fases de exploración y transporte, conforma el proceso de producción de estas fuentes de energía. Sin embargo, estas actividades entrañan la posibilidad de que, en su desempeño, se produzca un derrame de hidrocarburos al mar (en el caso *offshore* o en alta mar, motivo de este trabajo). La contaminación que se produce a causa de estos derrames supone un gran riesgo para el litoral y el medio marino.

Las administraciones públicas, así como las entidades públicas y privadas implicadas, deben ser capaces de dar una respuesta rápida y efectiva a estos derrames, con el fin de minimizar su efecto. Para tal fin, es necesario disponer de herramientas técnicas y metodológicas (p. ej., sistemas operativos o planes de contingencia) que, en caso de emergencia, faciliten a sus gestores la toma de decisiones. Estas herramientas dan respuesta a preguntas tales como: «¿qué zonas del litoral pueden ser alcanzadas por el derrame?» o «¿cuánto tiempo tardará el derrame en alcanzar una zona concreta del litoral?». No obstante, las herramientas actuales presentan una serie de limitaciones.

Este trabajo está dirigido a subsanar estas limitaciones.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es el de desarrollar una metodología que haga posible la evaluación de la peligrosidad de contaminación resultante de un derrame accidental de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad o *blowout* en una instalación en alta mar u *offshore*. Para alcanzar este objetivo principal se establecen los siguientes objetivos específicos: i) escoger la base datos de reanálisis que mejor representa las corrientes, forzamiento del transporte de la mancha de hidrocarburos, en el área de aplicación de la metodología; ii) analizar la sensibilidad del modelo numérico a la resolución espacial de la malla numérica y al número de partículas empleado en la simulación; iii) analizar la la aleatoriedad y variabilidad, en el tiempo y el espacio, de las condiciones meteoceánicas que caracterizan el área de aplicación de la metodología, mediante un proceso estocástico; algoritmo de la simulación de Montecarlo; iv) analizar la sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios de condiciones meteóceanicas empleado en la simulación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo plantea una metodología conformada por 5 pasos : i) selección de la base de datos de reánalisis de corrientes; ii) análisis de sensibilidad del modelo numérico a la resolución espacial de la malla numérica y al número de partículas; iii) configuración de los parámetros necesarios en la ejecución del modelo numérico; iv) análisis estadístico de los resultados del modelo numérico; v) análisis estocástico con base en la simulación de Montecarlo (selección del número de escenarios meteoceánicos a ejecutar para la obtención de los resultados últimos de la metodología). Se parte de: i) datos de línea de costa y batimetría en el área de estudio; ii) bases de datos de reanálisis; de variables meteoceánicas; iii) el modelo númerico de transporte y envejecimiento de hidrocarburos TESEO.

RESULTADOS

El resultado último de la metodología lo componen los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y de tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos; herramientas de planificación ante un hipotético derrame. Los mapas; resultado de la aplicación de la presente metodología a un hipotético derrame derivado de una explosión en profundidad en el mar del Norte, revelan una inclinación en la deriva de la mancha de hidrocarburos, hacia el este. Por tanto, la probabilidad más alta de contaminación se sucede en el litoral danés y

noruego, con un 50-60%; para un tiempo estimado de llegada de 5-10 días [se comparan estos resultados a los obtenidos por Chiri (2020)].

Los resultados comprenden, asimismo, los mapas de diferencias, en valor absoluto, entre dos mapas; de probabilidad acumulada o tiempo de llegada, generados a partir de un mismo número de escenarios; de 50, 100 y 400, con un óptimo en 400.

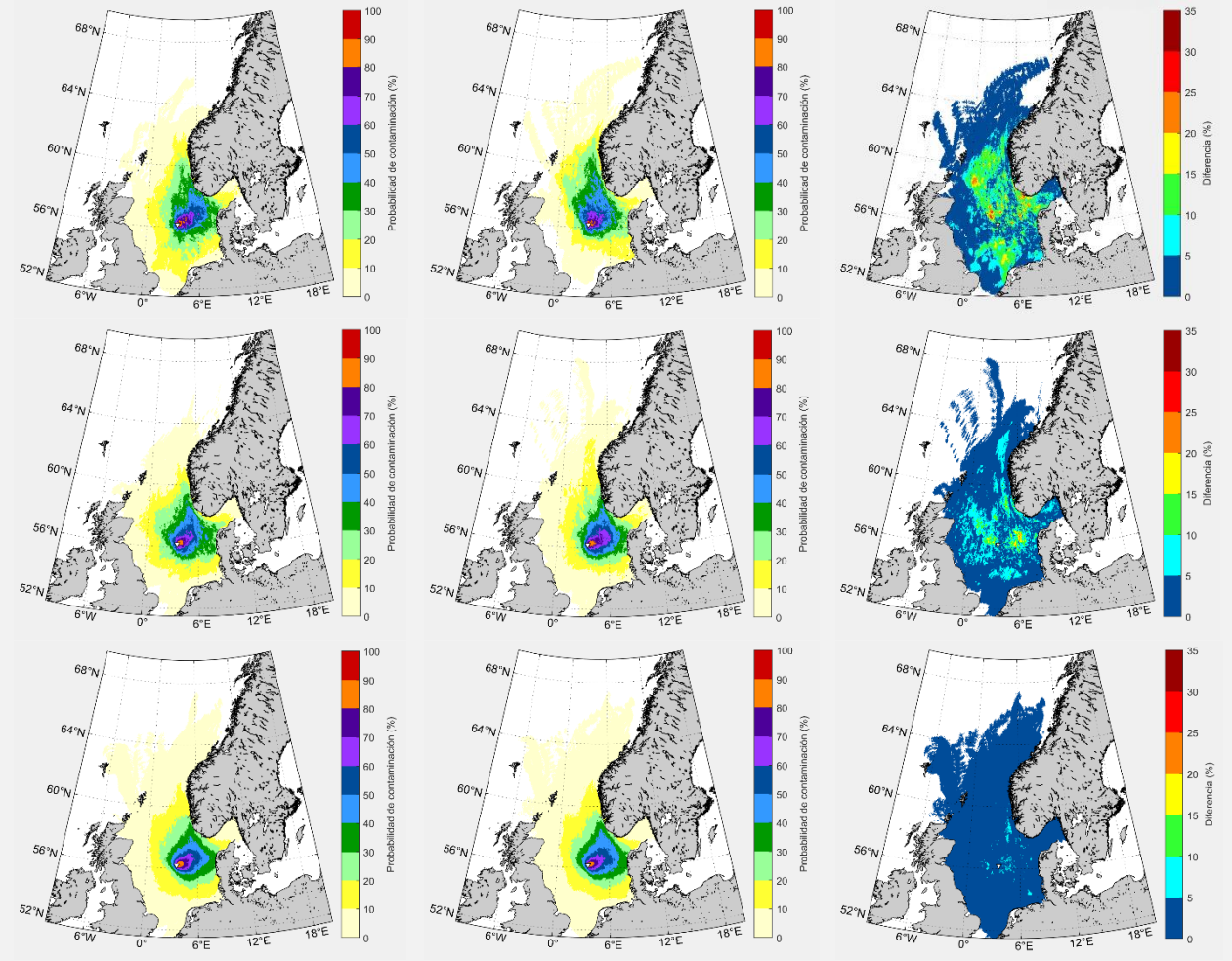


Figura Resultado último de la metodología; mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y diferencias.

CONCLUSIONES

Este trabajo consigue una metodología que posibilita la evaluación de la peligrosidad de contaminación derivada de un derrame accidental de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad o *blowout* en una instalación en alta mar u *offshore*. La metodología consigue representar la aleatoriedad; variabilidad, de las condiciones meteoceánicas en el área de estudio a partir de la selección de un número de escenarios meteoceánicos con base en un análisis estocástico; algoritmo de la simulación de Montecarlo, y un posterior análisis de sensibilidad aplicado a este. Por todo ello, supone una mejora a las herramientas actuales de lucha contra la contaminación por derrames accidentales de hidrocarburos en el litoral y medio marino.

REFERENCIAS

Dudley, B. (2018). BP statistical review of world energy. *BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug*, *6*, 2018.

Chiri, H. (2020). Avances en metodologías estadísticas para la simulación en el medio-largo plazo de derrames de hidrocarburos en el mar.

ABSTRACT: *Hazard assessment methodology for blowouts in offshore facilities. Application to the North Sea.*

Author: Andrés Martínez Gómez **Supervisors:** Ana J. Abascal Santillana; Andrés García Gómez **Call:** October 2020

Palabras clave: oil spill, blowout, numerical modelling, Monte Carlo, hazard

INTRODUCTION

Economic growth, particularly that which originated in the industrial revolution in the 18th century, brought with it an increase in global energy consumption, which is still sustained over time. In 2019, global primary energy consumption grew by 1.3%. This consumption was made up of 84.3% fossil fuels, 57.3% oil and natural gas (BP, 2020). Fossil fuels are found in the earth's crust; either continental (onshore or inland) or oceanic (offshore or in the open seas), buried under layers of sediment and rock. To be able to access them, these layers must be drilled (digging a well). This operation is known as extraction or production and, together with the exploration and transport phases, it forms the production process of these energy sources. However, these activities entail the possibility that, in their performance, a hydrocarbon spill to the sea may occur (in the event of an offshore oil spill). The pollution caused by these spills entails a great risk for the coast and the marine environment.

Public administrations, as well as the public and private entities involved, must be able to provide a rapid and effective response to these spills, in order to minimize their effect. To this end, it is necessary to have technical and methodological tools (e.g., operating systems or contingency plans) that, in the event of an emergency, facilitate decision making by their managers. These tools provide answers to questions such as: "which areas of the coast could be hit by the spill?" or "how long will it take for the spill to reach a particular area of the coast?". However, current tools have a number of limitations.

This paper aims to address these limitations.

OBJECTIVES

The general objective of this document is to develop a methodology that makes possible the evaluation of the pollution hazard resulting from an accidental oil spill caused by an explosion at depth or blowout in a facility at sea or offshore. To achieve this main objective, the following specific objectives are established: i) to choose the reanalysis database that best represents the currents, transport forcing of the oil slick, in the area of application of the methodology; ii) to analyze the sensitivity of the numerical model to the spatial resolution of the numerical mesh and to the number of particles used in the simulation; iii) to analyze the randomness and variability, in time and space, of the met-oceanic conditions that characterize the area of application of the methodology, by means of a stochastic process; algorithm of the Monte Carlo simulation; iv) to analyze the sensitivity of the numerical model to the number of scenarios of met-oceanic conditions used in the simulation.

MATERIALS AND METHODS

This document proposes a methodology conformed by 5 steps : i) selection of the current re-analysis database; ii) analysis of the numerical model sensitivity to the spatial resolution of the numerical mesh and to the number of particles; iii) configuration of the necessary parameters in the execution of the numerical model; iv) statistical analysis of the numerical model results; v) stochastic analysis based on the Monte Carlo simulation (selection of the number of met-oceanic scenarios to be executed in order to obtain the final results of the methodology). It is based on: i) coastline and bathymetry data in the study area; ii) reanalysis databases; of met-oceanic variables; iii) the TESEO numerical model of hydrocarbon transport and aging.

RESULTS

The final result of the methodology are the maps of accumulated probability of water surface contamination and estimated time of arrival of the oil slick; planning tools for a hypothetical spill. The maps; result of the application of the present methodology to a hypothetical spill derived from an explosion in depth in the North Sea, reveal an inclination in the drift of the oil slick, towards the east. Therefore, the highest probability of contamination occurs on the Danish and Norwegian coasts, with 50-60%, for an estimated time of arrival of 5-10 days [these results are compared to those obtained by Chiri (2020)].

The results also include maps of differences, in absolute value, between two maps; of accumulated probability or arrival time, generated from the same number of scenarios; of 50, 100 and 400, with an optimum of 400.

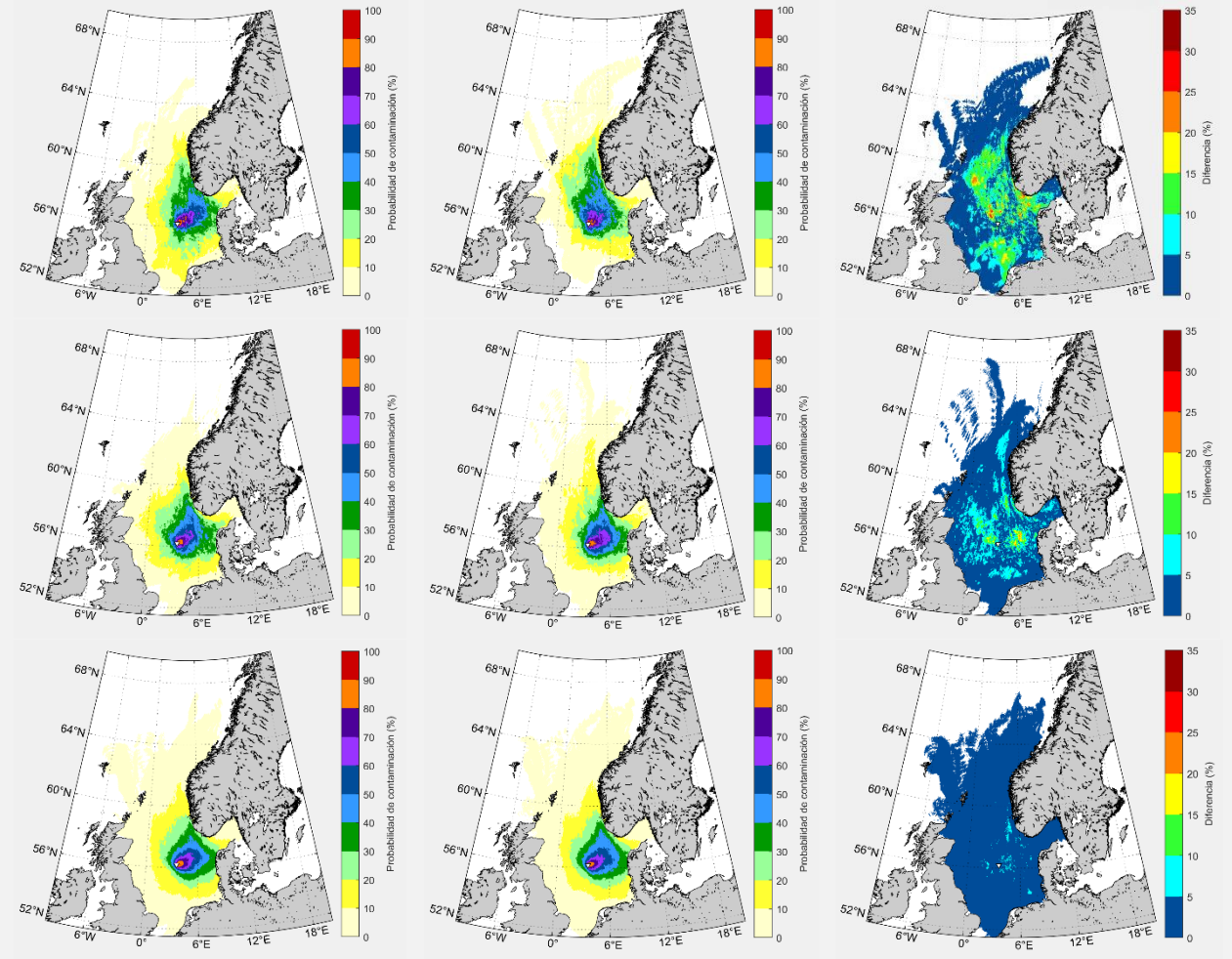


Figure Final result of the methodology; maps of accumulated probability of water surface contamination and differences

FINDINGS

This work achieves a methodology that makes possible the evaluation of the pollution danger derived from an accidental oil spill caused by an explosion in depth or blowout in an offshore installation. The methodology manages to represent the randomness; variability, of the met-oceanic conditions in the study area from the selection of a number of met-oceanic scenarios based on a stochastic analysis; algorithm of the Monte Carlo simulation, and a subsequent sensitivity analysis applied to it. Therefore, it is an improvement to the current tools for fighting pollution from accidental oil spills on the coast and marine environment.

REFERENCES

Dudley, B. (2018). BP statistical review of world energy. *BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug*, *6*, 2018.

Chiri, H. (2020). Avances en metodologías estadísticas para la simulación en el medio-largo plazo de derrames de hidrocarburos en el mar.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN……... 1
2. OBJETIVOS……. 5
2.1. OBJETIVO GENERAL……... 5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS……... 5
3. ÁREA DE ESTUDIO…….. 6
4. MATERIALES……. 8
4.1. LÍNEA DE COSTA Y BATIMETRÍA……. 8
4.1.1. Línea de costa…… 8
4.1.2. Batimetría…….. 9
4.2. BASES DE DATOS OCEANOGRÁFICAS…… 11
4.2.1. Corrientes…….. 11
4.2.1.1. Corrientes oceánicas……... 11
4.2.1.2. Corrientes de marea……... 12
4.2.2. Vientos…….. 12
4.3. MODELO DE TRANSPORTE Y DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS TESEO..... 13
5. MATERIALES……. 15
5.1. SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS……. 16
5.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LA MALLA NÚMERICA Y AL NÚMERO DE PARTÍCULAS……... 22
5.3. CONFIGURACIÓN DEL DERRAME……... 26
5.3.1. Acoplamiento columna de agua-superficie……. 27
5.4. SIMULACIÓN DE MONTECARLO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL NÚMERO DE ESCENARIOS…… 29
5.4.1. Simulación de Montecarlo…….. 29
5.4.2. Análisis estadístico……. 30
5.4.2.1. Probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua……. 30
5.4.2.2. Tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos……..... 31
5.4.3. Análisis de sensibilidad al número de escenarios…… 31
6. RESULTADOS…… 34
6.1. PROBABILIDAD ACUMULADA DE CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE DEL AGUA…….. 34
6.2. TIEMPO ESTIMADO DE LLEGADA DE LA MANCHA DE HIDROCARBUROS…… 37
7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN……... 40
7.1. CONCLUSIONES……... 40
7.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN…….. 40
8. REFERENCIAS……... 41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Los mayores derrames de crudo que han afectado a las aguas de los EUA entre 1969 y 2017. (NOAA/Office of Response and Restoration)……. 2

Figura 1.2 Triángulo del riesgo según Crichton (1999)……... 4

Figura 3.1 Inventario OSPAR de instalaciones *offshore* en el mar del Norte, 2017. (OSPAR, 2017)……. 7

Figura 4.1 Línea de costa global; a partir de la serie de datos de la GSHHG…….. 8

Figura 4.2 Línea de costa en el mar del Norte; a partir de la serie de datos de la GSHHG…. 9

Figura 4.3 Portal de batimetría: EMODnet-Bathymetry…… 10

Figura 4.4 Batimetría de la plataforma continental de Europa nororiental……. 10

Figura 4.5 Bases de datos de corrientes; Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), y viento; ERA5. Detalle en torno a las islas Shetland, en Escocia……. 12

Figura 5.1 Boyas empleadas en el proceso de validación. El triángulo rojo indica la ubicación del hipotético punto de derrame……... 16

Figura 5.2 Serie de datos de corrientes de CFSR y a) datos brutos de la boya 2; considera las corrientes de marea; b) datos procesados de la boya 2; sin marea astronómica…….. 17

Figura 5.3 a) Función de densidad de probabilidad y b) función de distribución acumulada de los datos brutos de corrientes de la boya 2 («Instrumental data») y de CFSR («Modelled data»)…… 18

Figura 5.4 Proceso de validación de CFSR + TPXO9-atlas («Modelled data»); con los datos brutos de la boya 2 («Instrumental data»)…….. 19

Figura 5.5 Análisis estadístico de las bases de datos de reanálsis…… 20

Figura 5.6 Área de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de 0.25 g/m^2; a) 1, b) 10, c) 20 y d) 30 días de deriva de la mancha, para una serie de números de partículas entre 50 y 100 000……. 23

Figura 5.7 Área de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m^2; a) 0.02, b) 0.03, c) 0.04 y d) 0.05° de resolución espacial de la malla numérica, para una serie de números de partículas (entre 50 y 100 000)……... 24

Figura 5.8 Mapas de concentración de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m2 para: a) 1 000, b) 5 000, c) 10 000 y d) 50 000 partículas, tras 20 días de deriva…… 24

Figura 5.9 Error en el área de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m2 respecto del valor óptimo de 10 000 partículas…… 25

Figura 5.10 Instantánea de las partículas en la columna de agua; derrame con la configuración que se muestra en la tabla 5.3…….. 27

Figura 5.11 Instantáneas de la mancha de hidrocarburos luego de a) 45 minutos y b) 5 horas de producirse el derrame; derrame con la configuración que se muestra en la tabla 5.3……. 28

Figura 5.12. Puntos seleccionados en el análisis de sensibilidad. El triángulo rojo indica la ubicación del hipotético punto de derrame……..... 31

Figura 5.13. Diagrama de caja y bigotes de la variable: probabilidad acumulada de contaminación, estimada en los 4 puntos seleccionados, para 50, 100, 200, 300, 400 y 500 escenarios……. 32

Figura 5.14. Varianza de la distribución de la serie de datos para cada «caja» del diagrama de caja y bigotes (Figura 5.13) en cada punto seleccionado…… 33

Figura 6.1 Mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², generados a partir de 400 escenarios…… 35

Figura 6.2 Mapas de diferencias de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua entre dos mapas generados a partir de un mismo número de a) 50, b) 100 y c) 400 escenarios, por encima de un umbral de 1 g/m²…… 36

Figura 6.3 Mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua, expresada en tanto por uno; a) presente metodología; elaboración propia, b) Chiri (2020)… 37

Figura 6.4 Mapas de tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², generados a partir de 400 escenarios……... 38

Figura 6.5 Mapas de diferencias en el tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos entre dos mapas generados a partir de un mismo número de a) 50, b) 100 y c) 400 escenarios, por encima de un umbral de 1 g/m²…….. 39

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Análisis estadístico de las bases de datos de reanálisis……... 20

Tabla 5.2 Configuración del derrame……... 23

Tabla 5.3 Configuración del derrame……... 26

1. INTRODUCCIÓN

Problemática, derrames de hidrocarburos, ejemplos y consecuencias

El crecimiento económico, en particular el que tuvo su origen en la revolución industrial, en el siglo XVIII, trajo consigo un incremento en el consumo global de energía, que aún se sostiene en el tiempo. En 2019, el consumo global de energía primaria[1] creció un 1.3 %. Este consumo se conformó, en un 84.3 %, por combustibles fósiles; un 57.3 % entre, únicamente, petróleo y gas natural (BP, 2020). Los combustibles fósiles se encuentran en la corteza terreste; bien sea continental (*onshore* o en tierra) u oceánica (*offshore* o en alta mar), enterrados bajo capas de sedimento y roca. Si se desea tener acceso a ellos es preciso perforar estas capas (excavar un pozo). Esta operación se conoce con el nombre de extracción o producción y, junto con las fases de exploración y transporte, conforma el proceso de producción de estas fuentes de energía. Sin embargo, estas actividades entrañan la posibilidad de que, en su desempeño, se produzca un derrame de hidrocarburos al mar (en el caso *offshore* o en alta mar, motivo de este trabajo). La contaminación que se produce a causa de estos derrames supone un gran riesgo para el litoral y el medio marino.

A lo largo de la historia se suceden numerosos ejemplos de estos derrames; se citan algunos (Figura 1.1):

El derrame de Santa Bárbara:

El 28 de enero de 1969 se produjo una explosión en profundidad en el pozo número 21 de la Plataforma A de la Union Oil Company de California (Unocal Corporation), ubicada al sudeste de la ciudad de Santa Bárbara, en los EUA. Una enorme mezcla de crudo, gas natural y lodo de perforación comenzó a brotar de la tubería, sobre la plataforma. El pozo A-21 se tapó el 7 de febrero, 11 días después de la explosión. Pese a ello, crudo y gas natural siguieron manando por entre fallas naturales originadas por la explosión, liberando un total de 100 000 barriles de crudo[2] hasta diciembre de 1969 (cese del derrame). Pese a ser considerado uno de los mayores desastres ambitentales en los EUA, este derrame dió pié a la creación de la Ley de Política Ambiental Nacional (NEPA) o la Agencia de Protección Medioambiental de los EUA (EPA), entre otras.

El derrame del Deepwater Horizon:

El 20 de abril de 2010, una explosión en profundidad en el pozo de exploración Macondo, en el golfo de México, provocó el hundimiento de la plataforma de perforación Deepwater Horizon, propiedad de BP Exploration & Production Inc. 11 de sus operarios murieron y 4 millones de barriles de crudo[3] fueron liberados al mar en un período de 87 días, antes de que el pozo fuera tapado el 15 de julio de 2010. El desastre del Deepwater Horizon se considera la mayor catástrofe ambiental en la historia de los EUA.

Por último, el que supuso uno de los mayores desastres medioambientales en Europa, el desastre del Prestige:

El 19 de noviembre de 2002, tras 7 días a la deriva a causa de un temporal, el petrolero monocasco Prestige se partió en dos frente a la costa gallega, 130 millas náuticas al sudoeste del cabo de Finisterre, hundiéndose a una profundidad de 3 500 m. La última estimación, a fecha de agosto de 2003, era de 63 000 toneladas de crudo derramado (Castanedo et al., 2006).

[1] Energía procedente de fuentes renovables y no renovables que no ha sufrido ningún proceso de conversión o transformación. *Diccionario panhispánico del español jurídico*. Referencia: https://dpej.rae.es/lema/energ%C3%ADa-primaria#:~:text=Adm.,proceso%20de%20conversi%C3%B3n%20o%20transformaci%C3%B3n.

[2] Referencia: https://incidentnews.noaa.gov/incident/6206

[3] Referencia: https://www.epa.gov/enforcement/deepwater-horizon-bp-gulf-mexico-oil-spill

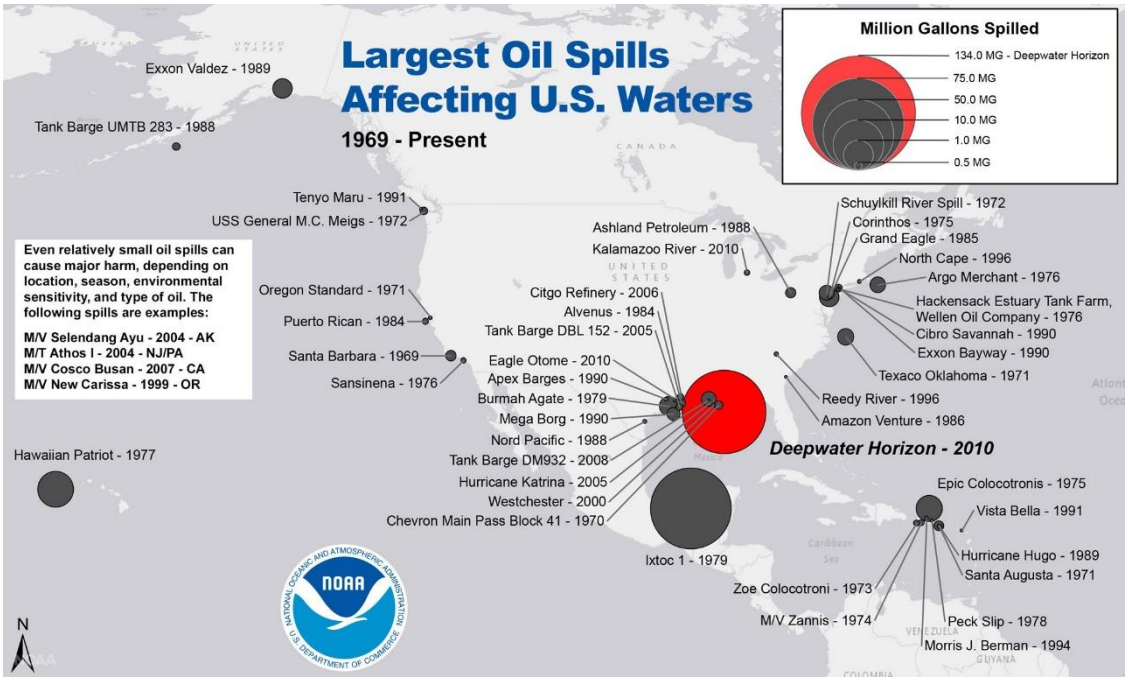


Figura 1.1 Los mayores derrames de crudo que han afectado a las aguas de los EUA entre 1969 y 2017. (NOAA/Office of Response and Restoration). Referencia: https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/oil-spills

De estos ejemplos se desprende la dificultad en la reparación o extinción de un derrame de hidrocarburos en alta mar u *offshore*, por lo que estos suelen durar semanas o meses. Se le suma, además, que el material derramado persiste en el medio antes de ser controlado y en la mayoría de casos alcanza la costa. Es necesario añadir que, el progreso en la producción de crudo y gas, en aguas cada vez más profundas, acarrea una serie de riesgos añadidos; mayor riesgo en un hipotético derrame accidental. Para luchar contra estos derrames son precisas, por tanto, una serie de herramientas.

Herramientas técnicas y metodológicas en la lucha contra estas emergencias

Las administraciones públicas, así como las entidades públicas y privadas implicadas, deben ser capaces de dar una respuesta rápida y efectiva a estos derrames, con el fin de minimizar su efecto. Para tal fin, es necesario disponer de herramientas técnicas y metodológicas (p. ej., sistemas operativos o planes de contingencia[4]) que, en caso de emergencia, faciliten a sus gestores la toma de decisiones. Estas herramientas dan respuesta a preguntas tales como: «¿qué zonas del litoral pueden ser alcanzadas por el derrame?» o «¿cuánto tiempo tardará el derrame en alcanzar una zona concreta del litoral?». En la respuesta ante un derrame accidental, normalmente se dispone de dos tipos de herramientas: i) sistemas operacionales que proporcionan la predicción en tiempo real del derrame ocurrido y ii) sistemas de evaluación del riesgo que permiten evaluar el riesgo de la costa y del medio natural ante este tipo de derrames. Ambas herramientas se sustentan en modelos numéricos que permiten simular el transporte y envejecimiento del hidrocarburo una vez derramado en el medio marino. Los modelos numéricos se aplican para predecir la evolución de un derrame en el mar conocida su posición, distribución y propiedades iniciales y son forzados, por lo general, por datos de corrientes y vientos, proporcionados por modelos numéricos (Capítulo 4.2).

[4] Instrumento jurídico y técnico por el que se regulan los procedimientos de organización y actuación de las administraciones públicas y entidades públicas y privadas, comprensivo de la estructuración, disposición de medios personales y materiales y la dirección y seguimiento de las operaciones ante un suceso de contaminación marina. Referencia: https://dpej.rae.es/lema/plan-de-contingencias-de-contaminaci%C3%B3n-marina

Limitaciones de estas herramientas

i. En los sistemas operacionales, la escala temporal no se corresponde con la de un gran número de ejemplos en la literatura, con un período de deriva de la mancha de hidrocarburos, que puede ser de meses.
ii. No se conocen en la literatura ejemplos de metodologías 3D que consideren los procesos que tienen lugar en la columna de agua; bien sea en campo cercano o en campo lejano (Chiri, 2020). Los escasos ejemplos aplicados a un derrame por una explosión en profundidad se limitan a colocar la mancha de hidrocarburo que se corresponde con este en superficie, sobre el punto de vertido. Y aplican, a partir de este punto, una metodología 2D que considera tan solo los procesos que tienen lugar en la capa de agua superficial. Esto puede alterar el resultado del análisis.
iii. Por su parte, la capacidad de cálculo de los ordenadores limita su operatividad, más aún en el caso de una metodología 3D. Considerar los procesos que tienen lugar en las distintas capas de la columna de agua, en toda la extensión de la malla numérica, incrementa en gran medida el tiempo de ejecución del modelo numérico. Es preciso encontrar una configuración del mismo que resulte operativa.

Soluciones que aporta la presente metodología

La metodología que se introduce en este documento, persigue aportar una solución a estos problemas. i) En primer lugar, se trata de una herramienta de planificación que provee de información de la evolución del derrame a largo plazo. ii) Luego, es una metodología 3D que resuelve la peligrosidad de contaminación por un derrame de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad; condisera los procesos que tienen lugar en toda la columna de agua. iii) Está basada en un análisis de sensibilidad de la configuración del modelado numérico y estadístico que permite encontrar la configuración óptima del proceso de cálculo, reduciendo así el coste computacional, al mismo tiempo que se mantiene la fiabilidad de los resultados. iv) Y, por último, es generalizable y extrapolable a cualquier parte del mundo.

Estado del conocimiento

Modelo numérico de transporte y envejecimiento de hidrocarburos

Los modelos numéricos que se emplean, en la actualidad, en el estudio de la peligrosidad de contaminación por un derrame accidental de hidrocarburos, resuelven un modelo matemático basado en métodos numéricos o algoritmos capaces de representar gran parte de los procesos que se conoce tienen un efecto sobre este: dispersión, evaporación, etc. Entre los ejemplos de modelos numéricos de transporte y envejecimiento de hidrocarburos que se citan en la literatura, es preciso mencionar el modelo MOHID (Janeiro et al., 2008; Martins et al., 2001) o el que se emplea en la elaboración de la presente metodología, el modelo TESEO (Abascal et al., 2007), descrito en el capítulo 4.3.

La mayoría de estos modelos numéricos permiten representar la suerte de un derrame producido tanto en superficie como tras una explosión en profundidad. Para esto se aplica, por lo general, el enfoque lagrangiano del movimiento de los fluidos. Según este enfoque, el transporte de un derrame a la deriva se representa mediante el seguimiento de una nube de partículas, transportadas de forma independiente, que representa la mancha de hidrocarburo. En cada paso de tiempo, la nueva posición de las partículas se obtiene como la suma de los transportes inducidos por el flujo medio, las mareas, el viento, oleaje y la dispersión turbulenta (Abascal et al., 2007).

Entre los principales procesos del módulo de envejecimiento, se consideran: la dispersión de la mancha de hidrocarburo, que se estima por medio de la fórmula de Fay (Fay, 1971); su evaporación, gracias al modelo analítico de Stiver y MacKay (1984); la ley de la tasa de primer orden, propuesta por MacKay et al., (1980) para calcular la emulsión o incorporación de agua por parte de la mancha de hidrocarburo; y los cambios en la propiedades fisicoquímicas debido a los procesos de envejecimiento de la sustancia (Abascal et al., 2017a, Abascal et al., 2017b).

Por último, al objeto de representar la suerte de un derrame accidental de hidrocarburos por una explosión en profundidad, es preciso aplicar un modelo de campo cercano, cuyo resultado se acopla; sirve como dato de entrada, al modelo numérico 3D, que resuelve el campo lejano. Entre los modelos de campo cercano que se citan en la literatura cabe destacar el modelo de zona de mezcla CORMIX (Doneker y Jirka, 2001) o el VISJET (Lee et al., 2003). En la presente metodología no se ha aplicado ningún modelo de campo cercano. Por consiguiente, se ha aplicado directamente el modelo numérico; de campo lejano, TESEO a un derrame en profundidad. Pese a no tratarse de un modelo de campo cercano, el modelo TESEO considera alguno de los procesos que tienen lugar en él: la distribución del tamaño de las partículas de hidrocarburo que se genera en una explosión en profundidad y el efecto de los dispersantes que se emplean para combatirlo. Es importante simular correctamente el tamaño de las partículas puesto que influye en su velocidad de ascenso hacia la superficie, por su diferencia de densidad con la del agua de mar; a mayor tamaño, mayor velocidad de ascenso y menor tiempo en la columna de agua. Las partículas muy pequeñas pueden quedar atrapadas en la columna sin alcanzar la superficie, Por su parte, los dispersantes actúan reduciendo la tensión superficial entre el agua de mar y el hidrocarburo lo que provoca que se generen partículas mucho más pequeñas (Chiri, 2020).

Modelo estocástico para la evaluación de la peligrosidad de contaminación por un derrame de hidrocarburos

Dentro del concepto de riesgo (Figura 1.2), la presente metodología está centrada en estudiar la peligrosidad, entendida como la probabilidad; análisis estocástico, de que ocurra un vertido accidental de hidrocarburos en el mar, en una localización y fecha determinadas. No considera, por tanto, ni su potencial vulnerabilidad; capacidad para hacer frente, resistir y recuperarse del impacto, ni su exposición; facilidad que presenta una zona de ser protegida frente a los efectos de un vertido de hidrocarburos. En el estudio de la probabilidad de contaminación, se emplea un modelo estocástico, que considera la aleatoriedad, en tiempo y espacio, de las condiciones meteoceánicas que caracterizan el área de estudio; forzamientos del derrame. A tal fin se aplica el teorema de la simulación de Montecarlo (Capítulo 5.4), que considera un número finito *n* de fechas de inicio de la simulación numérica, por tanto, forzamientos asociados a esas fechas desde bases de reanálisis. Para representar el carácter aleatorio de las condiciones meteoceánicas en el área de estudio, se requiere de un número elevado de escenarios; afecta al tiempo de ejecución del modelo numérico. Pese a su coste computacional, el método de la simulación de Montecarlo se ha demostrado efectivo y se ha aplicado en derrames superficiales (Abascal et al., 2010; Canu et al., 2015).

Figura 1.2 Triángulo del riesgo según Crichton (1999)

Bajo estas premisas, el presente trabajo fin de máster tiene por objeto el desarrollo de una metodología para la evaluación de la peligrosidad de contaminación por derrames accidentales de hidrocarburos, originados por explosiones en profundidad o *blowouts*, en instalaciones en alta mar u *offshore*. Con objeto de facilitar su comprensión, esta se aplica a un hipotético derrame en el mar del Norte, una de las área más activas en el mundo en la exploración y producción de petróleo y gas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es el de desarrollar una metodología que haga posible la evaluación de la peligrosidad de contaminación resultante de un derrame accidental de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad o *blowout* en una instalación en alta mar u *offshore*.

Para alcanzar este objetivo principal se establecen los siguientes objetivos específicos:

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

i. Escoger la base de datos de reanálisis que mejor representa las corrientes; forzamiento del transporte de la mancha de hidrocarburos, en el área de aplicación de la metodología.
ii. Analizar la sensibilidad del modelo numérico a la resolución espacial de la malla numérica y al número de partículas empleado en la simulación.
iii. Analizar la aleatoriedad y variabilidad, en el tiempo y el espacio, de las condiciones meteoceánicas que caracterizan el área de aplicación de la metodología, mediante un análisis estocástico; algoritmo de la simulación de Montecarlo.
iv. Analizar la sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios de condiciones meteóceanicas empleado en la simulación.

La metodología desarrollada en este trabajo pretende mejorar y complementar las herramientas actuales de lucha contra la contaminación por derrames accidentales de hidrocarburos en el litoral y medio marino.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La presente metodología se aplica a un hipotético derrame accidental de hidrocarburos en el mar del Norte.

El mar del Norte es un extenso mar semicerrado[5] ubicado en la plataforma continental de Europa nororiental, formado a partir de la inundación de masa continental en el Holoceno[6]. Está acotado, al oeste, por las islas británicas y el canal de la Mancha, en el punto más estrecho del Paso de Calais; al sur, por el continente europeo: Francia, Bélgica, Países Bajos y Alemania; al este, por los países de Dinamarca y Noruega, y por el estrecho de Skagerrak, que los separa; y al norte, por el mar de Noruega, a la altura de las islas Shetland (paralelo 61° N). Se halla, a su vez, conectado al mar Báltico por medio del canal de Kiel[7]. Es un mar de aguas poco profundas, con una profundidad media de 70 m, a excepción del Canal de Noruega, depresión del lecho marino en la costa sur del país de mismo nombre en el que las profundidades alcanzan los 700 m. Es, además, un mar pequeño, con una superficie de 575 300 km² (ICES, 1983).

El agua, más caliente y salina, del océano Atlántico entra en el mar del Norte en torno a las islas Shetland, y tiende a desplazarse hacia el sur, donde se mezcla con aguas más frías. La topografía del mar del Norte produce una circulación en sentido antihorario. El agua que entra por el canal de la Mancha, procedente también del Atlántico, se desplaza hacia el este siguiendo la costa belga, holandesa y alemana. En el estrecho de Skagerrak, el agua del mar del Norte se mezcla con el agua, menos salina, del Báltico y es transportada por las corrientes a lo largo de la costa oeste de Noruega, en sentido norte. La temperatura de la superficie del mar oscila entre los 0 y 20 °C, con arreglo a la estación y la ubicación, siendo esta oscilación menor en el norte. La salinidad muestra una pequeña variabilidad en mar abierto, entre 32 y 34.5 ‰. En el estrecho de Skagerrak, la salinidad varía entre 25 y 34 ‰, debido a los aportes de agua dulce, mientras que, por su parte, la salinidad en el mar de Wadden es, por lo general, inferior a 30 ‰. La temperatura de la superficie del mar, así como la salinidad, manifiestan una variabilidad a escala anual, estacional y de décadas. Las corrientes de marea varían de algunas de las más fuertes del planeta, a ser casi nulas. El nivel de oxígeno es reducido a profundidades por debajo de los 70 m (Walday y Kroglund, 2008).

Existe una dependencia del patrón básico de circulación de la dirección del viento, con un viento predominante del sudeste, que genera la circulación antihoraria (Sündermann, 2003).

La industria del petróleo en el mar del Norte

En 1959 tuvo lugar el hallazgo de un yacimiento, en tierra, de gas natural cerca del pueblo de Slochteren, en la provincia neerlandesa de Groninga, yacimiento que se extendía bajo el lecho marino del mar del Norte. Ya en 1962, la producción de gas natural por parte de los Países Bajos era más de 140 veces lo que había sido en 1950 (Young, 1965). Creció en estos años el interés por la exploración y producción de gas natural y crudo en el mar del Norte. En tanto en 1962 se trabajaba únicamente en 3 exploraciones

[5] Golfo, cuenca marítima o mar rodeado por dos o más Estados y comunicado con otro mar o el océano por una salida estrecha, cuya situación reclama la cooperación de los Estados ribereños en el ejercicio de sus derechos y el cumplimiento de sus obligaciones con arreglo al derecho internacional. *Diccionario panhispánico del español jurídico*. https://dpej.rae.es/lema/mar-semicerrado.

[6] Dicho de una época: Que es la más reciente del período cuaternario y que abarca desde hace unos diez mil años hasta nuestros días. *Diccionario de la lengua Española.* https://dle.rae.es/holoceno.

[7] Canal artificial de casi 100 km de largo entre Kiel-Holtenau, en el mar Báltico, y Brunsbütel, en la desembocadura del río Elba en el mar del Norte. Referencia: https://www.dw.com/es/125-a%C3%B1os-del-canal-de-kiel/g-53891034

sísmicas, en 1964 esta cifra aumentó hasta las 50 (Young, 1965). El éxito de Países Bajos, unido a la subsiguiente exploración sísmica[8], alentó a los países ribereños a promulgar leyes proclamando el control exclusivo de estos recursos, lo que ocasionó la división administrativa de la plataforma continental entre los primeros. Desde entonces, más de 7 800 pozos han sido perforados, y 44 000 millones de barriles de crudo extraídos, únicamente en la plataforma continental de Reino Unido (UKCS) (OGA, 2018a). Esta actividad no ha estado libre de accidentes. En el año 2017, tuvieron lugar, en esta misma plataforma, UKCS, 253 derrames accidentales de hidrocarburo, en los que más de 23 toneladas de crudo fueron liberados en el medio marino (OGA, 2018b). En la aplicación de la presente metodología se ha escogido un punto hipotético de derrame, extraído de la tesis de Chiri (2020), con propósito comparativo. Las coordenadas del punto son: 3.55°N, 56.187°E, a una profundidad de 71 m.

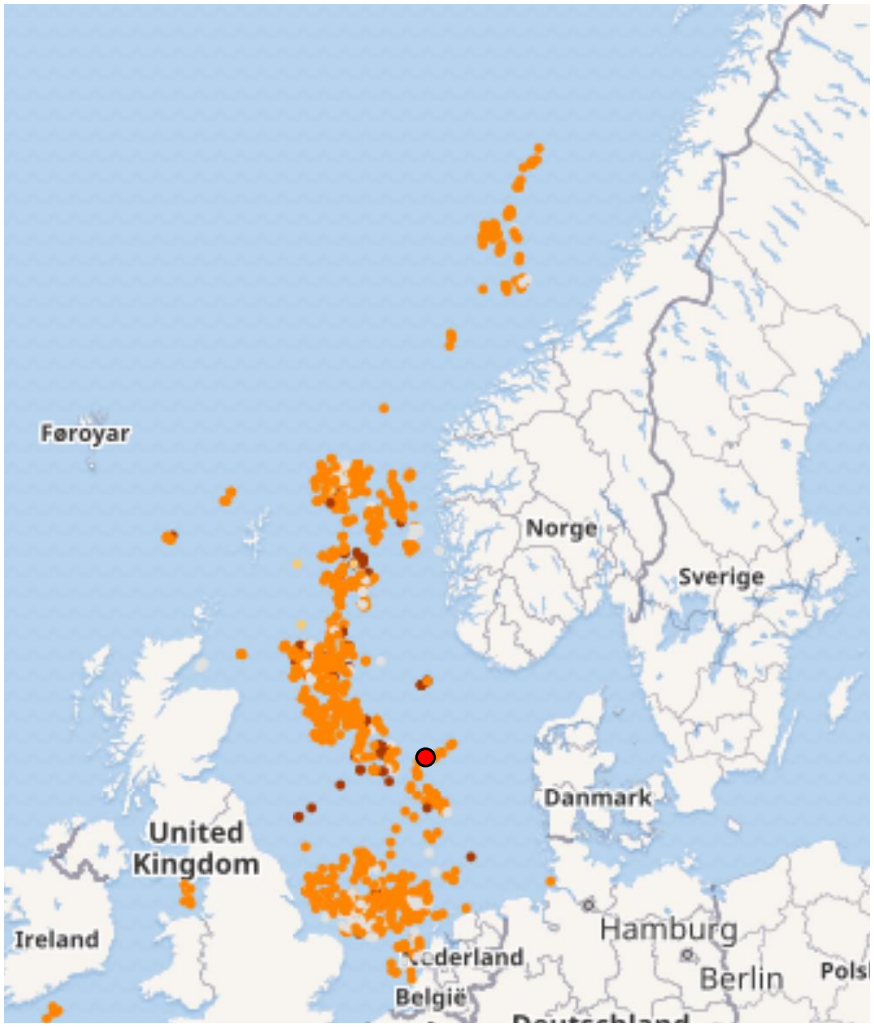


Figura 3.1 Inventario OSPAR de instalaciones *offshore* en el mar del Norte, 2017. (OSPAR, 2017). Referencia: https://odims.ospar.org/maps/1658. El punto rojo indica la ubicación del hipotético punto de derrame escogido.

[8] Método geofísico de prospección que permite conocer en profundidad la forma y disposición de las diferentes unidades litológicas mediante la detección, lectura e interpretación de ondas sísmicas reflejadas del subsuelo, producidas por una fuente de energía artificial instalada en profundidades georreferenciadas. https://www.maxam.net/es/fundacion/catedra_maxam/soluciones_voladura/exploracion_sismica.

4. MATERIALES

4.1 LÍNEA DE COSTA Y BATIMETRÍA

4.1.1 Línea de costa

La serie de datos de línea de costa ha sido proporcionada por parte del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). Estos datos se obtienen de la base de datos Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHG), de la NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI)[9]. La línea de costa no supone un dato de entrada al modelo numérico, se emplea en el posproceso, en la presentación de los resultados.

La GSHHG es una serie de datos geográficos de alta resolución, fruto de la unión de tres bases de datos: World Vector Shorelines (WVS), datos de línea de costa de la NOAA; CIA World Data Bank II (WDBII), creada por el gobierno de los EUA; y Atlas of the Cryosphere (AC), del National Snow and Ice Data Center (NSIDC). La WVS supone la base de los datos de línea de costa, a excepción de la costa antártica. Por su parte, la WDBII es la base de los datos de lagos, fronteras políticas o ríos. Por último, la AC supone la base de los datos de línea de costa en la Antártida, ofreciendo dos alternativas: línea de frente de hielo o línea de tierra. La figura 4.1 muestra la serie de datos global de línea de costa.

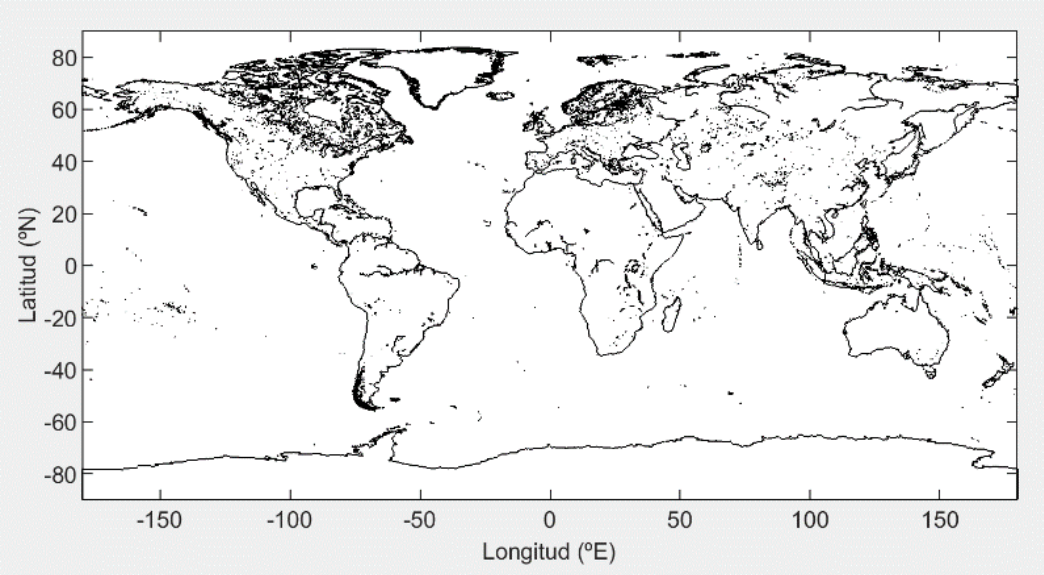


Figura 4.1 Línea de costa global; a partir de la serie de datos de la GSHHG. Elaboración propia.

La serie de datos se proporciona en formato .mat (Microsoft Access Table), en la forma de coordenadas geográficas de latitud y longitud, en el sistema geodésico: World Geodetic System 1984 (WGS84); en grados, notación decimal, (°). De este archivo .mat se ha extraído, por medio de un script de MATLAB, la serie de datos (línea de costa) embebida en el área de estudio: longitud [10° O, 20° E], latitud [51.5° N, 69.5° N] (Figura 4.2).

[9] Referencia: https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/

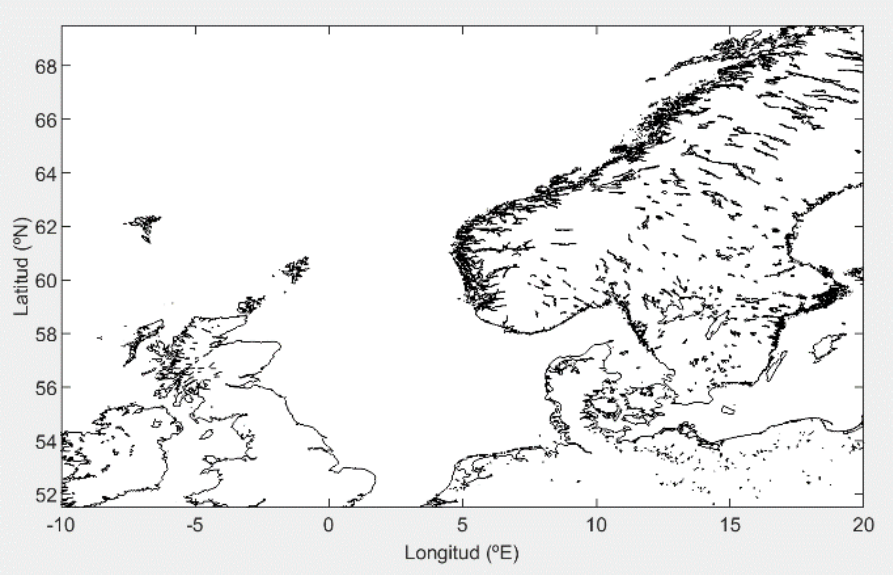


Figura 4.2 Línea de costa en el mar del Norte; a partir de la serie de datos de la GSHHG. Elaboración propia.

4.1.2 Batimetría

Los datos de batimetría se han descargado de la European Marine Observation and Data Network (EMODnet), en su portal de batimetría: EMODnet-Bathymetry[10], servicio que permite la visualización y descarga de un Modelo Digital del Terreno (MDT) armonizado para las diversas regiones de los mares de Europa (límites geográficos: longitud [36° O, 43° E], latitud [25° N, 85° N]). El portal presta acceso a los MDT de estas regiones, en una versión de 2016 y otra, más reciente, de 2018. Los MDT, en su versión más reciente; 2018, se componen de una malla numérica, en el sistema geodésico WGS84, con una resolución espacial de 1/16*1/60°, si bien la resolución espacial de la malla numérica de nuestro modelo se estima, más adelante, de 0.05° (Capítulo 5.2). A su vez, los MDT en su versión de 2016, brindan una resolución de malla de 1/8*1/60°, resolución que, pese a ser más grosera, es todavía mayor a la necesaria. Se ha creado, por esto, un script de MATLAB que permite, en base a un método de interpolación lineal, generar la batimetría en la resolución de malla de interés.

En cada celda se extrae la siguiente información: coordenadas de latitud y longitud en su centro, en grados en notación decimal (°); y profundidad, en metros (m). Esta información se asienta en 4 potenciales fuentes de datos: preferentemente, en conjuntos de datos de alta resolución provenientes de levantamientos batimétricos de onda acústica, mono y multihaz; en un Modelo Digital del Terreno (MDT) compuesto por datos producidos por un número de proveedores de datos externos a EMODnet: (que son) instituciones públicas o centros de investigación; en datos de batimetría derivados de satélite (SDB): conjunto de datos producido por el satélite de observación terrestre Landsat 8; y, por último, en caso de no disponer de datos de levantamientos o proveedores externos, se usan para completar la cobertura del área, datos del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) 2014, con una resolución de malla de 30*1/3600°. Estos datos han sido procesados y se les ha aplicado un control de calidad antes de su uso en la producción de los MDT regionales, para después integrarlos en el MDT de los mares de Europa de EMODnet.

[10] Referencia: https://www.emodnet-bathymetry.eu/

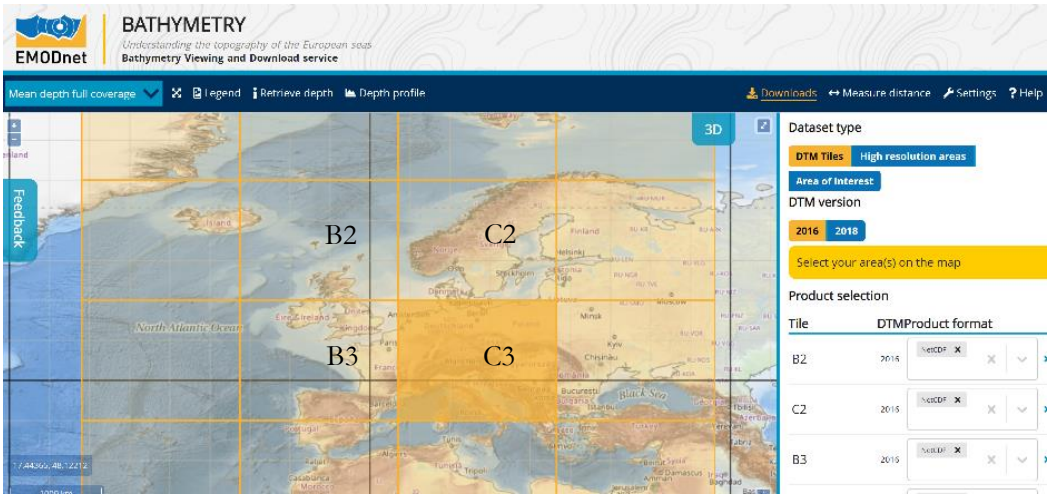


Figura 4.3 Portal de batimetría: EMODnet-Bathymetry. Referencia: https://portal.emodnet-bathymetry.eu/

Se han descargado del portal de batimetría: EMODnet-Bathymetry, los MDT regionales que cubren el área de estudio (en formato NetCDF): B2, C2, B3 y C3 (Figura 4.3), en su versión de 2016, con una resolución espacial de 1/8*1/60°. Se ha creado un script de MATLAB que, mediante interpolación lineal integra los MDT regionales en un único MDT, con una resolución de 0.05°. Además, recorta la porción de malla embebida en el área de estudio: longitud [10° O, 20° E], latitud [51.5° N, 69.5° N]. La batimetría supone un dato de entrada al modelo numérico. Ejerce de malla numérica, con coordenadas de latitud y longitud en el centro de cada una de sus celdas, en grados en notación decimal (°); en el sistema WGS84. Así mismo, cada celda contiene información de la profundidad en su centro. El modelo numérico asocia la profundidad a números positivos; por tanto, identifica un número positivo como agua, y uno negativo como tierra. La figura 4.4 muestra la batimetría en el área de estudio.

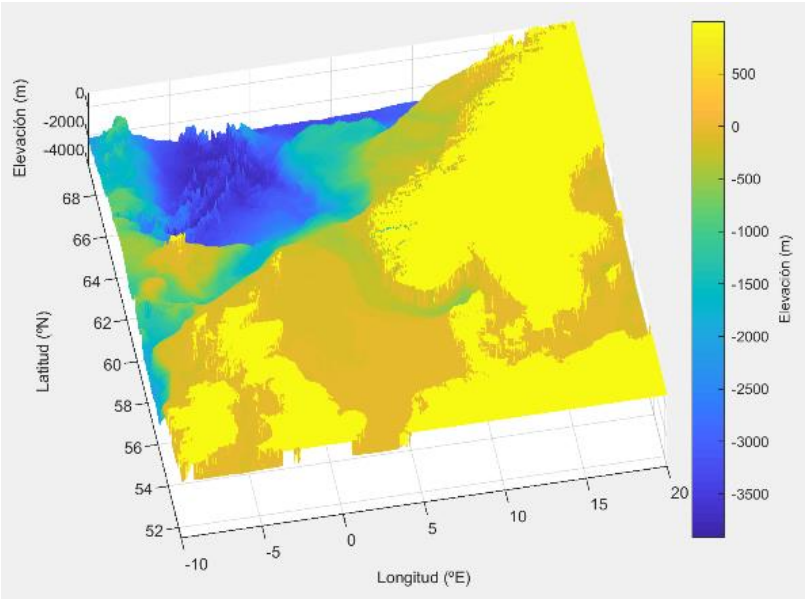


Figura 4.4 Batimetría de la plataforma continental de Europa nororiental. Elaboración propia.

4.2 BASES DE DATOS METEOCEÁNICAS

El transporte de un hidrocarburo derramado en el mar se rige por la advección a consecuencia de la acción de corrientes, oleaje y viento; forzamientos, y a la dispersión horizontal de la mancha en superfice a causa de la difusión turbulenta (Abascal et al., 2008; ASCE, 1996). Es preciso, por tanto, disponer de datos de forzamientos en el área de estudio, a fin de modelar su transporte.

4.2.1 Corrientes

4.2.1.1 Corrientes oceánicas

Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)[11]

El reanálisis del sistema de prevision climática Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), de los National Centers for Environmental Prediction (NCEP), se ha diseñado como un sistema o modelo global, de alta resolución, que representa la interacción entre atmósfera-océano-tierra-hielo marino, para proporcionar la mejor estimación de su estado; el de sus variables, en un período de 31 años, desde 1979 a 2011. Se prolonga, a partir de 2011, a futuro como un producto en tiempo real, operacional, por lo que se dispone de datos actuales (se han empleado, en el presente trabajo, datos de hasta 2018). La resolución global de CFSR para océano (se obtiene el dato de corrientes) es de 0.25° en el ecuador terrestre, ampliándose a 0.5° (de forma global, en longitud y latitud) más allá de los trópicos. Con 40 niveles hasta una profundidad de 4 737 m. Los datos CFSR tienen una resolución temporal horaria. El dato de velocidad de corriente se provee descompuesto en sus componentes horizontal (u) y vertical (v).

NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009[12]

El reanálisis NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 de la física oceánica de la plataforma continental de Europa nororiental, en el ámbito de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), se genera a partir del modelo oceánico; que considera la marea, en una malla de resolución espacial de 1/9°, NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean). El modelo de reánalisis provee de una serie de datos de promedios diarios, sin marea, de: temperatura; salinidad; corrientes horizontales; nivel del mar; profundidad de la capa de mezcla y temperatura en el fondo, en un período de 26 años, desde 1992 a 2018, en 24 capas. La resolución temporal de los datos es diaria. Por último, se trata de modelo a escala regional: longitud [20° O, 13° E], latitud [40° N, 65° N], en una malla regular de 1/15° de resolución de latitud y 1/9° longitud (unos 7 km^2).

Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1[13]

El modelo de reánalisis Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1, del U.S. Naval Research Laboratory (NRL): Ocean Dynamics and Prediction Branch, se compone de una serie de 22 años de datos, 1994 a 2016 (31/12/2015), en 41 capas o niveles. La resolución espacial de su malla numérica global es de 1/12° entre 40°S y 40°N y 0.04° en adelante (hasta los polos), mientras que la resolución temporal de los datos es de 3 horas. Se obtiene, el GOFS 3.1, como resultado del Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), y del Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCONDA).

[11] Referencia: https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00765
[12] Referencia: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&task=results?option=com_csw&view=details&product_id=NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009
[13] Referencia: https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/reanalysis

4.2.1.2 Corrientes de marea

TPXO9-atlas[14]

TPXO conforma una serie de modelos globales de corrientes oceánicas. El TPXO9-atlas posee una resolución espacial global de 1/30°, fruto de la integración de la base; del modelo, global TPXO9.v1, con una resolución espacial de 1/6°, con 30 modelos regionales, de resolución 1/30°, en toda la costa, incluído el Ártico y Antártico. Los modelos TPXO proven de datos de corrientes de marea generadas a partir de las componentes armónicas de esta. Los datos poseen una resolución temporal horaria.

4.2.2 Vientos

ERA5[15]

ERA5 es un reanálisis que abarca desde 1979 hasta en torno a 5 días de tiempo real; la actualidad, que proporciona estimaciones, con una resolución temporal horaria, de un gran número de variables climáticas: atmosféricas, terrestres y oceánicas. ERA5 combina una extensa cantidad de observaciones históricas, de satélites o in situ; proporcionadas por la World Meteorological Organization Information System (WMO WIS): boyas fijas, a la deriva, estaciones en barco, radares y datos de nieve. Los datos poseen una resolución espacial global de 31 km; en torno a 0.25°. Resuelve la atmósfera en 37 niveles o capas, hasta una presión de 0.01 hPa.

Los datos se encuentran disponibles en mallas globales o regionales, en un dominio que excede los limites del área de estudio en el mar del Norte. Se ha creado, por parte de IHCantabria, un script de Python que permite descargar las bases de datos en el ámbito del mar del Norte.

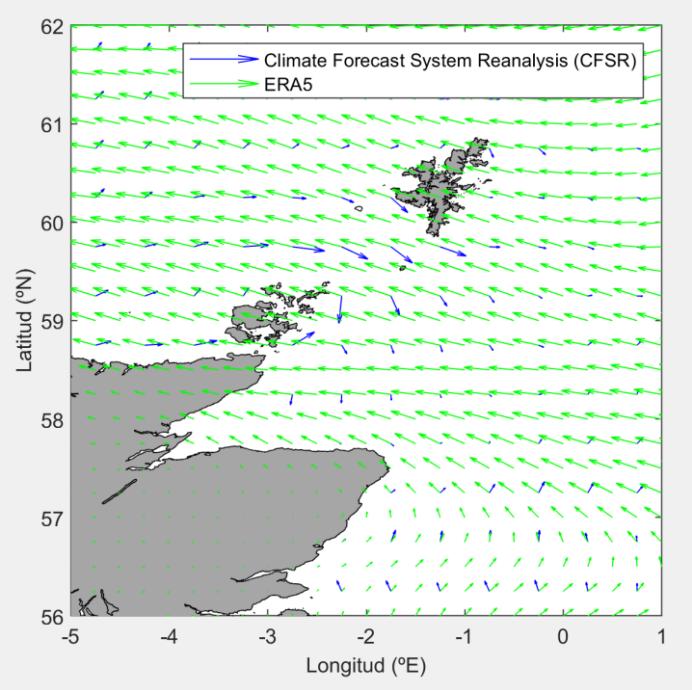


Figura 4.5 Bases de datos de corrientes; Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), y viento; ERA5. Detalle en torno a las islas Shetland, en Escocia. Elaboración propia.

[14] Referencia: https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas
[15] Referencia: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview

4.3 MODELO DE TRANSPORTE Y DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS TESEO

El desastre del *Prestige* puso en evidencia la necesidad de mejorar la oceanografía operacional; medidas y muestreos en océanos, mares y atmósfera, así como su difusión e interpretación, en España. El Ministerio de Educación y Ciencia, ante la reacción de la comunidad oceanográfica española a este desastre, aprobó en 2004 un proyecto encaminado al desarrollo e implementación de productos en el marco de la oceanografía operacional, así como el diseño de un protocolo adecuado para su uso en emergencias en el mar. Este proyecto se conoce con el nombre de ESEOO; Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional. El sistema consta de varias aplicaciones basadas en modelado numérico y análisis de datos oceanográficos, históricos y en tiempo real. Entre estas aplicaciones se encuentra el desarrollo de una serie completa de modelos para simular los procesos de transporte o suerte de un derrame de hidrocarburos. Estos modelos se integran en un sencillo sistema operacional que se conoce como Modelo de Transporte de ESEOO o TESEO (Abascal et al., 2007; Abascal et al., 2008; Alvarez-Fanjul et al., 2007).

TESEO es un modelo numérico 3D, desarrollado por IHCantabria, para simular el transporte y envejecimiento de un derrame de hidrocarburos, así como la deriva de objetos flotantes y personas en el medio marino, tanto a escala regional: alta mar, como local: puertos, bahías y estuarios. Se compone de un módulo de transporte y otro de envejecimiento de hidrocarburo, acoplados a un modelo de campo cercano para simular explosiones en profundidad (Abascal et al., 2008).

Módulo de transporte

Deriva del modelo lagrangiano bidimensional PICHI, desarrollado por la Universidad de Cantabria como parte de un sistema de predicción operacional creado en respuesta al desastre del *Prestige* (Castanedo et al., 2006). El proceso de deriva del derrame se representa en base al seguimiento de una nube de partículas, transportadas (cada partícula) de forma independiente, que representa la mancha del hidrocarburo. En cada paso de tiempo, la nueva posición de las partículas se obtiene como la suma de los transportes inducidos por el flujo medio, las mareas, el viento, oleaje y la dispersion turbulenta (Abascal et al., 2007).

El modelo numérico resuelve la siguiente ecuación

$$\frac{d\overrightarrow{x_i}}{dt} = \overrightarrow{u_a}(\overrightarrow{x_i}, t) + \overrightarrow{u_d}(\overrightarrow{x_i}, t)$$

$\overrightarrow{x_i}$: posición de la partícula
$\overrightarrow{u_a}$: es la velocidad advectiva de la partícula en la coordenada xi, y
$\overrightarrow{u_d}$: es la velocidad difusiva en xi

Por su parte $\overrightarrow{u_a}$ se obtiene como la combinación lineal de la velocidad de la corriente y el viento, y la deriva de Stokes inducida por el oleaje.

$$\overrightarrow{u_a} = \overrightarrow{u_c} + C_D\overrightarrow{u_w} + C_H\overrightarrow{u_H}$$

$\overrightarrow{u_c}$: es la velocidad superficial de la corriente
C_D: es el coeficiente de arrastre del viento
$\overrightarrow{u_w}$: es la velocidad del viento, 10 m sobre la superficie del mar
C_H: es el coeficiente del oelaje, y
$\overrightarrow{u_H}$: es la deriva de Stokes producida por el oleaje

$\overrightarrow{u_H}$ se obtiene por medio de la ecuación en Dean and Dalrymple (1991)

$$\overrightarrow{u_H} = \frac{gH}{8c}$$

g: aceleración de la gravedad
H: es la altura de ola significante, y
c: es la celeridad de la onda asociada al período med

La velocidad difusiva o de difusión turbulenta se obtiene por medio de la simulación de Montecarlo en el rango de las velocidades $[-\overrightarrow{u_d}, \overrightarrow{u_d}]$ que se asumen proporcionales a los coeficientes de difusión.

$$|\overrightarrow{u_d}| = \sqrt{\frac{6D}{\Delta t}}$$

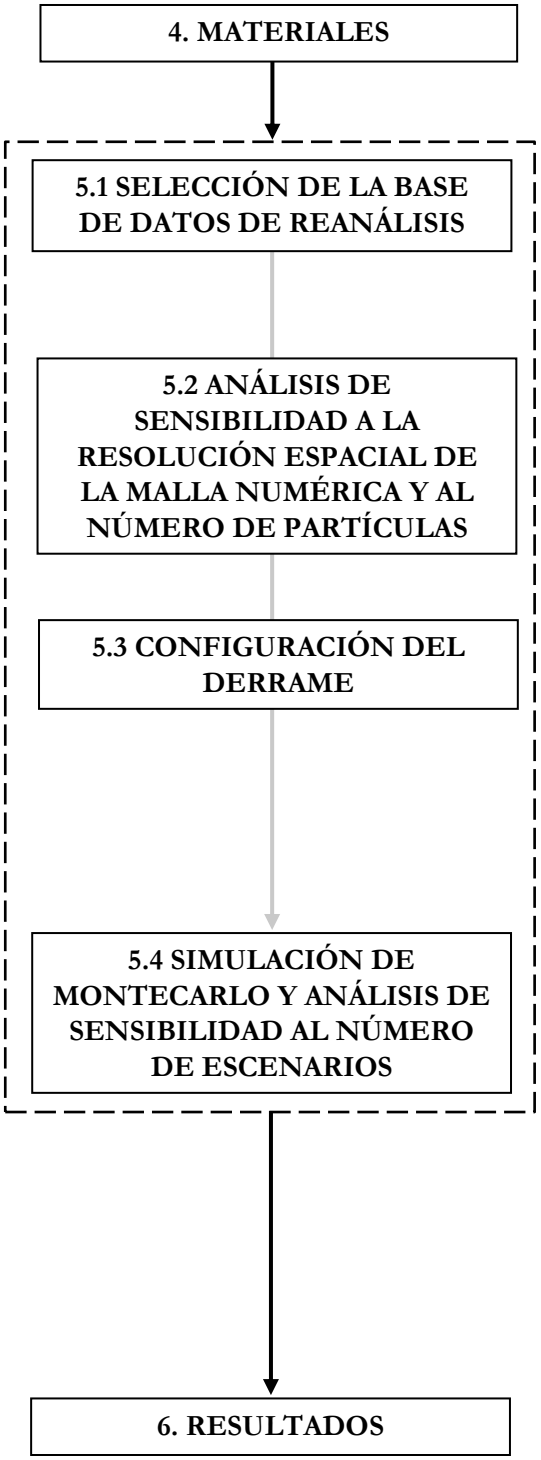
D: coeficiente de difusión horizontal, en el rango de 1-100 m2/s (ASCE, 1996)

El modelo de transporte TESEO ha sido calibrado y validado mediante la utilización de boyas de deriva lanzadas durante el accidente del Prestige y en diferentes ejercicios de lucha contra la contaminación realizados por Salvamento Marítimo (Abascal et al., 2007).

Módulo de evejecimiento

El módulo de envejecimiento incluye el proceso de spreading de la mancha bajo fuerzas de gravedad y viscosas, la evaporación de la mancha de los componentes más ligeros del derrame, la dispersión de agua en la mancha del derrame dando lugar a emulsión y el cambio de propiedades fisicoquímicas. La dispersión de la mancha de hidrocarburo se estima por medio de la fórmula de Fay (Fay, 1971); su evaporación, gracias al modelo analítico de Stiver y MacKay (1984); la ley de la tasa de primer orden, propuesta por MacKay et al., (1980) se usa para calcular la emulsión o incorporación de agua por parte de la mancha de hidrocarburo. Se considera, igualmente, el proceso de varado, cuando una partícula alcanza la costa se considera atrapada y no se vuelve a incluir en el mar, y los cambios en la propiedades fisicoquímicas debido a los procesos de envejecimiento de la sustancia. (Abascal et al., 2017a, Abascal et al., 2017b). El modelo ha sido validado en anteriores estudios (Abascal et al., 2007; Abascal et al., 2009a; Abascal et al., 2009b; Castanedo et al., 2014).

5. MÉTODOS



5.1 Selección de la base de datos de reanálisis

Selección de la base de datos de reanálisis que mejor representa las corrientes; forzamiento del transporte de la mancha de hidrocarburos, en el área de aplicación de la metodología.

5.2 Análisis de sensibilidad del modelo numérico a la resolución espacial de la malla numérica y al número de partículas

Selección de la resolución espacial de la malla numérica y el número de partículas que permitan representar de forma precisa concentraciones de la mancha de hidrocarburos sobre un umbral.

5.3 Configuración del derrame

Configuración de los parámetros necesarios en la ejecución del modelo numérico, aplicado a un hipotético derrame accidental de hidrocarburo en el mar del Norte; con base en los resultados obtenidos en 5.1 y 5.2.

5.3.1 Acoplamiento columna de agua-superficie.

5.4 Simulación de Montecarlo y análisis de sensibilidad al número de escenarios

5.4.1 Análisis estocástico; simulación de *n* escenarios con base en el método de Montecarlo.

5.4.2 Análisis estadístico del resultado de las *n* simulaciones de Montecarlo.

5.4.3 Análisis de sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios; selección del número de escenarios que asegure la precisión en el resultado último de la metodología, sin comprometer el tiempo de ejecución del modelo numérico.

5.1 SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE REANÁLISIS

Es objetivo específico de este trabajo escoger la base de datos de reanálisis que mejor representa las corrientes; forzamiento del transporte de la mancha de hidrocarburos, en el área de aplicación de la metodología.

El resultado de un modelo numérico depende, en buena parte, de la precisión, o error en su medida, de los datos de entrada al mismo. El uso de distintas bases de datos meteoceánicas; distintas fuentes de forzamientos, como dato de entrada al modelo, puede afectar al transporte de la mancha de hidrocarburos, resultado de este. Esto no debiera suceder, dado que todas ellas reproducen la misma variable: corrientes, en un mismo espacio: mar del Norte, en un mismo período de tiempo. Con objeto de evitar estas posibles diferencias, se lleva a cabo un proceso de validación de las bases de datos con el propósito de escoger la que mejor representa las condiciones oceánicas en el área de estudio. Para esto, se comparan las bases de datos con mediciones in situ que proceden de boyas fijas ubicadas en diferentes puntos del mar del Norte.

Estas mediciones in situ se extraen del In Situ Thematic Assembly Centre (INS TAC)[16], parte de Copernicus Marine Service (CMEMS) que procura acceso constante y fiable, a una serie de parámetros esenciales; entre ellos, corrientes, que se emplean en la inicialización, forzamiento y validación de modelos numéricos de océano. Estos parámetros se crean a partir de la recopilación de observaciones oceánicas, tanto in situ: en la columna de agua, como de satélite. Se hace uso de todos los datos disponibles, aunque esta información es escasa. Únicamente se dispone de datos de corrientes en 3 boyas (Figura 5.1). No se dispone de información cercana al hipotético punto de derrame.

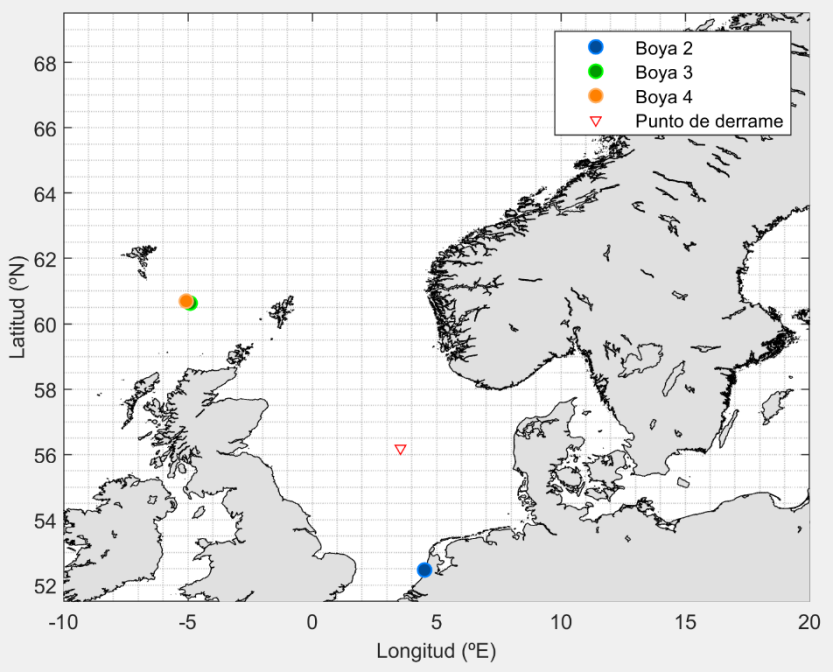


Figura 5.1 Boyas empleadas en el proceso de validación. El triángulo rojo indica la ubicación del hipotético punto de derrame. Elaboración propia.

[16] Referencia: https://marine.copernicus.eu/about-us/about-producers/insitu-tac/

Todas las bases de datos de reanálisis se componen de series temporales largas, del orden de décadas; adecuadas para su caracterización estadística. La resolución espacial de sus datos varia entre 1/2°, en el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), y 1/15°, en el NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS].

En este trabajo, el proceso de validación se aplica únicamente a los datos de corrientes. No obstante, los datos de entrada de viento afectan de igual modo al resultado del modelo y, al igual que sucede en el caso de las corrientes, existen diversas fuentes de las que extraer la información de viento. Pese a ello, para este trabajo se considera que tanto la resolución espacial; 0.25°, como temporal; horaria, de la base de datos de reanálisis de viento: ERA5 es adecuada para el modelado.

El proceso de validación se aplica a las 3 bases de datos de reanálisis: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS] y Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1 [HYCOM], que se comparan con las mediciones in situ de corrientes en 3 boyas. No obstante, por claridad en el documento, se muestran únicamente los resultados de la comparación entre la base de datos: CFSR y la boya fija número 2; boya costera.

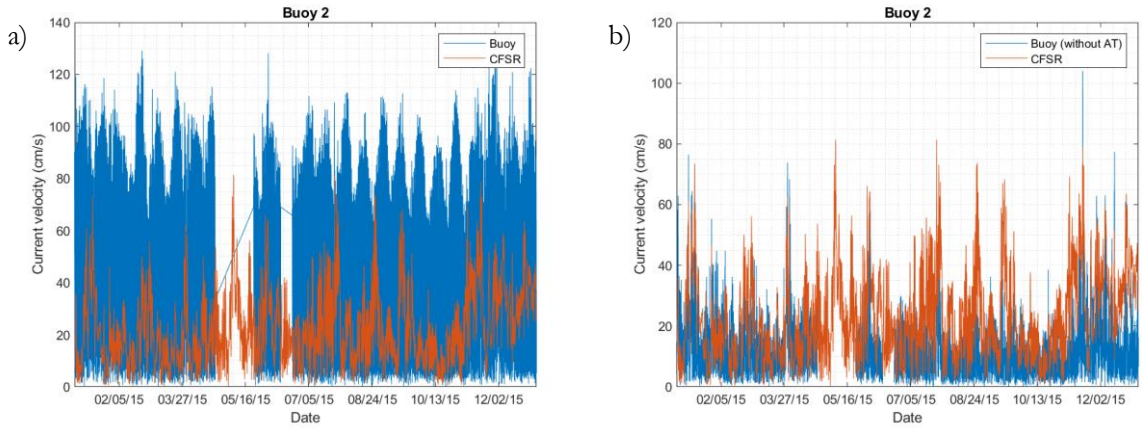


Figura 5.2 Serie de datos de corrientes de CFSR y a) datos brutos de la boya 2; considera las corrientes de marea; b) datos procesados de la boya 2; sin marea astronómica. Elaboración propia.

La figura 5.2 presenta la comparación entre CFSR, en rojo, y la serie de datos de la boya, en azul, para las corrientes en el año 2015. La figura 5.2 a) muestra la comparación entre los datos brutos de la boya, que considera las corrientes de marea, y los de CFSR, que no lo hace. Por su parte, la figura 5.2 b) muestra la misma comparación sin considerar, en esta ocasión, las corrientes de marea en los datos de la boya. El análisis pone de manifiesto la importancia de la marea en las corrientes del mar del Norte. Es preciso mencionar que, por lo general, las bases de datos de reanálisis, regionales o globales (p. ej., CFSR), no recogen las corrientes de marea. Es necesario, por tanto, añadir estas corrientes desde la base de datos TPXO9-atlas.

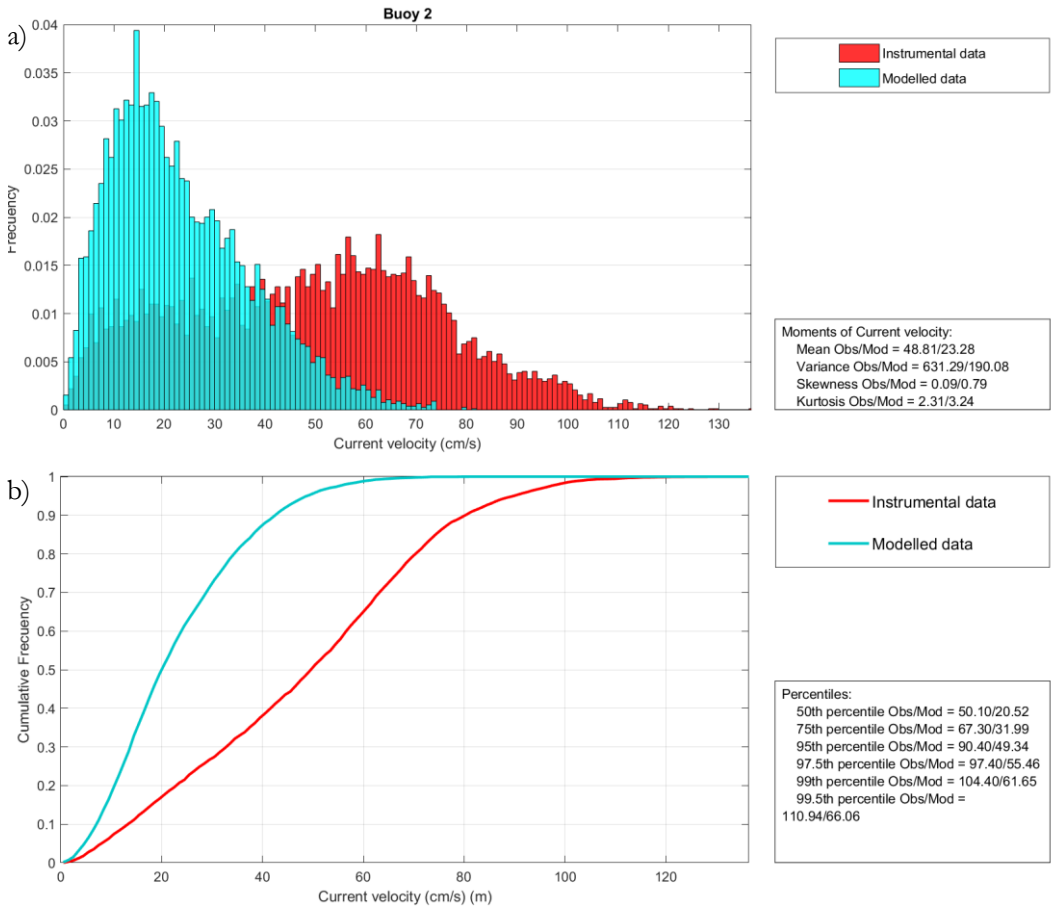


Figura 5.3 a) Función de densidad de probabilidad y b) función de distribución acumulada de los datos brutos de corrientes de la boya 2 («Instrumental data») y de CFSR («Modelled data»). Elaboración propia.

La figura 5.3 presenta la función de densidad de probabilidad y de distribución acumulada para el caso que se muestra en la figura 5.2 a). En la figura 5.3 a) se observa una menor dispersión de los datos en la base de datos de reanálisis («Modelled data», en azul), que no considera las corrientes de marea, en comparación con los datos brutos de la boya («Instrumental data», en rojo), que sí lo hacen. El valor promedio de las corrientes es mayor en el caso de la boya, 48.81 cm/s, frente a los 23.28 cm/s de CFSR. Por su parte, en la figura 5.3 b) únicamente un 10 % de los datos de reanálisis, es igual o superior a 40 cm/s, mientras que el 60 % de la serie de datos brutos de la boya supera este valor. Por todo ello, no considerar las corrientes de marea, añadidas a las bases de datos de reanálisis, puede conducir a subestimar el transporte de la mancha de hidrocarburos; por tanto, a una mala planificación o respuesta ante un derrame, puesto que la mancha alcanzará zonas que no se reflejan en nuestro resultado.

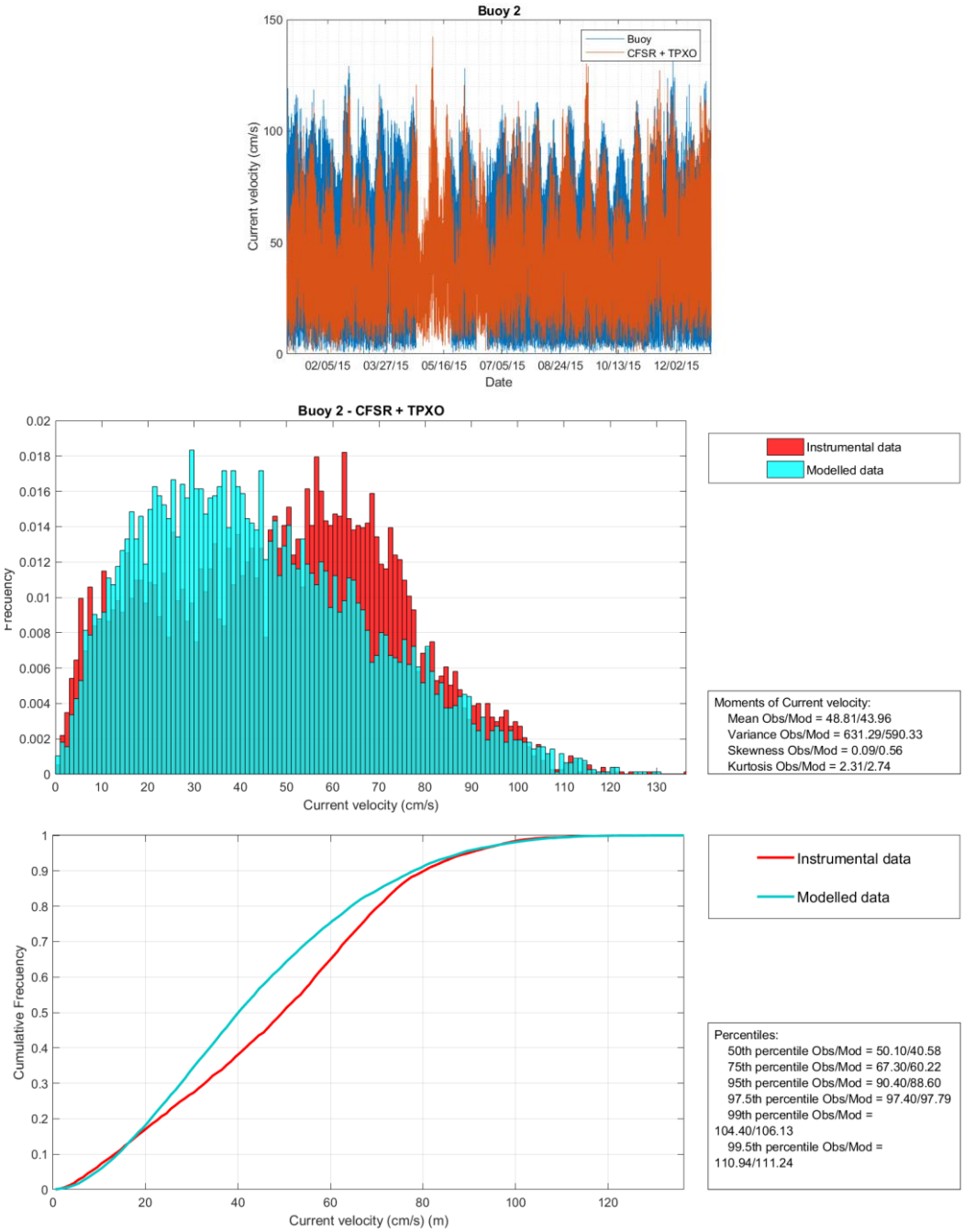


Figura 5.4 Proceso de validación de CFSR + TPXO9-atlas («Modelled data»); con los datos brutos de la boya 2 («Instrumental data»). Elaboración propia.

La figura 5.4 muestra el resultado del proceso de validación de CFSR, al que se ha añadido la marea; TPXO9-atlas, con los datos brutos de la boya 2. Se aplica el mismo proceso al resto de bases de datos y boyas. En todos los casos se observa como las diferencias se reducen cuando se considera la marea. Por tanto, se añade TPXO9-atlas a las bases de datos de reanálisis y se validan por medio de diferentes estadísticos: Bias o RMSE.

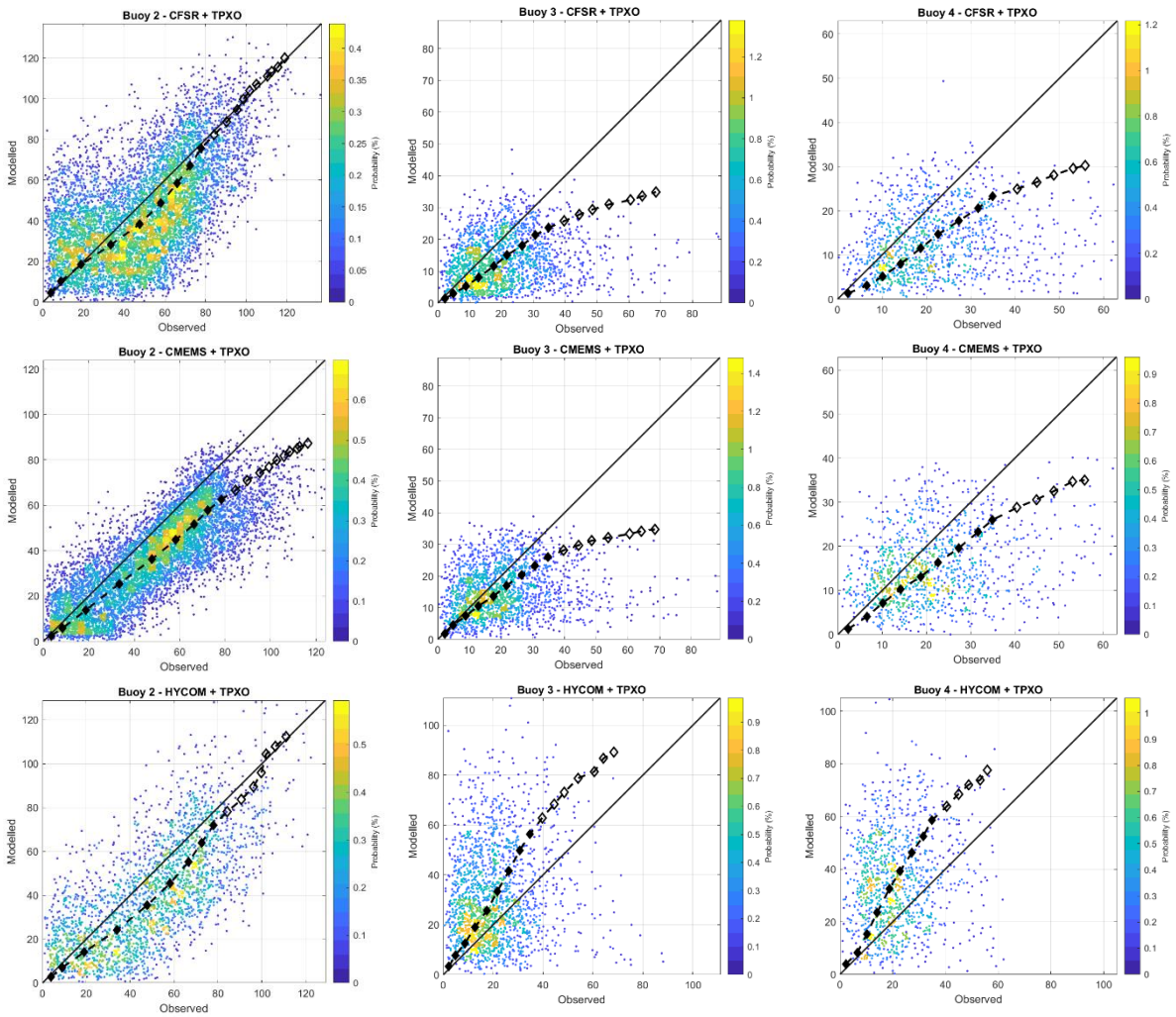


Figura 5.5 Análisis estadístico de las bases de datos de reanálsis.

Tabla 5.1 Análisis estadístico de las bases de datos de reanálisis.

	CFSR + TPXO9-atlas	CMEMS + TPXO9-atlas	HYCOM + TPXO9-atlas
BIAS*	6.78	7.48	11.12
RMSE	17.98	15.63	23.43

* En valor absoluto

El proceso de validación de las bases de datos de reanálisis subraya la importancia de las corrientes de marea en el transporte de un hipotético derrame de hidrocarburos en el mar del Norte.

Para el período de tiempo analizado (2015), el análisis estadístico concluye que:

i. HYCOM + TPXO9-atlas sobreestima el valor de las corrientes en las boyas en alta mar.
ii. La base de datos de Climate Forecast Reanalysis System (CFSR) + TPXO9-atlas ofrece el mejor ajuste respecto de la boya costera; boya 2. Para las boyas ubicadas en alta mar u *offshore* los resultados que se obtienen con Climate Forecast Reanalysis System (CFSR) + TPXO9-atlas y NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS] + TPXO9-atlas son similares. Ni CFSR+ TPXO9-atlas ni CMEMS+ TPXO9-atlas ofrecen un buen ajuste de los valores extremos de corrientes medidos en las boyas *offshore*.
iii. De acuerdo con el análisis estadístico tanto NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS] + TPXO9-atlas como Climate Forecast Reanalysis System (CFSR) + TPXO9-atlas ofrecen un mejor ajuste.

NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS] es una base de datos de reanálisis regional, con una mayor resolución espacial en sus datos, lo que la hace preferible frente a Climate Forecast Reanalysis System (CFSR). No obstante, la resolución temporal diaria de NORTHWESTSHELF_REANALYSIS_PHY_004_009 [CMEMS] hace necesaria la interpolación de sus datos; a una resolución horaria, para poder añadirle las corrientes de marea (TPXO9-atlas). En el momento de seleccionar la base de datos de reanálisis de corrientes a aplicar en la metodología que presenta este trabajo, la herramienta de procesado; interpolación, de estos datos (un script de Python) no estaba lista. Por tanto, se aplica en la metodología la base de datos de Climate Forecast Reanalysis System (CFSR) + TPXO9-atlas.

5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A LA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE LA MALLA NÚMERICA Y AL NÚMERO DE PARTÍCULAS

Como se menciona en el capítulo 1, una de las limitaciones que presentan las herramientas que se emplean en el presente en la lucha contra la contaminación por derrames accidentales de hidrocarburos en el litoral y medio marino, es la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales. Se persigue que la presente metodología para la evaluación de peligrosidad de contaminación requiera del menor tiempo de ejecución del modelo numérico posible, sin perder precisión en el resultado: que sea práctica.

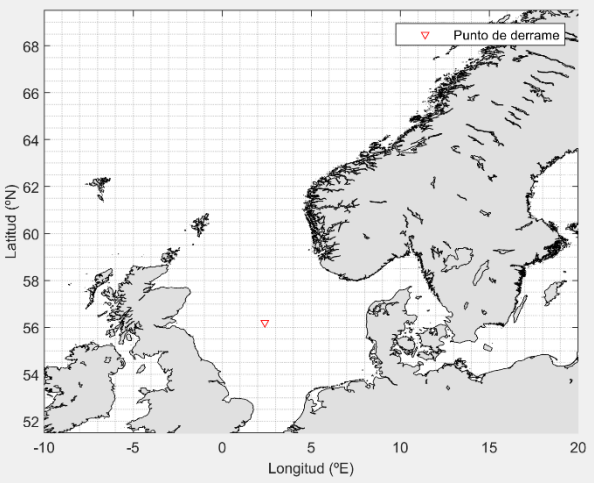
La resolución espacial; el tamaño de celda, de la malla numérica incide en la precisión en el resultado del modelo numérico. La precisión aumenta con la resolución de la malla. Por consiguiente, en lo que respecta a la precisión, la solución óptima es considerar una resolución espacial de la malla infinitamente grande. Esto es, un tamaño de celda infinitamente pequeño. Igualmente, el número de partículas, en la simulación numérica, repercute en la nitidez de la nube de estas, que representa la mancha de derrame. Por esto, se consigue una mejor resolución de la nube para un mayor número de partículas. El óptimo, de nuevo, en un número infinito. No obstante, ello aumenta de manera notable el tiempo de ejecución del modelo numérico; la capacidad de cálculo necesaria. Es por tanto preciso, encontrar la resolución espacial de la malla numérica, así como el número de partículas, que aseguren la precisión en el resultado por encima de un umbral y la nitidez de la mancha de derrame, sin comprometer el tiempo de ejecución del modelo numérico.

A tal efecto se conduce un análisis de sensibilidad del área de la mancha de derrame, para un derrame puntual en superficie o 2D, a la resolución espacial de la malla númerica, así como al número de partículas empleado en la simulación, para distintos volúmenes derramados. Se considera, en el análisis, un umbral[17] de masa de producto por unidad de área en cada celda de 0.25 g/m^2, de modo que únicamente se contabiliza el área de una celda si esta encierra una cantidad de derrame por encima de 0.25 g/m^2. Es preciso conocer el número mínimo de partículas que permite detectar, en una celda, una cantidad de derrame inferior a este umbral. Este número depende de la densidad del hidrocarburo, del volumen derramado, de la resolución espacial de la malla o del umbral escogido.

En el presente estudio se han empleado volúmenes en un rango de 15 a 5 000 m^3. No obstante, por claridad del documento, se muestran únicamente los resultados para el caso de 5 000 m^3. En la tabla 5.2 se presenta la configuración del derrame.

[17] En el capítulo 6 se detallan los motivos y razones que acompañan la aplicación de un cierto umbral.

Tabla 5.2 Configuración del derrame.

Localización del punto de derrame:	
	Latitud: 56.2° N Longitud: 2.4° E Profundidad: 0 m
Características del derrame:	
Derrame puntual; de volúmenes entre los 15 y los 5 000 m^3/día. Duración del derrame: instantáneo, con una posterior deriva; de la última partícula derramada, de 30 días (o un mes), para un tiempo total de simulación de 30 días.	
Propiedades físicas del hidrocarburo:	
Densidad (a 20 °C)	840 kg/m^3
Viscosidad kinemática (a 38 °C)	19.6 cSt
Evaporación máxima	50 %
Evaporación minima	0 %
Emulsión máxima	90 %
Propiedades del medio:	
Temperatura de la superficie del mar	16 °C
Temperatura del aire (a 2 m de la superficie libre del agua)	16 °C
Densidad del agua del mar	1027 kg/m^3

En primer lugar, se somete a análisis el efecto de la resolución espacial de la malla numérica en el valor del área de la mancha de hidrocarburos, resultado del modelo numérico, por encima del umbral de 0.25 g/m^2. Se crea un script de MATLAB que permite obtener el área de la mancha de derrame en cada paso de tiempo. Se obtiene, por cada tamaño de celda (entre 0.001 y 0.2°), el área de la mancha para una serie de números de partículas (entre 50 y 100 000); a lo largo del período de deriva de esta (30 días). El valor óptimo de la resolución se logra cuando se consigue la estabilización del modelo; esto es, cuando el área de la mancha es independiente del tamaño de celda.

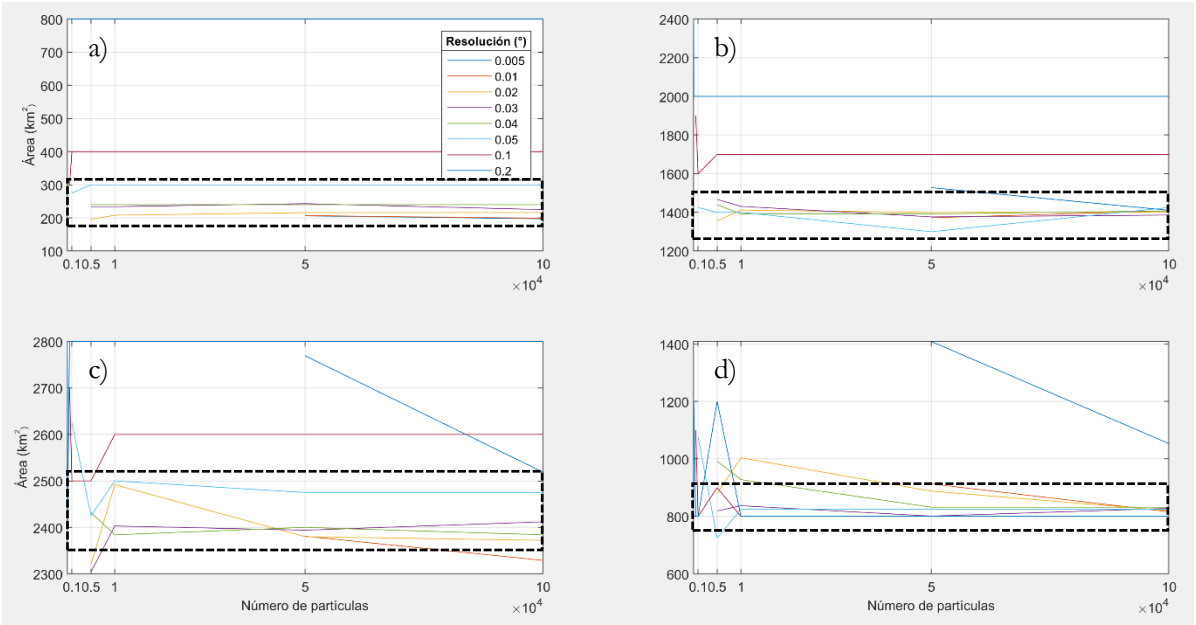


Figura 5.6 Área de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de 0.25 g/m^2; a) 1, b) 10, c) 20 y d) 30 días de deriva de la mancha, para una serie de números de partículas entre 50 y 100 000. Elaboración propia.

El resultado de este primer análisis sugiere un rango de resolución de la malla numérica de entre 0.02 y 0.05°. Para ese rango se estudia el efecto del número de partículas, de nuevo en el el valor del área de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de 0.25 g/m^2, también a lo largo del período de deriva.

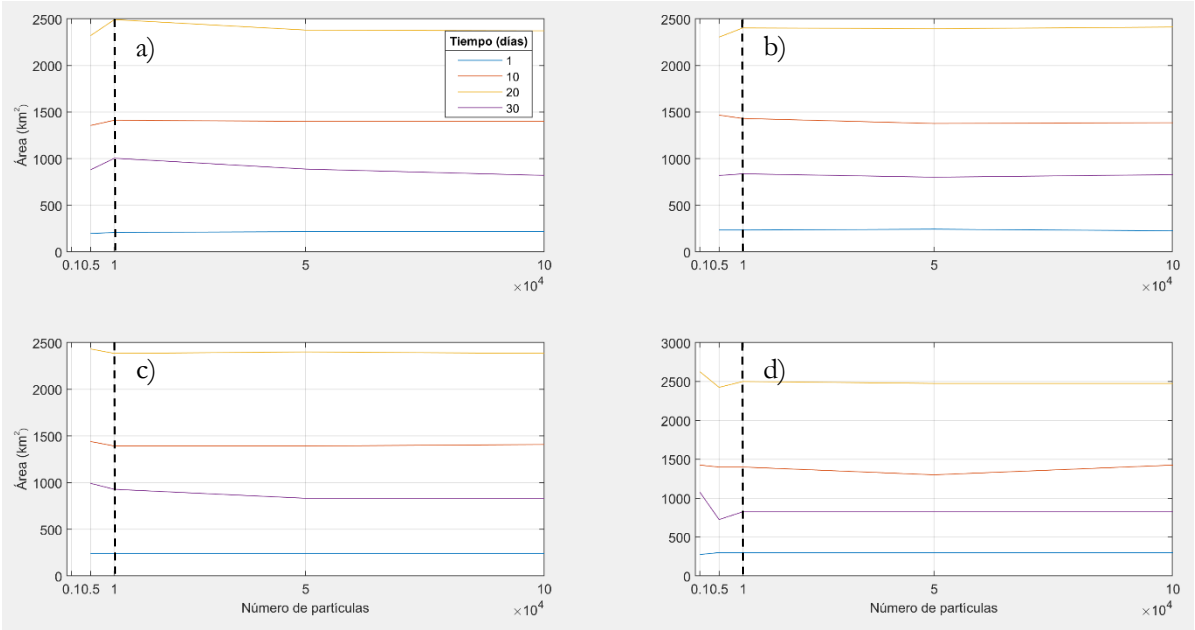


Figura 5.7 Área de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m²; a) 0.02, b) 0.03, c) 0.04 y d) 0.05° de resolución espacial de la malla numérica, para una serie de números de partículas (entre 50 y 100 000). Elaboración propia.

La figura 5.7 revela como el valor del área de la mancha de hidrocarburos se estabiliza a partir de las 10 000 partículas, número que se considera óptimo.

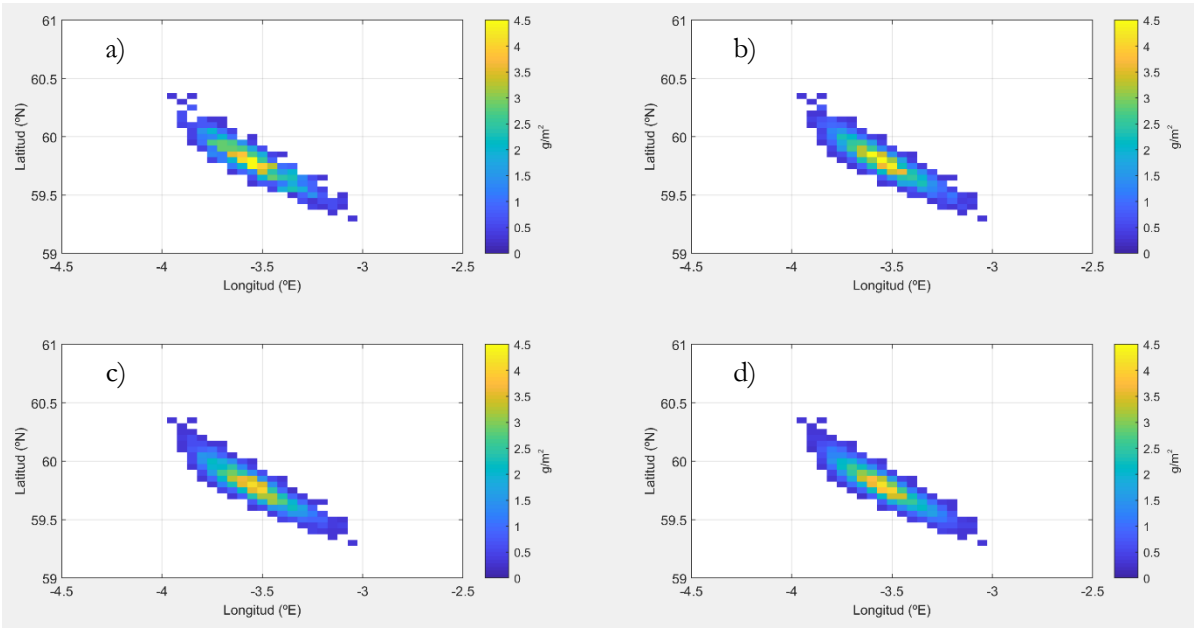


Figura 5.8 Mapas de concentración de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m2 para: a) 1 000, b) 5 000, c) 10 000 y d) 50 000 partículas, tras 20 días de deriva. Elaboración propia.

Por su parte, la figura 5.8 muestra como, visualmente, no se pierde información en el área de la mancha a partir de las 5 000 partículas; siendo esa pérdida pequeña para 1 000. Por último, la figura 5.9 analiza el error; en el valor del área de la mancha, en que se incurre si se considera una simulación con un número n de partículas, en relación al óptimo considerado de 10 000 partículas.

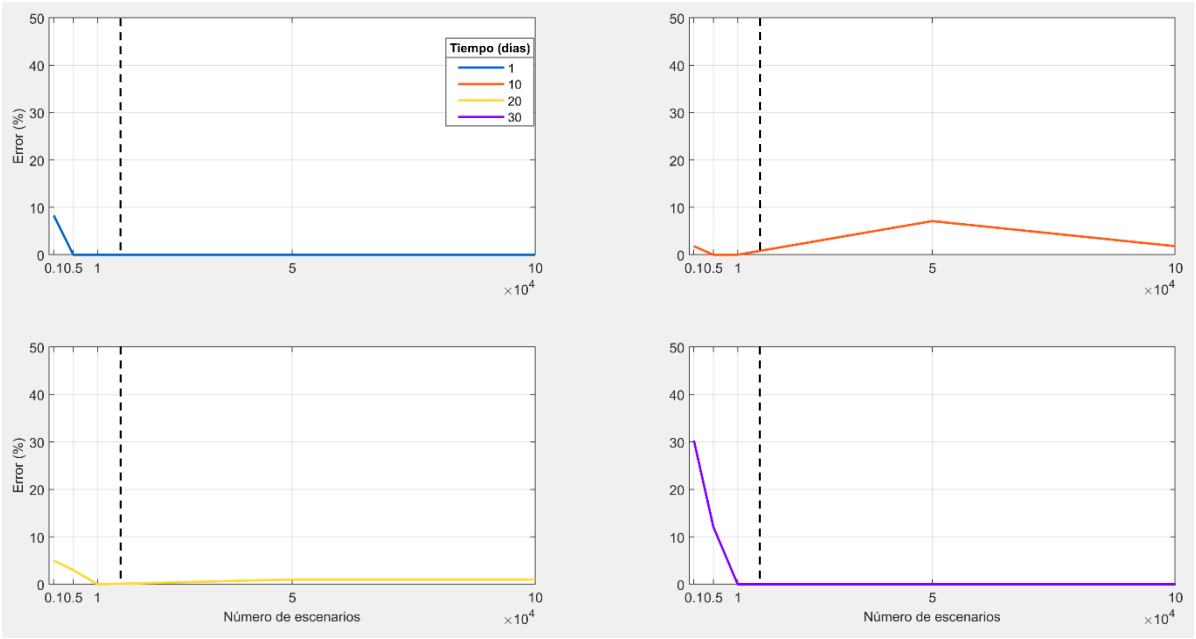


Figura 5.9 Error en el área de la mancha de hidrocarburos por encima del umbral de 0.25 g/m2 respecto del valor óptimo de 10 000 partículas. Elaboración propia.

La figura 5.9 muestra como el error se reduce conforme aumenta el número de partículas empleado en la simulación; hasta alcanzar el óptimo de 10 000 partículas. El error se mantiene por debajo del 10 %; incluso del 5 %, en los primeros 20 días de deriva del derrame, tanto en el caso de 1 000, como el de 5 000 partículas. Este error aumenta tras un período de 30 días. La dispersión de la mancha; de la nube de partículas que la forma, se hace mayor con el tiempo. Se obtiene un error del 30 %, para 1 000 partículas, y de 12 %, para 5 000. El resultado del análisis sugiere adoptar, en la simulación del modelo numérico, un número de partículas de 5 000. Esto aumenta el tiempo de ejecución, en comparación a una simulación de 1 000 partículas; más aún considerado el posterior análisis de Montecarlo del capítulo 5.4. Por esto, dado el tiempo del que se dispone en la realización del presente trabajo, se ha optado por aplicar en el desarrollo de la metodología un número de partículas igual a 1 000.

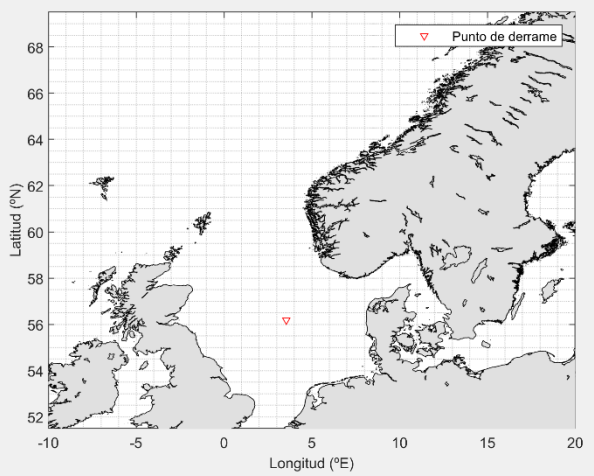
5.3 CONFIGURACIÓN DEL DERRAME

Con objeto de comparar el resultado final de la metodología; el mapa de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua, con el obtenido por Chiri (2020), se ha tomado su mismo punto de derrame, de coordenadas [56.187°N 3.55°E], a una profundidad de 71 m.

Se ha optado; resultado del análisis de sensibilidad del modelo númerico a la resolución espacial de la malla numérica y al número de partículas, del capítulo 5.2, por una resolución espacial de la malla numérica de 0.05°, así como un número de partículas de 1 000. Se considera un derrame de 5 000 m^3 al día; con base en los ejemplos de la literatura (Capítulo 1). Se considera, además, una duración del derrame de 15 días, con una posterior deriva; de la última partícula derramada, de 31 días (o un mes), para un tiempo total de simulación de 46 días.

Las propiedades físicas del hidrocarburo se han tomado del producto BRENT, OIL & GAS, de la base de datos del modelo Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS)[18]; modelo de envejecimiento de hidrocarburos en el medio marino de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). El producto BRENT, OIL & GAS tiene una densidad de 841 kg/m^3 a 15 °C y una viscosidad kinemática de 14.8 cSt a 15 °C. Los datos de evaporación máxima, mínima y emulsión máxima, se han tomado de la base de datos del modelo numérico TESEO, de acuerdo con el producto más parecido al BRENT, OIL & GAS del ADIOS. Este producto es el Brent Blend, con un 45, 0 y 90 % respectivamente. Por su parte, las propiedades del medio; el agua del mar del Norte, se han tomado del ICES Report on Ocean Climate 2018 (González-Pola et al., 2018); una temperatura de la superficie del mar de 10.2°C, del aire, a 2 m de la superficie libre del agua, de 10.2°C y una salinidad de 32 ppt. Se ha obtenido la densidad del agua del mar del Norte por medio de la ecuación de estado de la UNESCO (1981); densidad a partir de la salinidad, la temperatura y la presión (de 2 m H_2O), igual a 1024.58 kg/m^3.

Tabla 5.3 Configuración del derrame.

Localización del punto de derrame:		
	Latitud	56.187° N
	Longitud	3.55° E
	Profundidad	71 m
	Características del derrame:	
	Explosión en profundidad. Derrame continuo de 5 000 m3/día. Duración del derrame de 15 días, con una posterior deriva; de la última partícula derramada, de 31 días (o un mes), para un tiempo total de simulación de 46 días.	
	Propiedades físicas del hidrocarburo:	
	Densidad (a 15 °C)	841 kg/m^3
	Viscosidad kinemática (a 15 °C)	14.8 cSt
	Evaporación máxima	45 %
	Evaporación minima	0 %
	Emulsión máxima	90 %
	Propiedades del medio:	
	Temperatura de la superficie del mar	10.2 °C
	Temperatura del aire (a 2 m de la superficie libre del agua)	10.2 °C
	Salinidad	32 ppt
	Densidad del agua del mar	1024 kg/m^3

[18] Referencia: https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/adios.html

Es imperativo citar que las propiedades del medio se han tomado según el valor promedio de una serie de medias anuales que abarca los últimos 50 años de datos. Estos valores se mantienen constantes en cada simulación numérica, con independencia de la fecha de inicio del derrame, si es verano o invierno; así como de su variabilidad en el tiempo, a lo largo de los años; o el espacio, si nos encontramos al norte o al sur de la plataforma continental del mar del Norte. Ello repercute en el resultado del modelo numérico; en los procesos de transporte y envejecimiento de la mancha de hidrocarburos, más aún dado el carácter estocástico del estudio; que persigue representar la variabilidad del clima.

5.3.1 Acoplamiento columna de agua-superficie

Por último, es preciso determinar el tamaño inicial de la mancha de derrame en superficie, como dato de entrada al modelo numérico. Para ello, se conduce un pequeño análisis de acomplamiento columna de agua-superficie. Se comenta en el capítulo 1 que, pese a no ser un modelo numérico de campo cercano, el modelo 3D de transporte y envejecimiento de hidrocarburos TESEO, considera alguno de los procesos que tienen lugar en él: la distribución del tamaño de las partículas de hidrocarburo que se genera en una explosión en profundidad y el efecto de los dispersantes que se emplean para combatirlo.

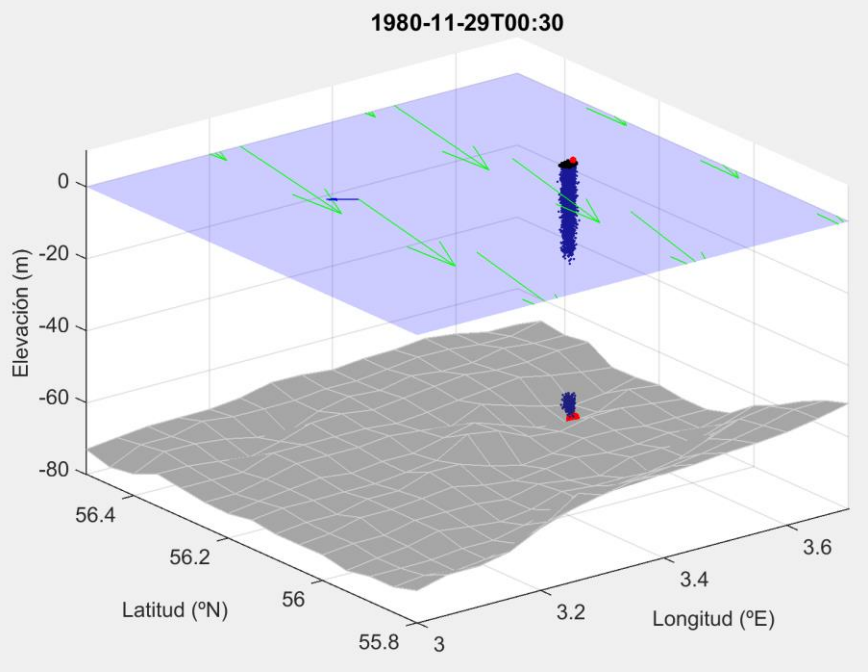


Figura 5.10 Instantánea de las partículas en la columna de agua; derrame con la configuración que se muestra en la tabla 5.3. Elaboración propia.

Es importante representar correctamente la distribución del tamaño de las partículas de hidrocarburo, puesto que no todas alcanzan la superficie en el mismo tiempo. Las partículas ascienden desde el punto de derrame, en profundidad, a superficie por flotabilidad; diferencia de densidad entre las partículas y el agua de mar. Las partículas más pequeñas tardan más en alcanzar la superficie e incluso pueden quedar atrapadas en la columna de agua (Figura 5.10). Para determinar el tamaño inicial de la mancha de derrame en superficie, se representa la posición de las partículas para un incremento de tiempo «breve», de 1 minuto. Es preciso determinar el tamaño de la mancha antes que esta se vea forzada por el viento, lo que puede distorsionar su tamaño. En la columna de agua las partículas únicamente se encuentran forzadas por las corrientes. Pero, en el momento en que una partícula emerge a la superficie del agua, esta pasa a estar forzada, además de por la corriente de la capa superficial de agua, por el viento. Esto es, las partículas en la columna de agua no tienen por qué ser transportadas en la misma dirección que las que se encuentran en superficie.

Se considera que la mancha de derrame alcanza la superficie en un tiempo de 45 minutos y que su tamaño inicial es de; lado de un cuadrado, forma inicial de la mancha de derrame, 2960.7 m (espesor de 0.00057 m); figura 5.11 a).

En la figura 5.11 b) se aprecia como las partículas que aún se encuentran en la columna de agua, en azul, han sido transportadas por la corriente; flechas azules, hacia el oeste. Por su parte, las partículas negras, en superficie, han sido transportadas, además de por la corriente, por el viento; flechas verdes, hacia el sur. Los modelos numéricos 2D, o 3D que se limitan a colocar la mancha de derrame en superficie, sobre el punto de vertido, no consideran este efecto.

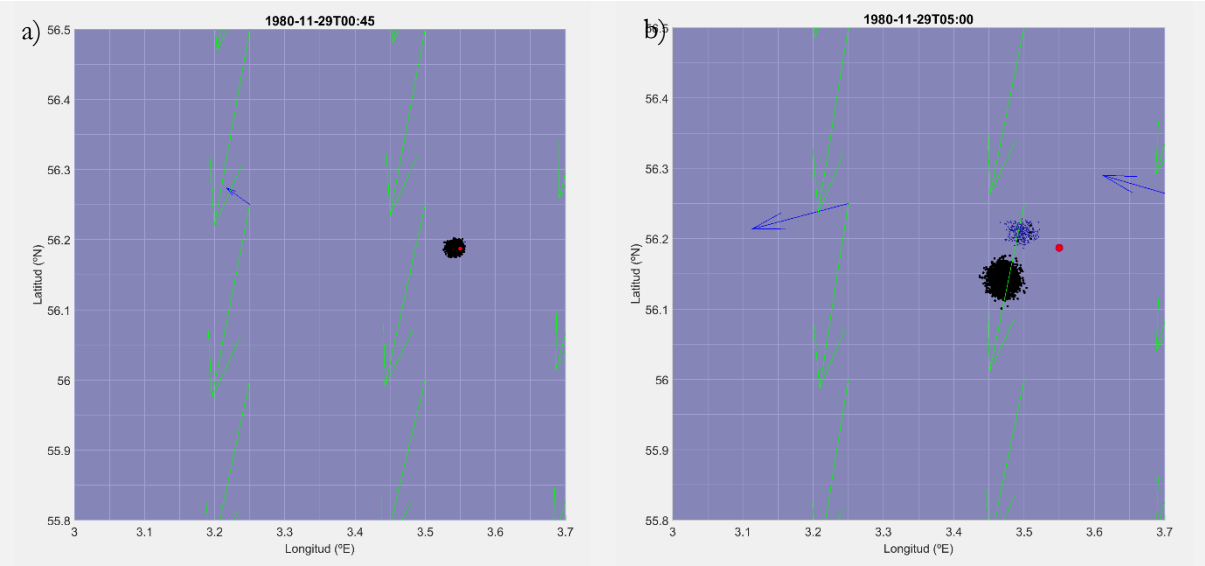


Figura 5.11 Instantáneas de la mancha de hidrocarburos luego de a) 45 minutos y b) 5 horas de producirse el derrame; derrame con la configuración que se muestra en la tabla 5.3. Elaboración propia.

5.4 SIMULACIÓN DE MONTECARLO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL NÚMERO DE ESCENARIOS

5.4.1 Simulación de Montecarlo

La simulación de Montecarlo es un método que permite estimar el valor de una magnitud desconocida aplicando los principios de la estadística inferencial[19]. Su invención se atribuye al matemático polaco Stanislaw Ulam, en los años 40, y se sustenta en la premisa de que una muestra aleatoria, no sesgada, tiende a mostrar las mismas propiedades que la población a la que pertenece. En nuestro caso, una muestra independiente se compone de un número *n* de escenarios; número finito *n* de fechas de inicio de la simulación numérica, por tanto, de forzamientos: corrientes y vientos, asociados a esas fechas, en tanto que la población aúna el universo de posibles escenarios. El universo de posibles escenarios, en el presente trabajo, se encuentra cercano a los 360 000 (41 años de datos, con una resolución temporal horaria).

La simulación de Montecarlo se basa, de igual modo, en la ley de los grandes números. En estadística, este teorema demostrado por primera vez por el matemático suizo Jakob Bernoulli en 1713, sostiene que en una muestra infinita formada por variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, de varianza finita, el promedio de *n* observaciones se acerca al promedio teórico de la muestra cuando *n* tiende a infinito, Bernoulli (1713). Esto es, en nuestro caso, la probabilidad «real»[20] de, p. ej., contaminación de la costa en un punto al azar de la misma, se obtiene considerando un número infinito, si los hubiere, de escenarios ambientales; no es el caso.

En su lugar, se dispone de una serie cuasi infinita; en torno a 360 000 escenarios. Lo apropiado, si la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales lo permitiese, sería ejecutar una simulación numérica por cada escenario; por tanto, ejecutar 360 000 simulaciones. No obstante, la simulación de cada uno de estos escenarios comporta un tiempo de ejecución[21], *t*, independiente, por lo que el tiempo de ejecución de los 360 000 escenarios sería igual a 360 000 x *t*. Luego, la simulación de un número cuasi infinito de escenarios no es práctica; con base en la capacidad de cálculo disponible en la actualidad. Por tanto, se aconseja encontrar un número *n* de escenarios, a partir del cual el resultado es independiente de *n*. Se propone, así, un análisis de sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios.

La simulación de Montecarlo permite, en suma, estimar el valor de, p. ej., la probabilidad de contaminación de la costa en un punto al azar de esta, partiendo de una muestra compuesta por un número *n* de escenarios, predeterminado por medio de un análisis de sensibilidad, para los que el promedio de su probabilidad sea cercano al teórico, siendo la muestra representativa de la población o universo de posibles escenarios.

Para aplicar la simulación de Montecarlo, es preciso conocer la distribución estadística de cada variable aleatoria o escenario. En nuestro caso, se trata de una distribución uniforme discreta, que considera un número finito de puntos en el espacio (o escenarios), en el intervalo [a,b] (fecha de inicio, fin, de la serie de datos), a los que se asigna una misma probabilidad de ser seleccionados. Por otra parte, es necesario generar una selección aleatoria de entradas a esa serie, un número *n* de veces, con base en la citada distribución. El número *n* de entradas incide en el resultado, puesto que la desviación típica se reduce (menor varianza de los datos) en la medida que se incrementa *n*. Pero, no se trata de una relación lineal, sino que se alcanza un valor de *n* por encima del cual la mejora es mínima. El análisis de sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios tiene por objeto encontrar este número. Luego, se simula numéricamente la selección de *n* entradas. Por último, se analiza estadísticamente el resultado de cada simulación independiente, pudiéndose estimar el error de salida de la simulación.

[19] La estadística inferencial nos permite inferir, deducir o sacar una conclusión, a nivel de población a partir del estudio de una muestra. Se desprende de la definición de «inferir»: deducir o sacar algo como conclusión de otra cosa. *Diccionario de la lengua española*. Referencia: https://dle.rae.es/inferir?m=form

[20] Se entiende por «real» la probabilidad de contaminación que se obtiene por medio de este para un número n cuasi infinito de escenarios.

[21] Tiempo que emplea el ordenador en hacer funcionar el modelo numérico; en ejecutar la simulación. Se desprende de la definición de «ejecutar»: pone ren funcionamiento un programa. *Diccionario de la lengua española*. Referencia: https://dle.rae.es/ejecutar?m=form

Se ha creado, por parte de IHCantabria, un script en Python que permite generar un número *n* de entradas seudoaleatorias a la serie de datos, a partir del módulo «random» de la librería estándar de este. La función «random()», dentro de la librería, emplea un método de muestreo seudoaleatorio simple con reemplazo, esto es, un elemento seleccionado de la muestra se considera nuevamente en la muestra en la siguiente selección. El script genera un número *n* de fechas de incio, en la serie de datos de escenarios, y descarga estos escenarios, produciendo un número *n* de simulaciones numéricas a partir de la configuración que se menciona en el capítulo 5.3. El script genera, igualmente, un lanzador[22] que las ejecuta en serie. Los números seudoaleatorios son generados por un algoritmo determinista, y no por un proceso aleatorio real; como, p. ej., la climatología. Un algoritmo determinista produce siempre la misma salida a partir de unas condiciones de partida o estado inicial, que se conoce con el nombre de «semilla». Esta inicializa el algoritmo generador de números aleatorios; Mersenne Twister en el caso de Python. La secuencia de números producida por «random()» se determina mediante la configuración interna del generador de números seudoaleatorios. Se puede controlar ese generador de números aleatorios compartidos mediando la función «seed()».

5.4.2 Análisis estadístico

El resultado último de la metodología se compone de los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos.

Con objeto de generar sendos mapas, es preciso preciso aplicar el siguiente análisis estadístico al resultado independiente de las *n* simulaciones del Montecarlo:

5.4.2.1 Probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua

Probabilidad de la i-ésima celda de la malla numérica de ser alcanzada por la mancha de hidrocarburos en el caso de producirse un hipótetico derrame accidental como el que se plantea en la aplicación de la presente metodología.

Si se considera una única simulación numérica; independiente[23], la probabilidad de contaminación de la i-ésima celda de su malla numérica es 0 si, concluído el tiempo de simulación, esta no contiene, o ha contenido, ninguna partícula de la nube que conforma la mancha de hidrocarburos. Por el contrario, la probabilidad es1 si la celda encierra, en alguno de los pasos de tiempo de la simulación numérica, al menos 1 partícula; de esta nube.

Por tanto, la probabilidad de contaminación acumulada de la i-ésima celda de la malla numérica, $P_{cont,i}$, se obtiene con base en la ecuación:

$$P_{cont,i} = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left(P_{o,n} \cdot PA_i\right)}{N}$$

$n = 1, \dots, N$: n-ésima simulación
N: número de simulaciones
$P_{o,n}$: probabilidad de ocurrencia de la n-ésima simulación
PA_i: variable binaria de presencia, ausencia; [1,0], de al menos 1 partícula en el interior de la i-ésima celda

El mapa de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua se genera con base en la probabilidad de contaminación acumulada de cada celda.

[22] Un archivo .bat, documento de procesamiento por lotes, contiene una serie de instrucciones MS-DOS (Windows), sus instrucciones son ejecutadas en la CoMmonD (CMD) o consola de Windows.
[23] Probabilidad de ocurrencia de 1.

5.4.2.2 Tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos

Es el tiempo empleado por la mancha de hidrocarburos en alcanzar la i-ésima celda de la malla numérica en el caso de producirse un hipótetico derrame accidental como el que se plantea en la aplicación de la presente metodología.

Se obtiene como el paso de tiempo en el que la i-ésima celda de la malla numérica es alcanzada por al menos 1 partícula.

Se genera una serie de scripts de MATLAB que resuelven este análisis estadístico.

El concepto de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua se aplica, previo a generar el mapa; resultado último de la metodología, en el análisis de sensibilidad del modelo numérico al número de escenarios.

5.4.3 Análisis de sensibilidad al número de escenarios

Se conduce un análisis de sensibilidad de la variable: probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua, al número de escenarios, con objeto de encontrar el número *n* para el que, un *n* mayor; que acarrea un aumento en el tiempo de ejecución total del modelo numérico (menos práctico), no implica una mejora notable en la precisión del valor de la probabilidad. La probabilidad acumulada de contaminación se obtiene en el posproceso del resultado de cada simulación independiente del modelo numérico. Para el análisis, se han seleccionado 4 puntos de la línea de costa del mar del Norte (Figura 5.12); en los que se estima el valor de esta probabilidad, para 50, 100, 200, 300, 400 y 500 escenarios. Estos puntos se encuentran repartidos de modo tal que quedase representada una potencial variabilidad de la variable a lo largo del litoral.

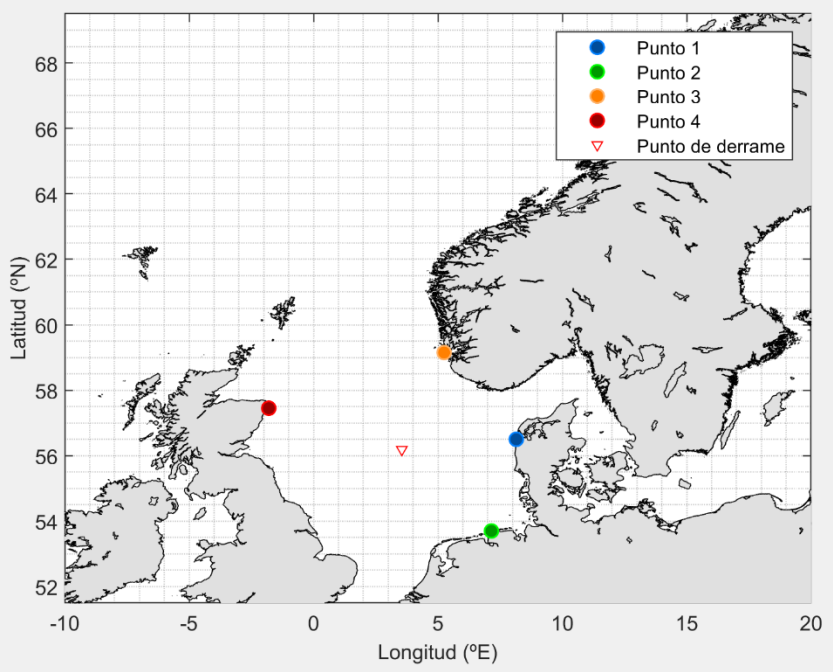


Figura 5.12. Puntos seleccionados en el análisis de sensibilidad. El triángulo rojo indica la ubicación del hipotético punto de derrame. Elaboración propia.

La figura 5.13 presenta un diagrama de caja y bigotes que recoge el resultado del análisis de sensibilidad. Se expone, de forma breve, la consecución de este diagrama:

i. En primer lugar, se estima la probabilidad acumulada de contaminación en un punto, como el número de escenarios; de fechas de inicio de la simulación numérica, por tanto, de forzamientos: corrientes y vientos, asociados a esas fechas, para los que el derrame alcanza dicho punto, en relación al número total de escenarios ejecutados. En un mismo punto, se determina la probabilidad en los casos de 50, 100, 200, 300, 400 y 500 escenarios ejecutados.
ii. Este proceso se repite en 50 ocasiones para un mismo punto, de modo tal que se consigue, en ese punto, una serie de 50 datos de probabilidad acumulada de contaminación, para 50, 100, 200, 300, 400 y 500 escenarios ejecutados.
iii. Por último, se aplica el mismo proceso en los 4 puntos seleccionados.

Cada «caja», con sus «bigotes», representa la distribución de la serie de 50 datos de probabilidad acumulada de contaminación en el punto. La amplitud; diferencia entre los valores máximo y mínimo de la distribución, de cada «caja», simboliza la dispersión de los datos en la serie. Pese a que el valor promedio de los datos parece mantenerse estable, su dispersión se reduce a medida que aumenta el número de escenarios. De este modo, la variabilidad (amplitud de la distribución) entre 2 valores de probabilidad en el punto 1, estimados a partir de, p. ej., 50 escenarios o fechas de inicio de la simulación numérica, se encuentra en torno al 30 %, mientras que, en el caso de 400 escenarios, esa variabilidad se reduce a un 10 %. Pero, no se trata de una relación lineal, como se puede apreciar en la figura 5.13. Por tanto, es preciso encontrar el número de escenarios que asegure la precisión en el resultado, sin que esto suponga un aumento notable en el tiempo de ejecución total del modelo numérico.

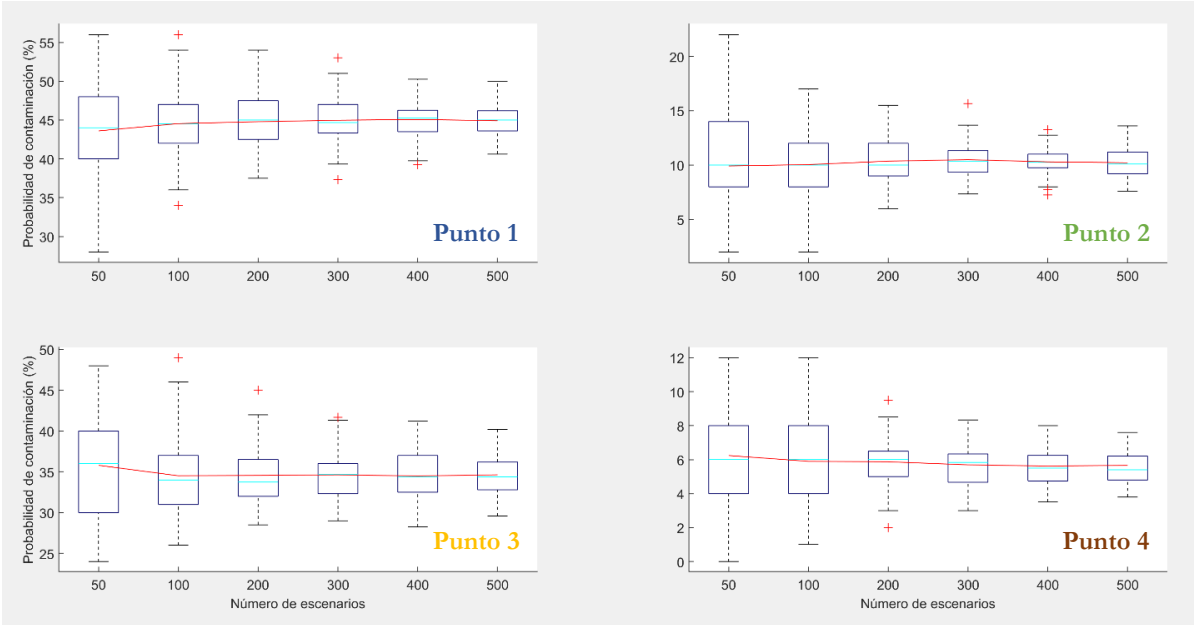


Figura 5.13. Diagrama de caja y bigotes de la variable: probabilidad acumulada de contaminación, estimada en los 4 puntos seleccionados, para 50, 100, 200, 300, 400 y 500 escenarios. Elaboración propia.

La figura 5.14 muestra la varianza[5] de la distribución de la serie de datos para cada «caja» del diagrama de caja y bigotes (Figura 5.13) en cada punto seleccionado. La varianza es una medida de la dispersión de los datos. Es preciso encontrar el número de escenarios a partir del cual la merma en la varianza de la serie de datos; mejora de la precisión en el resultado del modelo numérico, es mínima en comparación al incremento en el número de escenarios. Esto es, en la figura 5.14, el punto en el que la curva es cuasi asintótica respecto al eje horizontal.

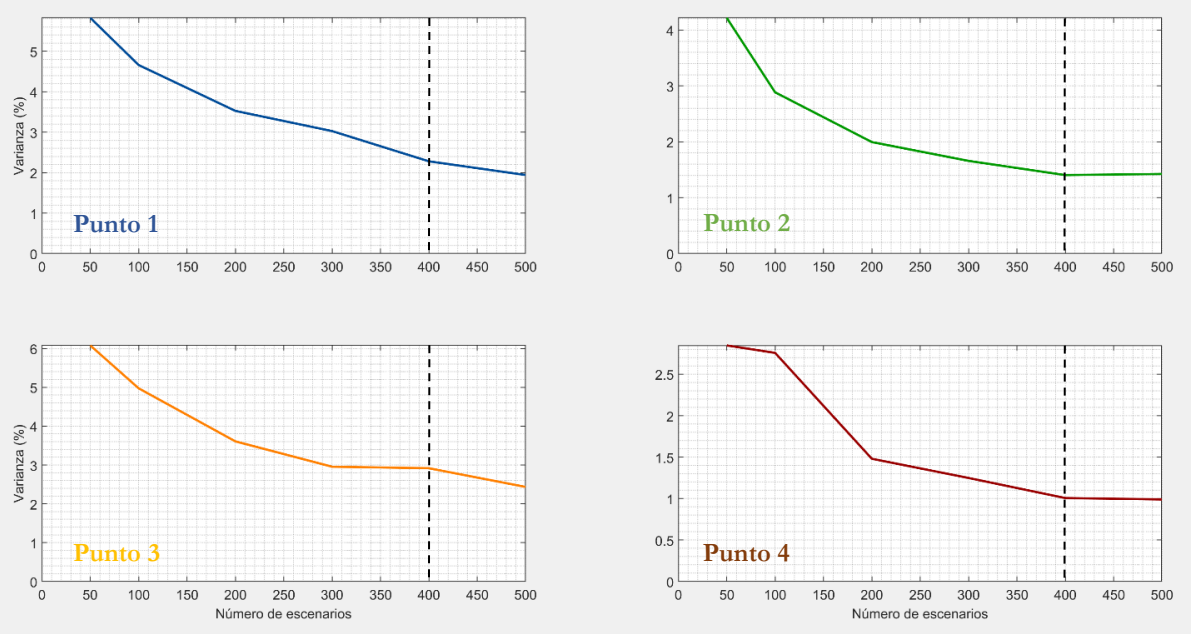


Figura 5.14. Varianza de la distribución de la serie de datos para cada «caja» del diagrama de caja y bigotes (Figura 5.13) en cada punto seleccionado. Elaboración propia.

Por tanto, el número de escenarios escogido para generar los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y tiempo esperado de llegada del derrame; resultado del análisis de sensibilidad, es de 400.

[24] Media de las desviaciones cuadráticas de una variable aleatoria, referidas alvalor medio de esta. *Diccionario de la lengua Española*. Referencia: https://dle.rae.es/varianza?m=form

6. RESULTADOS

Este capítulo introduce el resultado último de la metodología propuesta en el presente documento; metodología para la evaluación de la peligrosidad de contaminación por un derrame accidental de hidrocarburos, provocado por una explosión en profundidad o *blowout* en una instalación *offshore*. Esto es, muestra los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y de tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos; con base en los 400 escenarios, resultado del análisis de sensibilidad descrito en el capítulo 5.5. Se aplica, a la hora de generar estos mapas, un umbral de masa de producto por unidad de área; en cada celda, de 1 y 10 g/m².

Para una concentración por encima de 1 g/m², la mancha de derrame en la superficie del agua adquiere una apariencia metálica o de un color marrón oscuro. Esta cantidad acarrea efectos subletales[24] en, p. ej., pájaros sobre el agua o mamíferos marinos. En el litoral, el derrame se presenta en forma de bolas de alquitrán dispersas, manchas o parches, y puede ser el desencadenante, conservador, de la necesidad de limpieza de la costa. Por su parte, una cantidad por encima de 10 g/m² en la superficie del agua ocasiona daños letales en pájaros; siendo su apariencia similar, pese a presentar un mayor grosor, al caso de 1 g/m². En el litoral, se manifiesta como una capa de un marrón oscuro, con efectos subletales en la epifauna de invertebrados del intermareal, tanto en sustrato duro como en sedimento, y en pájaros. Es necesaria, en este caso, la limpieza de la costa (French McCay, 2016).

6.1 PROBABILIDAD ACUMULADA DE CONTAMINACIÓN EN LA SUPERFICIE DEL AGUA

La figura 6.1 presenta los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², en una malla numérica de resolución espacial de 0.05°, luego de 46 días de deriva de la mancha de derrame, para 400 escenarios. La barra de color, en la leyenda, introduce la escala de esta probabilidad, en tanto por ciento. De este modo el color verde oscuro, p. ej., indica una probabilidad de 30-40 %.

La figura 6.1. a) muestra como el mar del Norte puede verse afectado por completo en caso de producirse el hipotético derrame. No obstante, una gran parte de este lo hace con una probabilidad inferior al 10-20 %. La probabilidad más elevada, sin considerar el área inmediatamente superior al punto de derrame, se encuentra al este de la plataforma continental, resultando el litoral danés y noruego, los más afectados; con algún punto en su línea de costa que alcanza el 50-60 %. Estos resultados remarcan la influencia que los forzamientos: corrientes y viento, tienen sobre el transporte de una mancha de derrame. El efecto de las corrientes, que circulan en sentido antihorario en el interior del mar del Norte; el agua que penetra en el mar Báltico y es transportada por la corriente a lo largo de la costa oeste de Noruega; o el viento que sopla del sudeste y que provoca la circulación antihoraria en su interior. Todo ello desplaza la mancha de derrame hacia el este-nordeste. La costa de Reino Unido resulta la menos afectada por el derrame, con probabilidades entre el 0-10 %.

En la figura 6.1 b) se mantinene la tendencia en la deriva de la mancha; sentido este-nordeste, pero se reduce la probabilidad acumulada de contaminación en todo el área de estudio; dado que es necesaria una mayor cantidad de producto para superar el umbral de 10 g/m². En este caso, el litoral danés y el noruego presentan una probabilidad de contaminación de 0-10 %. Por su parte, se identifican zonas de la costa de Reino Unido o Bélgica que no se encuentran afectadas por el derrame.

[24] Cambios fisiológicos o de comportamiento que debilitan el estado físico de los individuos y pueden llegar a tener efectos negativos en toda la población. Son efectos acumulativos, a largo plazo, que no tienen una consecuencia inmediata y pueden pasar inadvertidos por mucho tiempo. Referencia: http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/articulos/sostenibilidad-cdmx/17-recuadros/458-efecto-subletal

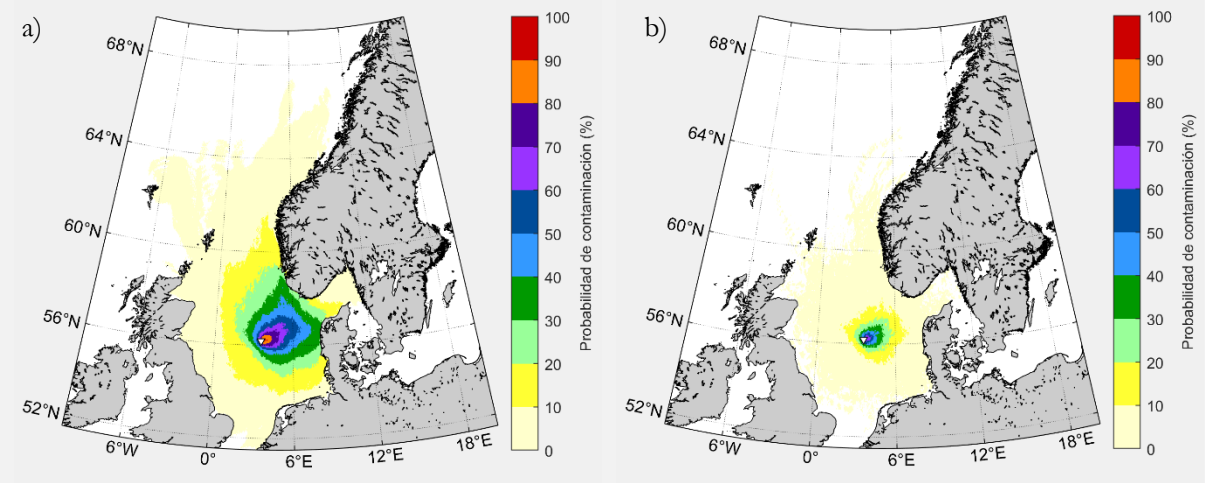


Figura 6.1 Mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², generados a partir de 400 escenarios. Elaboración propia.

Por su parte, la figura 6.2 muestra las diferencias, en valor absoluto, entre dos mapas de probabilidad generados a partir de un mismo número de escenarios. Para elaborar este mapa, se selecciona de forma aleatoria un número *n* de escenarios y se genera, a partir de estos, uno de los mapas de probabilidad. A continuación, se selecciona, de nuevo de forma aleatoria, un mismo número *n* de escenarios y se genera un segundo mapa. Por último, se obtiene el mapa de diferencias, en valor absoluto, restando ambos mapas. La figura 6.2 recoge este proceso para a) 50, b) 100 y c) 400 escenarios; considerando el umbral de 1 g/m².

La figura muestra como las diferencias entre dos mapas de probabilidad se reduce conforme aumenta el número de escenarios que los genera. La figura sugiere que considerar un número reducido de escenarios puede conducir a sobreestimar o subestimar el riesgo de contaminación; por tanto, a una mala planificación, gestión, del derrame. Muestra, así mismo, como para dos mapas generados a partir de 50 escenarios aleatorios, se pueden obtener diferencias en la probabilidad de en torno a un 10-15 %; con un máximo de 30-35 % en algún punto del área de estudio. Por su parte, para un número de 400 escenarios, estas diferencias se reducen hasta 0-5 %; con un máximo de 5-10 %. No obstante, un número elevado de escenarios requiere de una mayor capacidad de cálculo por parte de los ordenadores que ejecuten los modelos numéricos. Una vez más, es preciso escoger el número de escenarios que asegure la precisión de los modelos sin que esto suponga un incremento notable de su tiempo de ejecución.

Es preciso mencionar que, pese a manifestar diferencias de entre 5-15 % en una gran parte del área de estudio, la información; visual, que se obtiene de dos mapas generados a partir de 100 escenarios; así como de uno de 100 y otro de 400, es similar. Se plantea la duda de si, pese al resultado del análisis de sensibilidad del capítulo 5.5, un mapa generado a partir de 100, 200 o 300 escenarios ofrece la suficiente precisión, para un menor tiempo de ejecución de los modelos numéricos.

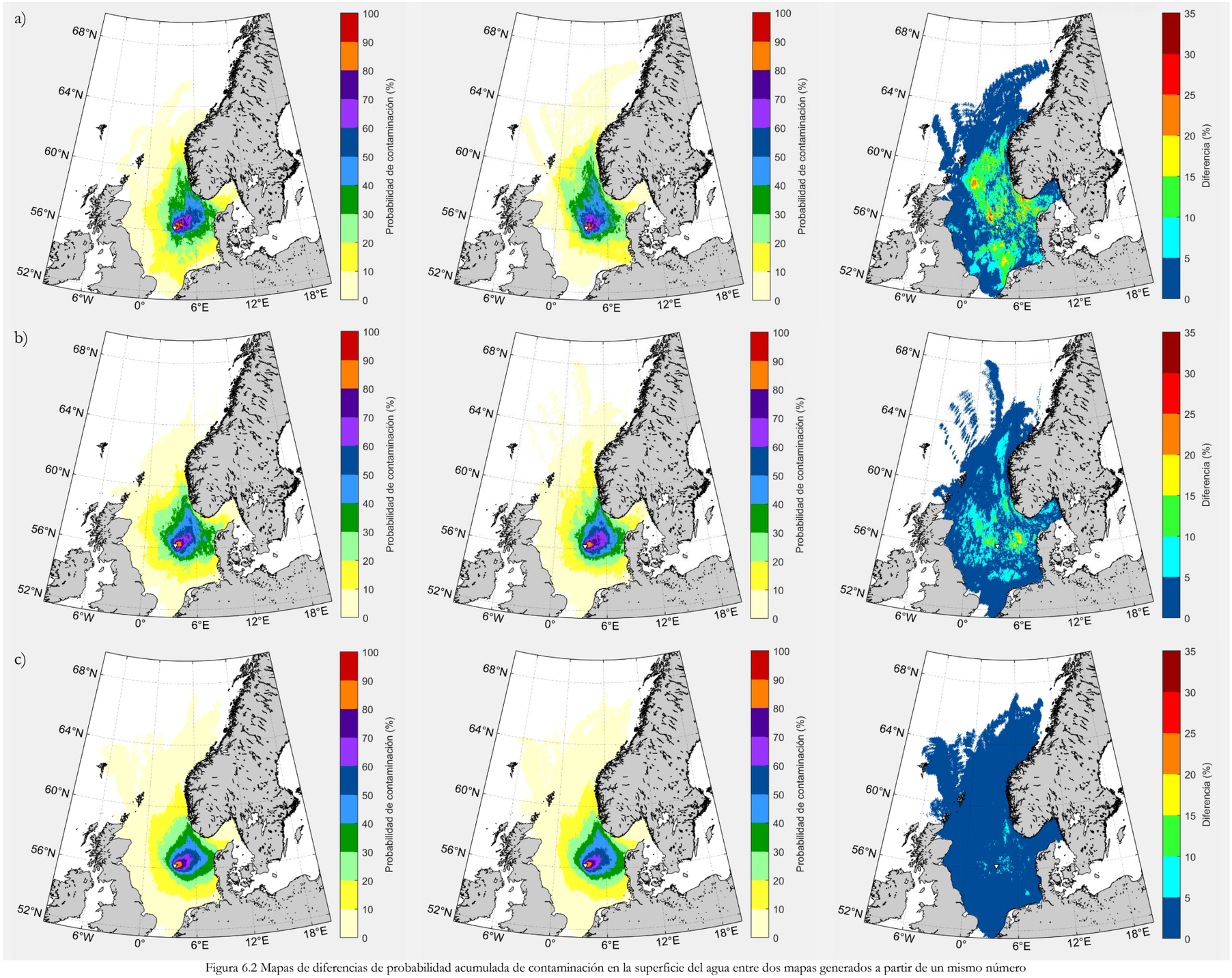


Figura 6.2 Mapas de diferencias de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua entre dos mapas generados a partir de un mismo número de a) 50, b) 100 y c) 400 escenarios, por encima de un umbral de 1 g/m². Elaboración propia.

En el capítulo 5.3 se menciona que, con objeto de comparar el resultado final de la presente metodología; el mapa de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua, con el obtenido por Chiri (2020), se ha tomado su mismo punto de derrame de coordenadas [56.187°N 3.55°E], a una profundidad de 71 m.

La figura 6.3 presenta la citada comparación. La metodología en Chiri (2020) se aplica sobre una malla numérica de resolución espacial de 0.25°, en lugar de 0.05°, para un período de deriva de la mancha de hidrocarburos de 30 días, en lugar de 46. De igual modo, no considera ningún umbral a la hora de generar el mapa de probabilidad. Para la comparación, se ha generado un mapa de probabilidad, con base en la presente metodología, para las condiciones en Chiri (2020); tiempo total de simulación de 30 días, no se considera umbral.

Chiri (2020) aplica un modelo estocástico con base en el algoritmo de agrupamiento k-medias (Camus et al., 2011) en la selección de patrones de corriente oceánicas, en lugar de la simulación de Montecarlo, así como se basa en corrientes del Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1; no considera las corrientes de marea, en lugar de Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) + TPXO9-atlas. No obstante, se observan similitudes en la tendencia en la deriva de la mancha de hidrocarburos. En Chiri (2020), la mancha es transportada hacia el este, siendo el litoral danés el más afectado por el derrame, con una probabilidad, en tanto por uno, de 0.2-0.3. La costa de Noruega se ve también afectada, con una probabilidad inferior a 0.1. Por su parte, la mancha en la presente metodología es transportada hacia el este-nordeste, con una misma probabilidad, entre 0.2-0.3, de alcanzar el litoral danés. En esta ocasión, la probabilidad de alcanzar la costa noruega es superior, de también un 0.2-0.3.

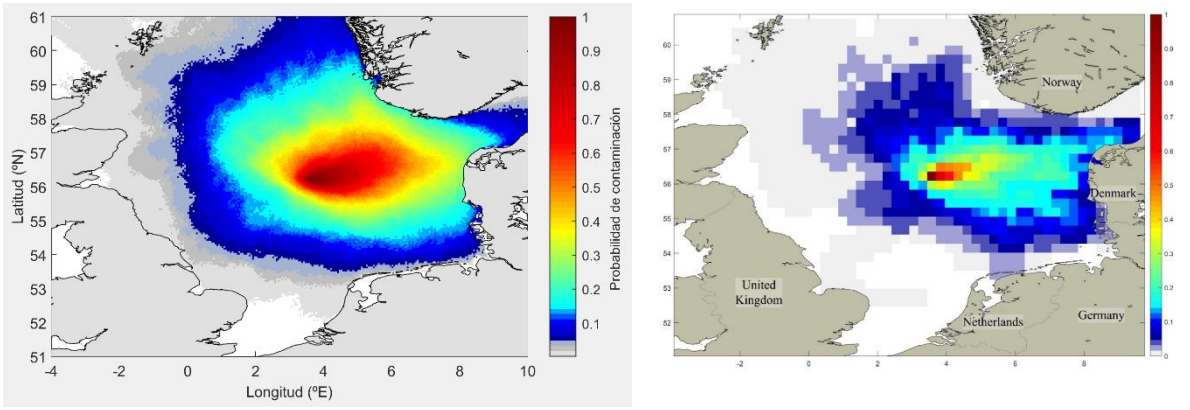


Figura 6.3 Mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua, expresada en tanto por uno; a) presente metodología; elaboración propia, b) Chiri (2020).

6.2 TIEMPO ESTIMADO DE LLEGADA DE LA MANCHA DE HIDROCARBUROS

La figura 6.4 presenta los mapas de tiempo estimado de llagada de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², en una malla numérica de resolución espacial de 0.05°, luego de 46 días de deriva de la mancha de derrame, para 400 escenarios. La figura 6.4 a) muestra, análogamente a los mapas de probabilidad, una tendencia en la deriva de la mancha en setido etste-nordeste, lo que acarrea que el litoral danés o noruego presenten el menor tiempo de llegada, de entre 5-10 días. La figura muestra como, para un derrame accidental de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad, en el hipotético punto de derrame que se considera, la mancha de derrame puede ser transportada a cualquier punto del litoral del mar del Norte en menos de 20-25 días. Por su parte, la figura 6.4 b) presenta unos tiempos de llegada ligeramente superiores, puesto que se necesita que una mayor cantidad de producto alcanze una zona en concreto para superar el umbral de 10 g/m².

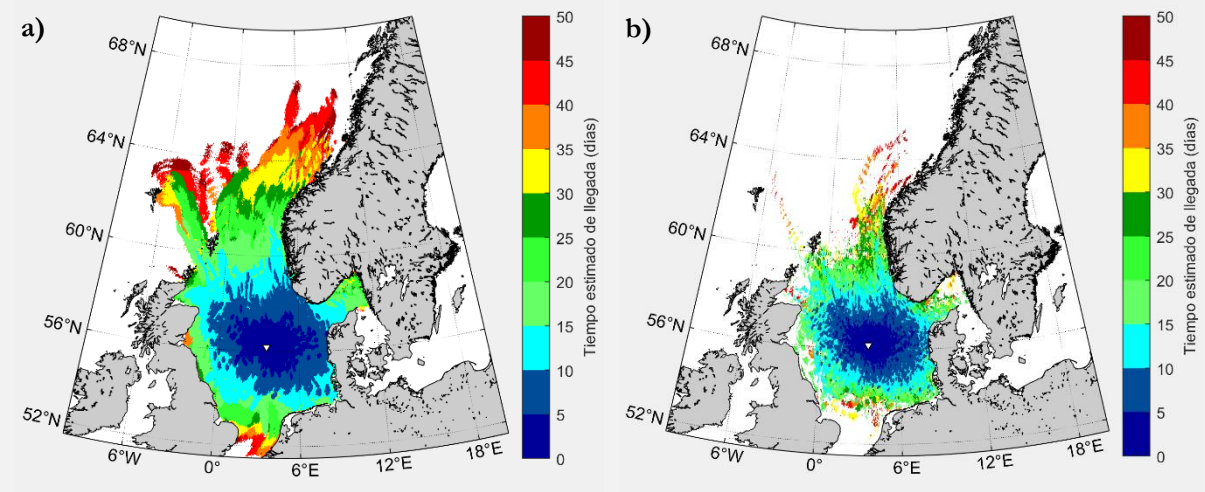


Figura 6.4 Mapas de tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos por encima de un umbral de a) 1 y b) 10 g/m², generados a partir de 400 escenarios. Elaboración propia.

Por último, la figura 6.5 introduce el mismo análisis que la figura 6.2, en esta ocasión para el tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos, con los mismos resultados.

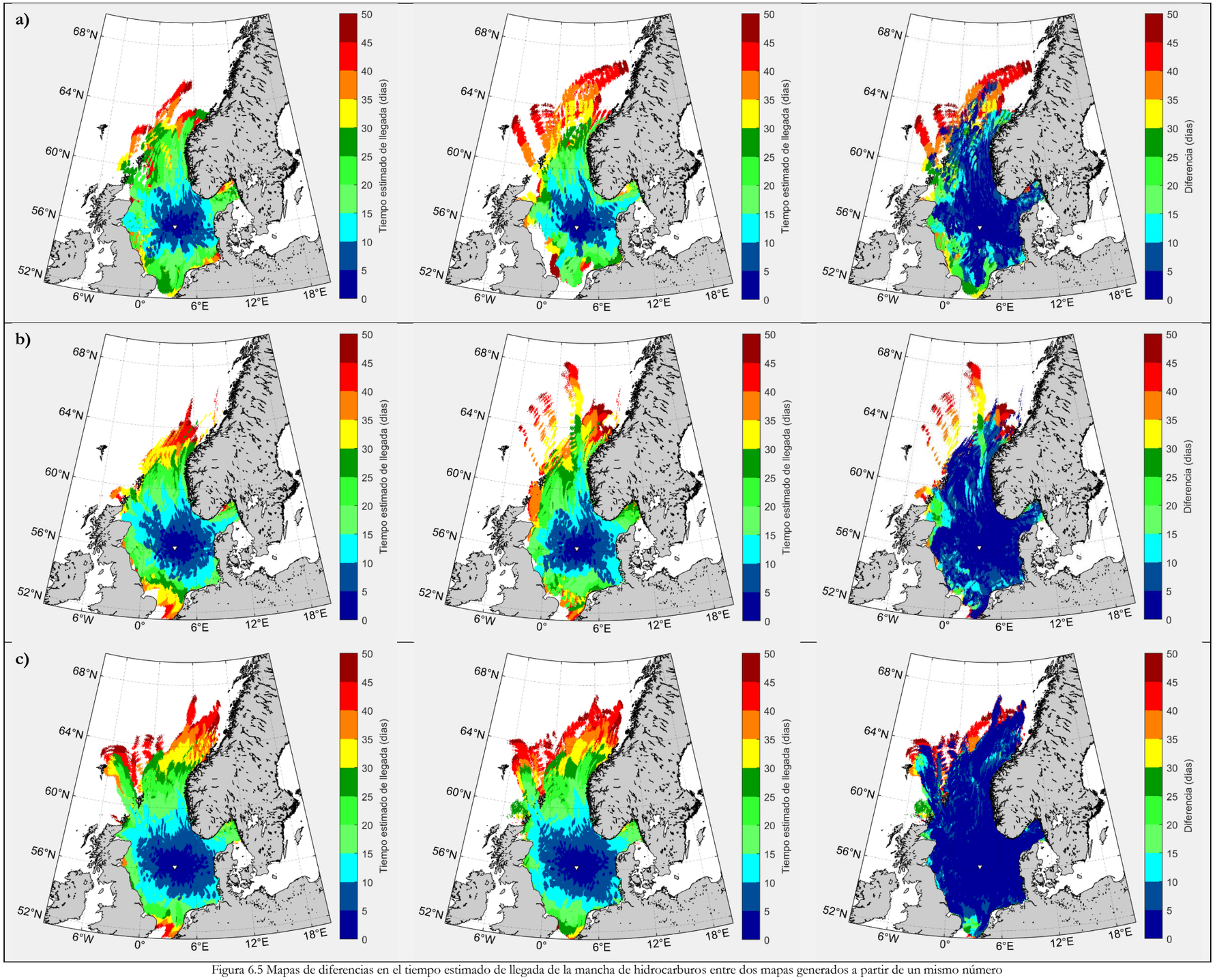


Figura 6.5 Mapas de diferencias en el tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos entre dos mapas generados a partir de un mismo número de a) 50, b) 100 y c) 400 escenarios, por encima de un umbral de 1 g/m². Elaboración propia.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 CONCLUSIONES

De los resultados de la presente metodología se pueden extraer, de acuerdo con los objetivos planteados, las siguientes conclusiones:

i. Este trabajo presenta una metodología que permite la evaluación de la peligrosidad de contaminación derivada de un derrame accidental de hidrocarburos provocado por una explosión en profundidad o *blowout* en una instalación en alta mar u *offshore*.
ii. El proceso de validación de las bases de datos de reanálisis subraya la importancia de las corrientes de marea en el mar del Norte pese a que, por lo general, las bases de datos no las incorporan.
iii. El análisis de sensibilidad a la resolución de la malla numérica y al número de partículas concluye que, para un resolución de entre 0.02 y 0.05° y un número de partículas de 5 000-10 000, se obtienen resultados precisos; del modelo numérico, por encima de un umbral.
iv. El análisis estocástico; con base en el algoritmo de la simulación de Montecarlo, consigue representar la aleatoriedad; variabilidad, de las condiciones meteoceánicas en el área de estudio a partir de la selección de un número de escenarios meteoceánicos y un posterior análisis de sensibilidad aplicado a este; este número resulta igual a 400.
v. La metodología tiene como resultado último los mapas de probabilidad acumulada de contaminación en la superficie del agua y de tiempo estimado de llegada de la mancha de hidrocarburos; herramientas de planificación en la gestión de un hipotético derrame.
vi. Este trabajo está dirigido a avanzar en el desarrollo y aplicación de metodologías que permitan mejorar el análisis de la peligrosidad ante derrames accidentales derivados de instalaciones offshore.
vii. Pese a que, en el ejemplo de aplicación de la metodología; en el mar del Norte, la metodología se aplica a un derrame derivado de una explosión en profundidad, esta puede ser aplicada por igual en caso de un derrame en superficie.

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de este trabajo han surgido aspectos que requieren de una mayor investigación, y algunos de los resultados sugieren ideas que podrían ser analizadas en el futuro:

i. Llevar a cabo un proceso de validación en detalle de las bases de datos de reanálisis; aumentando el número de medidas in situ, así como una validación de estas con información de trayectorias de boyas de deriva.
ii. Incorporar bases de datos de reanálisis regionales; más resolución espacial, y aplicar técnicas estadísticas para su interpolación.
iii. Estudiar el efecto de la escala temporal de la simulación de Montecarlo en el resultado del modelo numérico.
iv. Integrar un modelo que resuelva el campo cercano, en el acoplamiento campo cercano-campo lejano.

8. REFERENCIAS

Abascal, A. J., Castanedo, S., Gutierrez, A. D., Comerma, E., Medina, R., & Losada, I. J. (2007, January). TESEO, an operational system for simulating oil spills trajectories and fate processes. In *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers

Abascal, A. J., Castanedo, S., Gutierrez, A. D., Medina, R., Losada, I. J., & Comerma, E. (2008, May). DESCRIPTION AND APPLICATION OF THE OPERATIONAL OIL SPILL FORECAST SYSTEM TESEO. In *International Oil Spill Conference* (Vol. 2008, No. 1, pp. 1023-1029). American Petroleum Institute.

Abascal, A. J., Castanedo, S., Mendez, F. J., Medina, R., & Losada, I. J. (2009a). Calibration of a Lagrangian transport model using drifting buoys deployed during the Prestige oil spill. *Journal of Coastal Research*, *25*(1 (251)), 80-90.

Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., Losada, I. J., & Alvarez-Fanjul, E. (2009b). Application of HF radar currents to oil spill modelling. *Marine Pollution Bulletin*, *58*(2), 238-248.

Abascal, A. J., Castanedo, S., Medina, R., & Liste, M. (2010). Analysis of the reliability of a statistical oil spill response model. *Marine Pollution Bulletin*, *60*(11), 2099-2110.

Abascal, A. J., Castanedo, S., Núñez, P., Mellor, A., Clements, A., Pérez, B., ... & Medina, R. (2017a). A high-resolution operational forecast system for oil spill response in Belfast Lough. *Marine pollution bulletin*, *114*(1), 302-314.

Abascal, A. J., Sanchez, J., Chiri, H., Ferrer, M. I., Cárdenas, M., Gallego, A., ... & Turrell, W. R. (2017b). Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: A northwest European continental shelf case study. *Marine Pollution Bulletin*, *119*(1), 336-350.

Alvarez-Fanjul, E., Losada, I., Tintoré, J., Menéndez, J., Espino, M., Parrilla, G., ... & Muñizuri, V. P. (2007, January). The ESEOO Project: developments and perspectives for Operational Oceanography at Spain. *In The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

ASCE Task Committee on Modeling of Oil Spills. (1996). State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, *122*(11), 594-609.

Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, *58*(6), 453-462.

Canu, D. M., Solidoro, C., Bandelj, V., Quattrocchi, G., Sorgente, R., Olita, A., ... & Cucco, A. (2015). Assessment of oil slick hazard and risk at vulnerable coastal sites. *Marine pollution bulletin*, *94*(1-2), 84-95.

Castanedo, S., Medina, R., Losada, I. J., Vidal, C., Méndez, F. J., Osorio, A., ... & Puente, A. (2006). The Prestige oil spill in Cantabria (Bay of Biscay). Part I: operational forecasting system for quick response, risk assessment, and protection of natural resources. *Journal of Coastal Research*, *22*(6 (226)), 1474-1489.

Castanedo, S., Perez-Diaz, B., Abascal, A. J., Cardenas, M., Olabarrieta, M., Medina, R., ... & Guyomarch, J. (2014, May). A high-resolution operational oil spill model at Santander bay (Spain): implementation and validation. In *International Oil Spill Conference Proceedings* (Vol. 2014, No. 1, pp. 516-530). American Petroleum Institute.

Chiri, H. (2020). Avances en metodologías estadísticas para la simulación en el medio-largo plazo de derrames de hidrocarburos en el mar.

Crichton, D. (1999). The risk triangle. *Natural disaster management*, *102*(3).

Doneker, R. L., & Jirka, G. H. (1990). *Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged single port discharges (CORMIX1)*. Cornell University Ithaca United States.

Dudley, B. (2018). BP statistical review of world energy. *BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug*, *6*, 2018.

EMODnet Bathymetry Consortium. (2016). EMODnet digital bathymetry (DTM). *EMODnet Bathymetry*, *10*.

Fay, J. A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. Proc. On Prevention and Control of Oil Spill, American Petroleum Institute: Washington, DC, pp. 463-467.

French-McCay, D. P. (2016). Potential effects thresholds for oil spill risk assessments. In *Proceedings of the 39th AMOP technical seminar on environmental contamination and response* (pp. 285-303). Environment Canada Ottawa, ON, Canada.

González-Pola, C., Larsen, K. M. H., Fratantoni, P., & Beszczynska-Moller, A. (2019). ICES Report on Ocean Climate 2018. *ICES Cooperative Research Report*, (349).

ICES. (1983). Flushing times of the North Sea. *Cooperative Research Report*, 123-123.

Janeiro, J., Fernandes, E., Martins, F., & Fernandes, R. (2008). Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine pollution bulletin*, *56*(4), 650-665.

Lee, J. H., Cheung, V., Kuang, C. P., Choi, D. K. W., Wang, W. P., Tu, C. H., ... & Choi, Y. K. (2003). VISJET & VISFLOOD: Software for environment hydraulic modeling & visualization. In *The Asian Symposium on Visualization*.

Mackay, D., Paterson, S., & Trudel, K. (1980). *A mathematical model of oil spill behaviour*. Environment Canada, Environmental Protection Service, Environmental Impact Control Directorate, Environmental Emergency Branch, Research and Development Division.

Martins, F., Leitão, P., Silva, A., & Neves, R. (2001). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, *24*, 51-62.

OGA, 2018a. UK Oil & Gas Authority, Wells Insight Report 2018.

OGA, 2018b. UK Oil & Gas Authority, Environment Report 2018.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(8), 1015-1058.

Schneider, I. (2005). Jakob Bernoulli, Ars Conjectandi (1713). In *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940* (pp. 88-104). Elsevier Science.

Stiver, W., & Mackay, D. (1984). Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. *Environmental science & technology*, *18*(11), 834-840.

Sündermann, J. (2003). The changing North Sea: knowledge, speculation and new challenges. *Oceanologia*, *45*(2).

United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. (1981). Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. *United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Technical Papers in Marine Science, Paris, France*, 36, 1-25.

Walday, M., & Kroglund, T. (2008). Europe's biodiversity-biogeographical regions and seas. Seas around Europe The North Sea.

Wessel, P., & Smith, W. H. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *101*(B4), 8741-8743.

Young, R. (1965). Offshore claims and problems in the North Sea. *Am. J. Int'l L.*, *59*, 505.