

MODELADO DE LA DISPERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA BAHÍA DE SANTANDER

Autor: Yazmín Sánchez Farías

Directores: Andrés García Gómez y Paula Núñez Pérez

Trabajo Final del Máster en Ingeniería Costera y Portuaria. Convocatoria de Octubre de 2017

RESUMEN

En la actualidad, las basuras marinas se pueden encontrar en todos los océanos y mares del planeta y suponen un grave problema ambiental, económico, de salud y estético. Diversos estudios han probado que del total de basuras que se pueden encontrar en el medio marino, la parte más significativa son plásticos, llegando a alcanzar un 80%.

En el presente trabajo se propone una metodología para la identificación de las zonas de acumulación de residuos marinos en estuarios y bahías. Esta metodología se aplica a la Bahía de Santander con el fin de encontrar las zonas con mayor probabilidad de presencia de basuras. Además se realiza un análisis de la influencia, en los resultados de acumulación de basuras, de la fase de marea en la que llega el vertido.

Palabras clave: modelado numérico, modelado del transporte, modelo lagrangiano, basuras/residuos marinos, basura flotante, plásticos, contaminación marina, circulación, estuarios, costas.

Introducción

Los mecanismos de transporte en el medio marino son muy eficientes y capaces de transportar las basuras marinas grandes distancias. La distribución de estos residuos depende principalmente de las condiciones oceanográficas y ambientales, aunque también influyen las características físico-químicas del material.

Los estuarios, debido a su hidrodinámica, son comunidades ecológicas que se encuentran afectadas significativamente por los desechos marinos. Sin embargo, aún no se han estudiado en profundidad los procesos de transporte y acumulación de basuras a escala local.

Objetivos

El objetivo general es el desarrollo de una metodología que permita la identificación de zonas de acumulación de basuras marinas en la

escala de actuación local, es decir, en bahías y estuarios.

Como objetivo específico del trabajo se va a realizar un análisis de sensibilidad de la influencia, en los resultados de acumulación de basuras, de la fase de marea en la que llega el vertido.

Zona de estudio

El estudio se realiza en la Bahía de Santander (Cantabria) (véase figura 1). Se trata de uno de los mayores estuarios de la costa Norte de España, con una extensión de 22.42 km². Su principal aporte de agua dulce es el río Miera, aunque cabe destacar que dominan las dinámicas mareales frente a las fluviales, dado que se encuentra en una zona macromareal.

En esta bahía se encuentra el LIC - Dunas del Puntal y Estuario del Miera y también numerosas zonas de baño y de producción de

moluscos que se pueden ver afectadas por la presencia de basuras marinas.

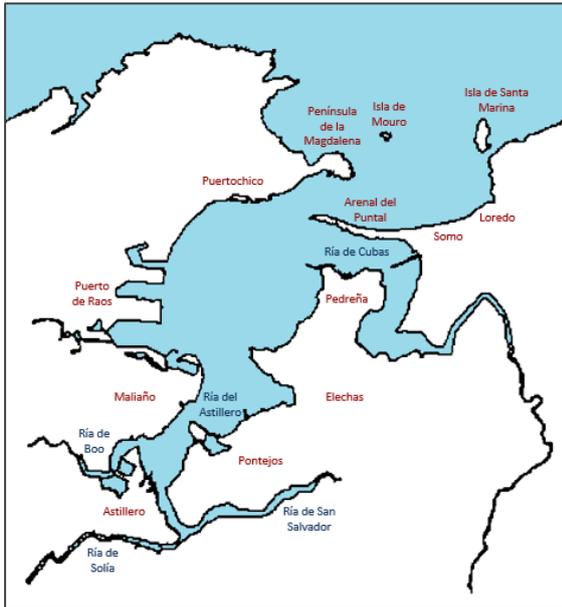


Figura 1 Entorno de la Bahía de Santander

Metodología

En la siguiente figura se puede ver un esquema de la metodología que se emplea para la identificación de basuras marinas:

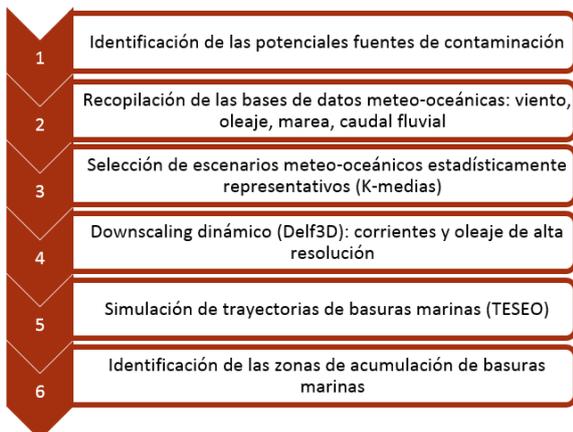


Figura 2 Metodología desarrollada para la identificación de basuras marinas

Análisis de sensibilidad de la marea

Se realiza el análisis de sensibilidad del grado de afección del número de fases de marea que se escogen para determinar las trayectorias de partículas en estuarios y bahías.

Para ello se aplica la metodología descrita considerando diferente número de fases de marea, para dos escenarios meteo-oceánicos (el más frecuente y el de mayor caudal), con el fin de comparar los resultados que se obtengan.

1. Identificación de las potenciales fuentes de contaminación: de las principales fuentes de contaminación de la bahía se han seleccionado tres puntos que presentan distinto comportamiento al efecto de la marea:

- Punto 1: cauce del río Miera
- Punto 2: Playa de La Magdalena
- Punto 3: ría del Astillero

2. Recopilación de las bases de datos meteo-oceánicas:

- Batimetría de alta resolución obtenida de la combinación de diferentes fuentes de datos
- Marea astronómica: datos instrumentales del mareógrafo de Santander. Fuente: Puertos del Estado
- Oleaje: datos de reanálisis Downscaled Ocean Waves (DOW). Fuente: IHCantabria
- Viento: datos de downscaling SeaWindNCEP-HR. Fuente: IHCantabria
- Caudal fluvial: datos del “Estudio de Recursos Hídricos de los Ríos de la Vertiente Norte de Cantabria. Periodo 1987-2012”. Fuente: IHCantabria

3. Selección de escenario meteo-oceánicos estadísticamente representativos:

3.1 Variables dependientes: viento, oleaje y caudal fluvial

Para representar adecuadamente las variables meteo-oceánicas, se ha calculado el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe y el índice de acuerdo (skill) asociados a clasificaciones obtenidas con distinto nº de clusters, y obtiene que el nº óptimo de clusters para las variables

de estudio es de 36. De estos escenarios se van a elegir dos:

- Escenario 16: más frecuente
- Escenario 6: mayor caudal fluvial

3.2 Variables independientes: marea astronómica

Se seleccionan 4 carreras de marea equiprobables ($P^{CMj} = 1/4$) y diferentes fases de marea equiprobables que representen los posibles escenarios de vertido:

- 4 fases de marea ($P^{tk} = 1/4$)
- 6 fases de marea ($P^{tk} = 1/6$)
- 8 fases de marea ($P^{tk} = 1/8$)

4. Downscaling dinámico

Para generar las corrientes y el oleaje de alta resolución se emplea el modelo numérico Delft3D.

5. Simulación de trayectorias de basuras marinas

Con los forzamientos de alta resolución obtenidos del downscaling dinámico se procede a realizar la simulación de las trayectorias de partículas. Para ello se ha empleado el modelo TESEO.

6. Análisis de sensibilidad de las fases de marea

A partir de las trayectorias obtenidas de las simulaciones del transporte, se ha realizado un análisis estadístico para obtener la distribución de la probabilidad de contaminación en la zona de estudio, en los dos escenarios meteorológicos seleccionados (escenario 6 y escenario 16).

En la figura 3 se muestran los mapas obtenidos para el escenario 6, transcurridas 6h desde el vertido en el P1, para las tres fases de marea equiprobables. El análisis se realiza con los resultados obtenidos para los dos escenarios en los instantes $t = 1h, 3h, 6h, 12h$ y $24h$.

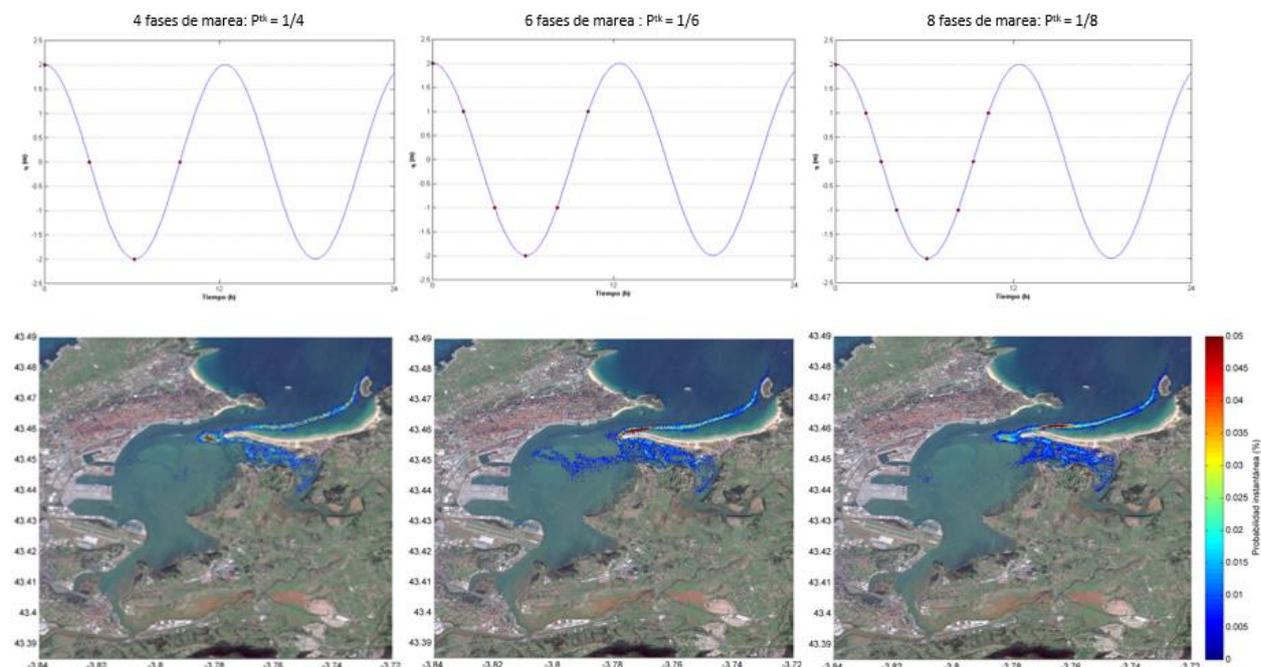


Figura 3 Resultados obtenidos para el escenario 6 (mayor caudal fluvial), en $t = 6h$, punto de vertido P1, para 4, 6 y 8 fases de marea equiprobables

Identificación de las zonas de acumulación de basuras

Para llevar a cabo este estudio se utiliza la metodología descrita anteriormente. Se

muestran los resultados obtenidos pasadas 24h del vertido para los dos escenarios seleccionados y para los tres puntos de vertido (véanse las figuras 4 y 5).



Figura 4 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido, escenario 6

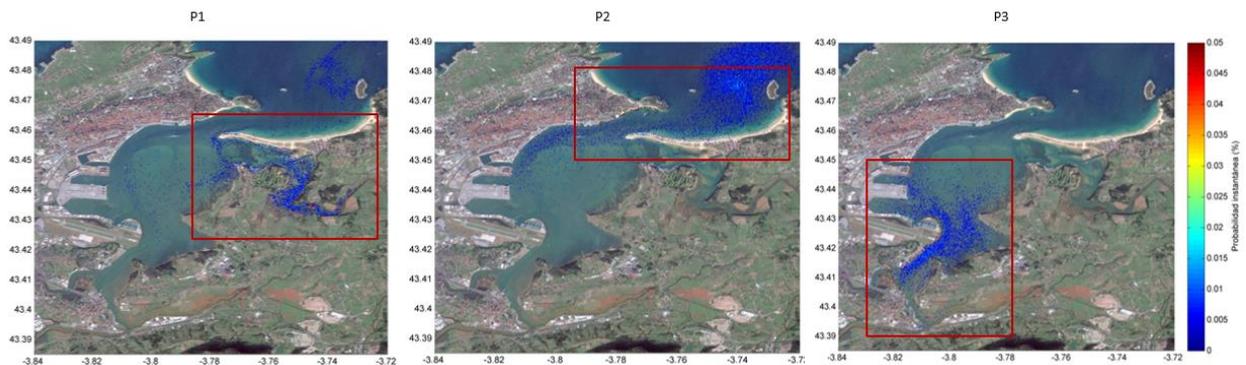


Figura 5 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido, escenario 16

Conclusiones

Del análisis de sensibilidad de las fases de marea se concluye que 4 fases son insuficientes para el estudio de dispersión de basuras, mientras que 6 y 8 fases proporcionan unos resultados similares, siendo más sólidos los obtenidos para 8 fases, ya que a mayor número de fases de marea seleccionadas mejor quedará representada la marea.

Por otro lado, la metodología desarrollada permite identificar las zonas de acumulación de basuras en la Bahía de Santander. Los resultados muestran que pasado 1 día del vertido, hay una mayor presencia de basuras en las zonas próximas al foco de contaminación. Además, se encuentran mayores probabilidades de acumulación en las márgenes del río Miera, en El Puntal, en las playas de La Magdalena, Los Bikinis y Los Peligros y en la ría del Astillero.

DISPERSION MODELLING OF PLASTIC DEBRIS AT SANTANDER BAY

Author: Yazmín Sánchez Farías

Directors: Andrés García Gómez y Paula Núñez Pérez

Final Project of the Master's degree in Coast and Port Engineering. October 2017

ABSTRACT

Nowadays, marine litter can be found throughout the world's oceans. This debris is a serious issue with economic, ecological and aesthetic impacts. Several studies have proved that the most common items that can be found in the marine environment are plastics, which can reach the 80% of the total marine debris.

In this study, a methodology for the identification of accumulation marine litter areas in estuaries and bays is developed. The methodology is applied to the Santander Bay in order to find the areas that are more likely to accumulate marine debris. Furthermore, a sensitivity analysis is performed to test the tidal influence on the results of the identification of accumulation marine litter areas.

Palabras clave: numerical model, lagrangian model, marine litter/debris, floating litter/debris, plastic, marine pollution, circulation, estuaries, bays, coastal areas.

Introduction

The transport mechanisms in the marine environment are very efficient and capable of transporting marine litter large distances. The distribution of these debris depends mainly on the oceanographic and environmental conditions, but also influence the physical and chemical characteristics of the material.

Estuaries, due to their hydrodynamics, are ecological communities that are significantly affected by marine debris. However, the transport and accumulation processes of marine litter have not been studied yet at local levels.

Objectives

The main objective of this project is a methodology development that allows the identification of the accumulation marine litter areas at local level, that is, at bays and estuaries.

As a specific objective of the study, a sensitivity analysis is performed to test the influence of the tidal on the results of the identification of accumulation marine litter areas.

Study area

The study area is the Bay of Santander (Cantabria) (see figure 1), which is one of the north Spain's largest estuaries, with an area of 22.42 km². The main river in this bay is the river *Miera*, and it should be noted that tidal dynamics are more important than fluvial ones, because is a macrotidal zone.

In this bay is located the *LIC - Dunas del Puntal y Estuario del Miera*, and also there are some beaches and shellfish areas that can be affected by the presence of marine litter.

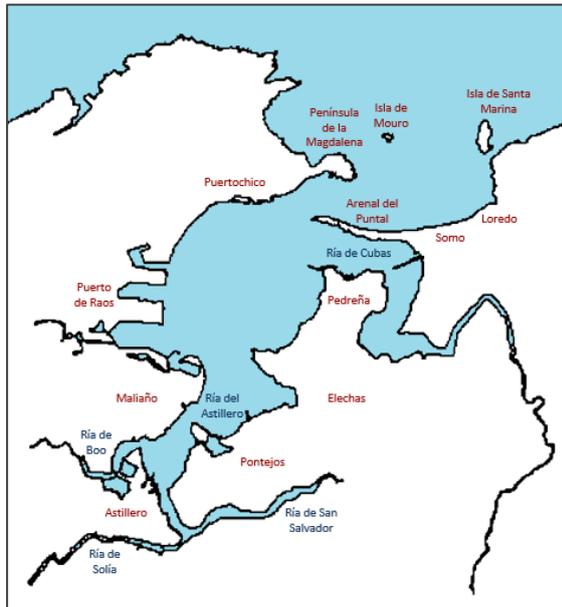


Figure 1 Study area: Santander Bay

Methodology

In figure 2 we can see a scheme of the methodology used for the identification of accumulation marine litter areas.

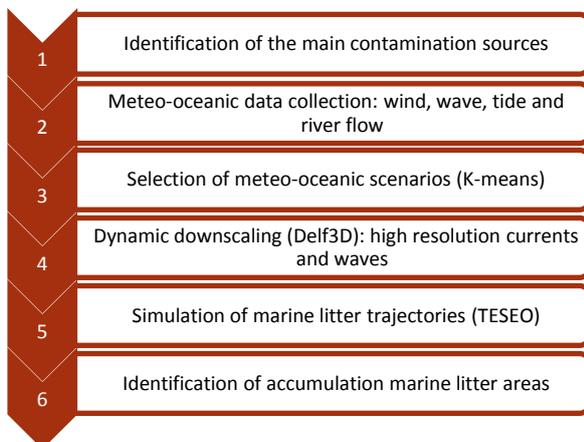


Figure 2 Methodology

Sensitivity analysis of the tide

Sensitivity analysis is performed to test the tidal influence on the results of simulation of marine litter trajectories at estuaries and bays.

To this end, the methodology described is applied considering different number of tidal phases, for two meteo-oceanic scenarios (the most frequent and the highest flow), in order to compare the results obtained.

1. Identification of the main contamination sources: of the main pollution sources located in the bay, three points have been selected because they are affected differently by the tide:

- Point 1: *Miera* river
- Point 2: *La Magdalena* beach
- Point 3: *Astillero*

2. Meteo-oceanic data collection:

- High resolution bathymetry obtained from a combination of different data sources
- Astronomical tide: instrumental data from the Santander station. Source: Puertos del Estado
- Waves: reanalysis data Downscaled Ocean Waves (DOW). Source: IHCantabria
- Wind: downscaling dates SeaWindNCEP-HR. Source: IHCantabria
- River flow: data from the "Study of Water Resources of the North Cantabria Rivers. Period 1987-2012". Source: IHCantabria

3. Selection of meteo-oceanic scenarios:

3.1 Dependent variables: wind, waves and river flow

In order to represent de meteo-oceanic variables, the Nash-Sutcliffe efficiency index and the skill coefficient associated to the classifications obtained with different nº of clusters have been calculated. With this, it is determined that the nº of clusters for the study variables is 36. Of these scenarios, two were chosen:

- Scenario 16: the most frequent
- Scenario 6: the greater river flow

3.2 Independent variables: astronomical tide

Four tidal ranges were selected with the same occurrence probability ($P^{CMj} = 1/4$) and different tidal phases to represent the 2 scenarios:

- 4 tidal phases ($P^{tk} = 1/4$)
- 6 tidal phases ($P^{tk} = 1/6$)
- 8 tidal phases ($P^{tk} = 1/8$)

4. Dynamic downscaling

Delft3D numerical model is used to generate currents and high resolution waves.

5. Simulation of marine litter trajectories

With the high resolution results obtained in the dynamic downscaling, we carry out the

simulation of marine litter trajectories. For this, the TESEO model is used.

6. Sensitivity analysis of the tidal phases

With the trajectories obtained from the transport simulations, a statistical analysis was carried out to obtain the distribution of the probability of contamination in the study area, in the two selected meteo-oceanic scenarios (scenario 6 and scenario 16).

Figure 3 shows the maps obtained for scenario 6, after 6h from the discharge in P1, for the three tidal phases. The analysis is performed with the results obtained for the two scenarios at instants $t = 1h, 3h, 6h, 12h$ and $24h$.

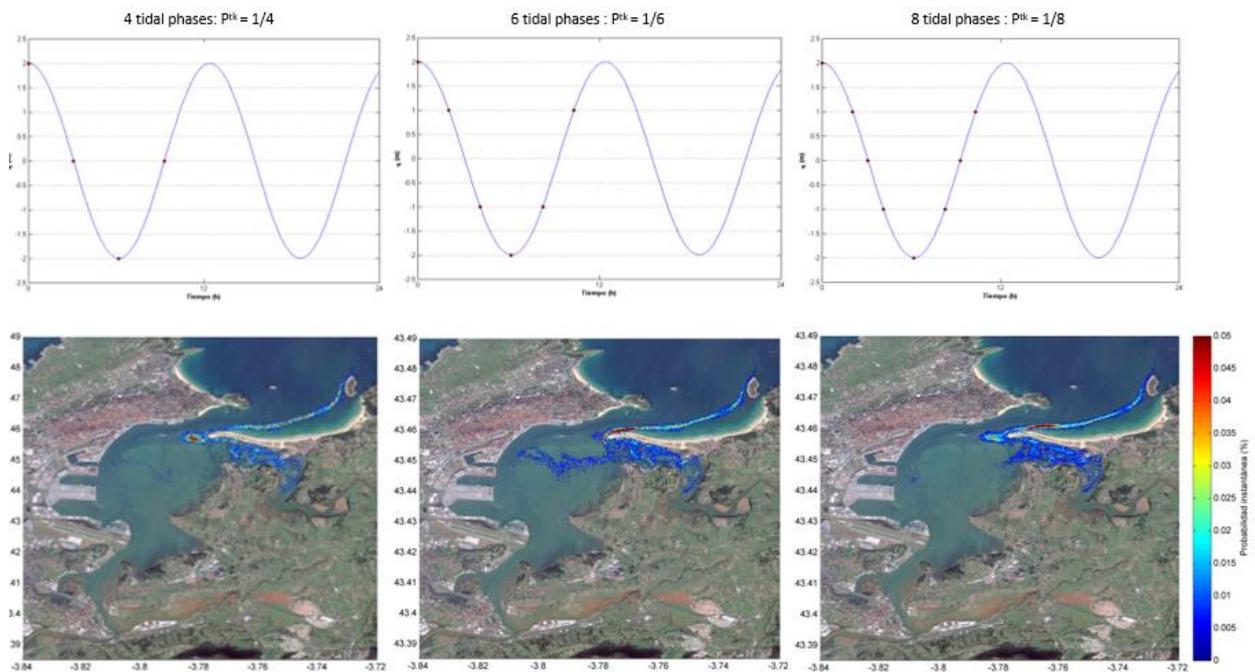


Figure 3 Results obtained for scenario 6 (greater river Flow), at $t = 6h$, spill point P1, for 4, 6 and 8 tidal phases

Identification of accumulation marine litter areas

To carry out this study, the methodology described above is used. We show the results

obtained after 24h of the pouring moment, for the two selected scenarios and for the three spill points (see figures 4 and 5)

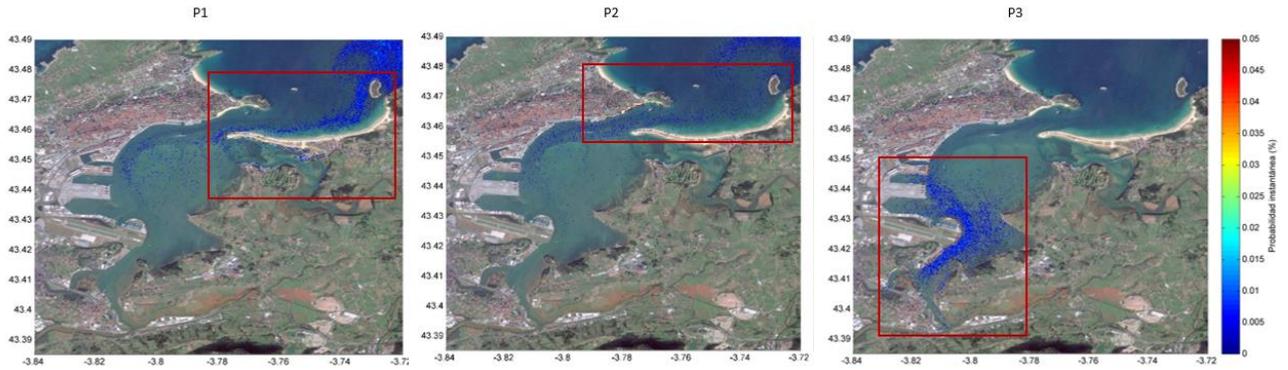


Figure 4 Identification of accumulation marine litter areas, at $t = 24h$, scenario 6

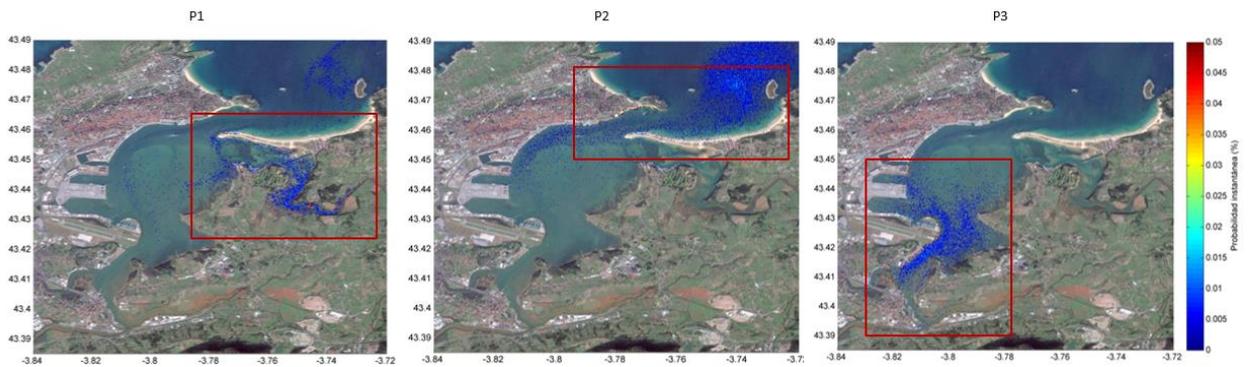


Figure 5 Identification of accumulation marine litter areas, at $t = 24h$, scenario 16

Conclusions

From the sensitivity analysis of the tidal phases, it is concluded that 4 phases are insufficient for the marine litter dispersion study. However, 6 and 8 phases provide similar results, being more accurate the results obtained with 8 tidal phases because they represent the tide better.

Besides, the developed methodology allows the identification of accumulation marine litter areas in the Santander Bay. The results show that, after 1 day of the pouring moment, there are more marine debris in areas close to the contamination sources. In addition, there is a greater probability of accumulation in the *Miera* river, along *El Puntal*, *La Magdalena*, *Los Bikinis* and *Los Peligros* beaches and near the *Astillero*.



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



MODELADO DE LA DISPERSIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN LA BAHÍA DE SANTANDER

Trabajo realizado por:
Yazmín Sánchez Farías

Dirigido:
Andrés García Gómez
Paula Núñez Pérez

Titulación:
**Máster Universitario
en Ingeniería Costera
y Portuaria**

Santander, Octubre de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER

ÍNDICE

Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Motivación.....	3
1.2 Estado del conocimiento.....	6
1.2.1 Principales fuentes de contaminación.....	6
1.2.2 Composición de las basuras marinas.....	7
1.2.3 Procesos que sufren las basuras en el mar.....	7
1.2.4 Modelos de distribución de partículas en medios fluidos.....	8
1.2.5 Factores adicionales del transporte de partículas flotantes.....	8
1.2.6 Estudios de dispersión de basuras marinas.....	9
1.2.7 Conclusiones.....	10
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Estructura del documento.....	10
Capítulo 2 . ZONA DE ESTUDIO.....	12
Capítulo 3 . METODOLOGÍA.....	16
3.1 Identificación de las potenciales fuentes de contaminación.....	16
3.2 Recopilación de las bases de datos meteo-oceánicas.....	17
3.3 Selección de escenarios meteo-oceánicos estadísticamente representativos.....	17
3.3.1 Variables dependientes: viento, oleaje y caudal.....	17
3.3.2 Variable independiente: marea astronómica.....	19
3.4 Downscaling dinámico.....	20
3.5 Simulación de trayectorias de basuras marinas.....	21
3.6 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas.....	21
Capítulo 4 . DATOS DE PARTIDA.....	24
4.1 Batimetría.....	24
4.2 Dinámicas actuantes.....	25
4.2.1 Marea astronómica.....	25
4.2.2 Oleaje.....	26
4.2.3 Viento.....	26
4.2.4 Caudal fluvial.....	28
Capítulo 5 . ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MAREA.....	29

5.1 Identificación de las potenciales fuentes de contaminación.....	29
5.2 Recopilación de las bases de datos meteo-oceánicas	30
5.3 Selección de escenarios meteo-oceánicos estadísticamente representativos	31
5.3.1 Variables dependientes: viento, oleaje y caudal	31
5.3.2 Variables independientes: marea astronómica.....	35
5.4 Downscaling dinámico	36
5.4.1 Configuración del modelo hidrodinámico	36
5.4.2 Resultados.....	38
5.5 Simulación de trayectorias de basuras marinas.....	40
5.6 Análisis de sensibilidad de las fases de marea	40
5.6.1 Conclusiones	59
Capítulo 6 . IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN DE BASURAS MARINAS	60
6.1 Resultados	60
6.2 Conclusiones.....	66
Capítulo 7 . RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	67
ANEJO I. MODELO DELFT3D	
ANEJO II. MODELO TESEO	
ANEJO III. RESULTADOS DELFT3D	
ANEJO IV. RESULTADOS TESEO	

Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los basuras marinas están presentes en todo el planeta (véase la figura 1.1) y son un grave problema para los ecosistemas costeros y marinos (Gall and Thompson, 2015). Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), se considera basura marina cualquier material sólido persistente, manufacturado o procesado que ha sido descartado, eliminado o abandonado, en el medio marino y costero. De acuerdo con esta organización y con diversos estudios de otros autores, se estima que cada año llegan al océano entre 4 y 8 millones de toneladas de basuras (UNEP, 2009).

En la actualidad, los residuos marinos se distribuyen por los océanos estando presentes tanto en las zonas costeras como en aguas abiertas. Existen diversos tipos de residuos marinos, tales como el vidrio, papel, metal, plásticos, madera, caucho y otros. Sin embargo, se ha probado que los plásticos son la parte más significativa, llegando a alcanzar más del 80% del total de las basuras marinas (Deudero and Alomar, 2015).

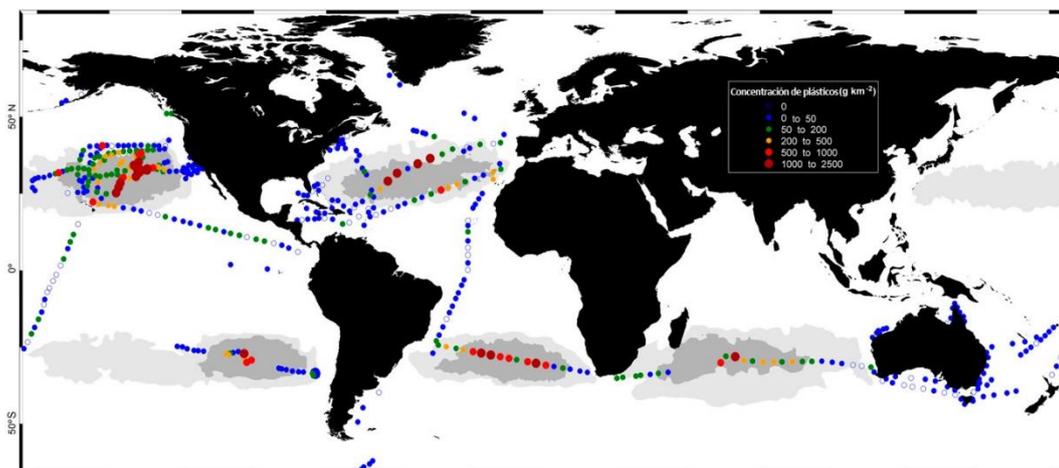


Figura 1.1 Mapa de concentraciones de desechos plásticos en aguas superficiales en los océanos del mundo (Cózar et al., 2014)

Los plásticos se han integrado ampliamente en nuestra vida cotidiana. Debido a sus excelentes características, como por ejemplo su durabilidad y su bajo coste, son utilizados para diversos campos como el transporte, las telecomunicaciones, la ropa, el calzado, el embalaje... todo lo cual ha dado lugar a grandes beneficios para la sociedad. Como consecuencia, a diario se produce, utiliza y tira una enorme cantidad de plástico. Aproximadamente, del total de basuras de plástico que se generan, el 10% termina en los océanos (Thompson, 2006), presentando un peligro para la salud y para el medio ambiente.

Los residuos que llegan al medio marino y costero se producen desde diferentes fuentes y pueden tener tamaños muy dispares. Se ha comprobado que el 80% de las basuras marinas proceden de fuentes terrestres, especialmente se encuentran acumulaciones de basuras en las zonas más urbanizadas, industrializadas o próximas a plantas de tratamientos de residuos

(Derraik, 2002). Una fuente importante de entrada de basuras al medio costero son las desembocaduras de ríos, se han realizado estudios que afirman que la mayor parte de las residuos sólidos que se encuentran en las playas provienen de los ríos próximos (Rech *et al.*, 2014).

Las basuras que no proceden de fuentes terrestres constituyen un 20% (Derraik, 2002) y derivan principalmente de las actividades que se realizan en el mar, especialmente la pesca. Una gran cantidad de aparejos (redes, boyas...) se pierden o abandonan en los océanos produciendo graves daños en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, desde que se aprobó el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) en 1973, se ha controlado y disminuido la cantidad de vertidos al mar procedentes de barcos.

Los residuos que llegan al medio marino se mueven y acumulan a lo largo de todo el planeta. Se ha observado la presencia de basuras en todos los mares y océanos (Bergmann, Gutow and Klages, 2015) y, aunque en un principio se detectaron mayores acumulaciones en la costa, con el paso del tiempo ha cobrado importancia la presencia de basuras flotando en mar abierto y en los fondos oceánicos (véase la figura 1.2). La distribución estos residuos está ligada a las condiciones oceanográficas y ambientales, es decir, a las corrientes oceánicas, al viento, al oleaje... Aunque también influyen las características físico-químicas del propio material. De esta manera los plásticos más ligeros permanecen en la columna de agua o en superficie, mientras que los de mayor densidad se hunden hacia los fondos marinos. La existencia de basuras marinas en lugares tan distanciados de sus fuentes de entrada al mar demuestra la facilidad que tienen estos residuos para ser transportados.



Figura 1.2 Basuras marinas encontradas en la costa, flotando o en el fondo marino (Fuente: Marine Photobank)

Los plásticos son sustancias químicas procedentes del petróleo a las que se les añaden aditivos para obtener las propiedades deseadas. En función de los aditivos se pueden crear múltiples tipos de plásticos, aunque los más utilizados y abundantes son el polietileno de alta (HDPE) o baja (LDPE) densidad, policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP) y polietileno tereftalato (PET). La degradación de los plásticos es un proceso lento y depende del tipo de plástico así como de las condiciones biológicas, químicas y físicas a las que se encuentran expuestos (Barnes *et al.*, 2009).

La incidencia de los rayos ultravioletas (UV), la temperatura y el oxígeno presente en el entorno juegan un papel muy importante en el proceso de degradación. En mar adentro los plásticos se degradan más lentamente que en las costas o en tierra, esto se debe a que el mar absorbe la radiación UV. Además, en los fondos oceánicos la degradación es aún más lenta por la ausencia de radiación solar, la menor temperatura y los niveles más bajos de oxígeno a los que se encuentran sometidos los residuos. Por último, hay que tener en cuenta que con el paso del tiempo, los plásticos se fragmentan en partículas sin sufrir necesariamente una modificación de sus componentes químicas; con lo cual el plástico degradado sigue siendo plástico pero en partículas menores (Barnes *et al.*, 2009).

Los residuos plásticos pueden diferenciarse en macroplásticos o microplásticos, siendo estos últimos los residuos que tienen un tamaño menor o igual a los 5 mm (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012) (véase la figura 1.3). Los microplásticos pueden formarse a partir de plásticos de mayor tamaño mediante procesos de degradación física o química que reducen el plástico a partículas y fibras más pequeñas, pueden ser producidos directamente para su uso o como precursores de otros productos (pellets).



Figura 1.3 Microplásticos (izq) y macroplásticos (der) (Fuente: CSIC)

Las afecciones que se pueden producir por la presencia de basuras en el medio marino son múltiples y difíciles de determinar. Por un lado, los macroplásticos generan un importante impacto visual, así como interacciones con organismos marinos produciendo atrapamientos o ingestión de estos materiales. Además, la acumulación de macroplásticos en los fondos marinos puede provocar variaciones de las condiciones físico-químicas que hacen posible el equilibrio de los ecosistemas, viéndose afectadas especies de plantas, animales y otros organismos que habitan en el lugar. En cuanto a los microplásticos, debido a su pequeño tamaño, son más

susceptibles de afectar a la alimentación de ciertos organismos por ser ingeridos y transferidos a lo largo de la cadena trófica. Asimismo, los microplásticos pueden provocar la proliferación de organismos tales como invertebrados, bacterias y virus, y dada su facilidad de transporte pueden llegar a zonas muy distantes debido a la acción de las corrientes oceánicas (Cole et al., 2011).

Los estuarios, debido a su hidrodinámica, son comunidades ecológicas que se encuentran afectadas significativamente por los desechos marinos. Éstos constituyen un ecosistema clave ya que proporcionan un hábitat idóneo para el desarrollo de numerosas especies, tanto animales como vegetales. Dada la importancia de estos hábitats y el grave problema que suponen los residuos para ellos, es relevante la identificación de las zonas de mayor acumulación de basuras marinas para poder combatir esta amenaza.

1.2 Estado del conocimiento

En las últimas décadas, la enorme cantidad de desechos que se pueden encontrar en las costas suponen un serio problema ambiental, económico, de salud y estético. La presencia omnipresente de las basuras marinas se debe principalmente al hecho de que una vez entran en el medio marino, los mecanismos de transporte son muy eficientes y capaces de transportar estos residuos grandes distancias (Barnes *et al.*, 2009).

A continuación se explican algunos conceptos que son necesarios para comprender el estudio y modelado de residuos marinos. Primero se repasan las principales fuentes de procedencia de las basuras así como su composición. Luego, se explicaran los procesos que sufren las basuras marinas, los modelos de distribución y finalmente algunos estudios de dispersión que se han llevado a cabo a nivel mundial y a escala regional.

1.2.1 Principales fuentes de contaminación

Las fuentes de procedencia de las basuras marinas se pueden caracterizar de diferentes formas. Normalmente se suelen diferenciar entre fuentes marítimas y fuentes terrestres, en función de dónde provenga el residuo.

Las fuentes terrestres de residuos son principalmente aquellas asociadas al uso recreativo de la costa, la industria, los puertos, así como las escorrentías urbanas y aguas residuales que llegan al mar debido a accidentes o eventos extremos. Las basuras pueden ser transportadas al mar por ríos (Rech *et al.*, 2014), por escorrentías naturales, puntos de vertidos industriales o incluso por arrastre del viento. Estudios existentes han determinado que la mayor parte de las basuras que llegan al mar proceden de fuentes terrestres (Derraik, 2002).

Las fuentes marinas de basuras son las embarcaciones, ya sean comerciales, recreativas, buques de pesca, flotas militares y de investigación; así como las instalaciones en alta mar, tales como plataformas y zonas de acuicultura.

1.2.2 Composición de las basuras marinas

Los patrones circulatorios de los océanos, el clima, las mareas, la proximidad a áreas urbanas, industriales y recreativas, y la actividad pesquera y marítima en la zona influyen notablemente en los tipos y cantidades de basura que se encuentran en mar abierto o a lo largo de la costa.

Las evaluaciones de la composición de la basura en diferentes regiones marinas muestran que los plásticos, que incluyen todos los materiales sintéticos a base de petróleo, constituyen la mayor proporción de la contaminación general de la basura (Deudero and Alomar, 2015).

La basura marina que se encuentra en las costas consiste principalmente en plásticos (botellas, bolsas...) y vidrios, los cuales proceden principalmente del uso recreativo del litoral, aunque también es material que es transportado por las corrientes y depositado.

Según el estudio realizado por (Willis *et al.*, 2017) en los estuarios y costas de Australia, se determinó que en las costas el material más abundante es el vidrio mientras que en los estuarios es el plástico. Además, se averiguó que la presencia de desagües de aguas pluviales en los estuarios es una fuente de contaminación importante ya que en las zonas más próximas hay una mayor acumulación de residuos. Asimismo, en las playas próximas a zonas urbanizadas, dada su mayor afluencia, también son mayores las cantidades de basuras encontradas.

1.2.3 Procesos que sufren las basuras en el mar

El transporte y acumulación de residuos en el entorno marino se estudia mediante la mecánica de fluidos medioambientales, es decir, la investigación de los procesos que modifican las concentraciones de sustancias dentro de un medio fluido.

Estos procesos pueden dividirse en: transporte y transformaciones. El transporte incluye todos aquellos procesos que mueven sustancias por medios físicos, mientras que las transformaciones cambian una sustancia a otra.

Puesto que se considera basura marina a "cualquier material sólido persistente, manufacturado o procesado que ha sido descartado, eliminado o abandonado, en el medio marino y costero" (UNEP, 2009), el movimiento de estos residuos se puede estudiar considerándolos partículas pasivas conservadoras. Esto significa que su presencia en el medio no afecta a las dinámicas que las transportan y que no sufren transformaciones. Aunque los plásticos se pueden transformar en microplásticos mediante procesos de descomposición, no se tendrá en cuenta dado que el tiempo necesario para que se produzca este proceso es mucho más largo que la escala de tiempo de transporte (Barnes *et al.*, 2009). Por lo tanto, nos centraremos en el transporte, cuyos modos principales son la advección y la difusión.

1.2.4 Modelos de distribución de partículas en medios fluidos

La distribución de cualquier sustancia en un medio fluido puede describirse según el modelo Euleriano, es decir, en un punto fijo, o el Lagrangiano, siguiendo la trayectoria de la sustancia.

El modelo Euleriano se basa en la integración de la ecuación de advección-difusión, y los resultados que se obtienen se pueden representar en mapas de concentración de sustancia. Mientras que el modelo lagrangiano se basa en la integración de modelos estocásticos que describen el movimiento de partículas lanzadas en el flujo, y los resultados que se obtienen son las trayectorias de estas partículas (Zambianchi *et al.*, 2014).

Ambos enfoques son esencialmente equivalentes, y la elección de la representación depende de la naturaleza de la sustancia y el proceso investigado. En el caso de las basuras marinas, el enfoque lagrangiano es el más utilizado ya que permite realizar un seguimiento de las partículas y estudiar el destino de las mismas (Zambianchi, Trani and Falco, 2017).

Los modelos de partículas lagrangianas describen el transporte de partículas trazadoras transportadas por el flujo. Se supone que la velocidad tiene dos componentes: un flujo medio (advectivo) a gran escala y un campo irregular (turbulento) de menor escala. El flujo medio es el responsable del desplazamiento del centro de masa de las partículas, mientras que el campo turbulento induce la dispersión de las partículas desde el centro de masa (Zambianchi, Trani and Falco, 2017).

El conocimiento actual se limita al flujo advectivo, que representa el eje principal del transporte de partículas pasivas, mientras que los efectos turbulentos se tienen en cuenta en función de un coeficiente que representa la tasa de dispersión de los grupos de partículas.

1.2.5 Factores adicionales del transporte de partículas flotantes

Los modos de transporte principales son la advección y la difusión, aunque si estudiamos el transporte de partículas flotantes hay dos factores adicionales a tener en cuenta: el windage y la deriva de Stokes.

El windage es el efecto directo del viento sobre las partículas que flotan en la superficie y depende de la relación de flotabilidad, es decir, de la relación entre las secciones transversales de objetos flotantes normales a la dirección del viento que se encuentran por encima y por debajo del nivel de mal.

La deriva de Stokes se denomina al movimiento en la dirección de propagación de las ondas superficiales. Este movimiento se debe principalmente a que las partículas sujetas a un campo de ondas de superficie avanzan hacia adelante en la parte superior de su órbita más rápido que hacia atrás en la parte inferior.

El estudio de la advección y difusión, además de los efectos del viento y de las ondas, permite reconstruir las trayectorias de las basuras.

1.2.6 Estudios de dispersión de basuras marinas

Los estudios sobre el transporte y acumulación de basuras marinas se centran básicamente en las basuras que flotan en la superficie, siendo muy escasos aquellos que estudian la deposición en los fondos marinos o en tierra.

Desde una perspectiva oceanográfica, podemos distinguir entre dos grandes categorías de estudios oceanográficos sobre basuras marinas: investigaciones a escala global y estudios centrados en áreas más pequeñas del océano o mares.

Estudios a gran escala

Los estudios a gran escala tratan de determinar las características generales de los mecanismos de transporte de basuras a escala global. Hay numerosos estudios que describen la distribución, abundancia y composición de los desechos flotantes en los océanos, así como la concentración de los mismos en ciertas zonas formando lo que se conocen como parches de basura (Barnes *et al.*, 2009).

La mayoría de estos estudios se han llevado a cabo con la utilización de datos sobre las corrientes superficiales obtenidos de las trayectorias históricas de boyas a la deriva. Los resultados proporcionan información sobre las áreas de acumulación de basura a nivel mundial, las cuales corresponden a las convergencias de las corrientes oceanográficas, sobre todo en los giros subtropicales y subpolares (Maximenko, Hafner and Niiler, 2012).

Estudios a escala regional

Los estudios a escala regional tratan de determinar la dispersión y distribución de las basuras marinas en cuencas o áreas confinadas.

En comparación a los estudios a escala oceánica, los estudios sobre distribución y acumulación de basuras a escala regional son mucho más escasos. Sin embargo, en general, los plásticos tienden a acumularse en áreas con baja circulación, que son las mismas zonas en donde se acumulan sedimentos. Por tanto, es de esperar que las mayores acumulaciones de plásticos se den en bahías, estuarios, arrecifes de coral, más que en mar abierto (Galgani, Souplet and Cadiou, 1996).

Las zonas en donde se han realizado más estudios regionales son los mares de Asia oriental, las aguas próximas al archipiélago Hawaiano y el mar Mediterráneo (Zambianchi *et al.*, 2014).

A escala regional, el mar Mediterráneo ha sido objeto de numerosos estudios dedicados al transporte y acumulación de basura en su cuenca. Esto se debe a que es una zona sometida a una fuerte presión antrópica, urbana e industrial que genera una enorme cantidad de residuos sólidos. Además, el sistema de circulación se caracteriza por un flujo superficial procedente del océano Atlántico, sin ningún flujo significativo hacia el exterior a lo largo de su litoral; el flujo de

retorno al Atlántico se produce en profundidad, por tanto obstaculiza la salida de elementos flotantes de la cuenca (Zambianchi, Trani and Falco, 2017).

En el reciente estudio realizado por (Zambianchi, Trani and Falco, 2017), se utilizó un modelo lagrangiano para determinar la probabilidad de que las basuras llegaran a diferentes zonas de la cuenca, pudiendo así establecer posibles áreas de acumulación. Como resultados se obtuvieron diferencias estacionales en cuanto a la intensidad de las corrientes y vientos locales y, por lo tanto, en cuanto a las zonas de acumulación. La tendencia general de las trayectorias es terminar a lo largo de las zonas costeras, sobre todo en primavera y verano; además, hay una mayor acumulación de basuras flotantes en la zona sur de la cuenca.

A la hora de compararlo con observaciones in situ se tuvieron dificultades ya que no hay una base de datos de observaciones continua en todas las zonas, de todas formas se obtuvo una concordancia con los pocos datos disponibles. Sin embargo, hasta el momento no se ha registrado en el Mediterráneo ninguna evidencia de áreas permanentes de acumulación de basura (parches de basura).

1.2.7 Conclusiones

De la revisión del estado del conocimiento se puede concluir que existen diversos estudios que analizan el transporte y la distribución de las basuras marinas a escala global y regional. Sin embargo, aún no se ha estudiado en profundidad la influencia de estos procesos a escala local, es decir, cómo se distribuyen y dónde se acumulan los residuos en el interior de estuarios y bahías.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo fin de máster es el desarrollo de una metodología que permita la identificación de zonas de acumulación de basuras marinas en la escala de actuación local, es decir, en bahías y estuarios.

Como objetivo específico del trabajo se va a realizar un análisis de sensibilidad de la influencia, en los resultados de acumulación de basuras, de la fase de marea (pleamar, vaciante, bajamar o llenante) en la que llega el vertido. En concreto, el análisis se llevará a cabo en la Bahía de Santander, en donde se encuentra el Lugar de Interés Comunitario LIC – Dunas del Puntal y Estuario del Miera.

1.4 Estructura del documento

A continuación se exponen los capítulos en los que se divide el presente estudio así como una breve descripción de cada uno de ellos para una mejor comprensión de la organización del documento.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN. En este primer capítulo se detallan los motivos que han llevado al desarrollo del presente trabajo. Además, se revisa el estado del conocimiento y se plantean los objetivos perseguidos.

Capítulo 2. ZONA DE ESTUDIO. En este capítulo se describe el área de estudio, es decir, la Bahía de Santander. Se presentan los principales elementos morfológicos, la ordenación del territorio, las características de marea y caudal fluvial y otra información relevante.

Capítulo 3. METODOLOGÍA. Se detallan los diferentes pasos a seguir para identificar las zonas de acumulación de basuras marinas y realizar el análisis de sensibilidad de la marea propuesto.

Capítulo 4. DATOS DE PARTIDA. Se explican las distintas bases de datos empleadas en el estudio.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MAREA. Se analiza la influencia de las fases de marea en las que se produce el vertido en la distribución de las basuras marinas en la Bahía de Santander.

Capítulo 6. IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN DE BASURAS MARINAS. Una vez determinado el número de fases de marea óptimo, se aplica la metodología para identificar, en el corto plazo (24h), las zonas de la Bahía de Santander que presentan mayor acumulación de basuras bajo unas condiciones determinadas.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO. Se expone un breve resumen de las conclusiones obtenidas del estudio, los objetivos alcanzados y líneas de investigación relacionadas con el tema.

Capítulo 2 . ZONA DE ESTUDIO

La Bahía de Santander se encuentra situada en el Norte de España, en la costa cántabra (véase la figura 2.1) y pertenece a cinco municipios de Cantabria: Santander, Camargo, El Astillero, Marina de Cudeyo y Ribamontán al Mar.

La Bahía de Santander es uno de los mayores estuarios de la costa norte de España y el mayor de la Comunidad de Cantabria, con una extensión de 22.42 km², una longitud de unos 9 km y una anchura máxima en torno a los 5 km. Tiene un perímetro de aproximadamente 90 km, de los cuales sólo el 15% es costa natural.



Figura 2.1 Localización de la zona de estudio

La bocana, que permite la comunicación de la bahía con el mar Cantábrico, está orientada al Este, y delimitada por el arenal de El Puntal al Sur y la Península de la Magdalena al Norte. En la margen izquierda de la bahía se ubica el puerto deportivo de Puertochico, las dársenas de Maliaño y Raos, así como el frente urbano de la ciudad. En las proximidades de la Península de la Magdalena se encuentran las playas de Los Bikinis, La Magdalena y Los Peligros en la zona interior de la bahía, mientras que por la zona exterior se encuentran las playas de El Camello, El Sardinero (1^a y 2^a) y Mataleñas (véase la figura 2.2 y 2.3).

En la zona más interior del estuario, que engloba las rías de Boo, Solía y San Salvador, se ubican la Marina de Santander y los Astilleros. En la margen derecha de la bahía se localizan los páramos intermareales frente a Pedreña y a la ría de Cubas. Junto a la desembocadura, por su lado Este, se encuentran las playas de El Puntal, Somo y Loredó (véase la figura 2.2 y 2.3).

El principal aporte de agua dulce en la bahía proviene del río Miera, aunque también recibe aportes de otros ríos de menor entidad que desembocan en las rías de San Salvador, Solía y Boo. El río Miera desemboca en la ría de Cubas, situada en la margen derecha de la bahía, con un caudal medio anual de 8.2 m³/s.



Figura 2.2 Entorno de la Bahía de Santander

Se trata de un estuario de aguas poco profundas, con una marea semidiurna y macromareal. La superficie intermareal representa el 67% del área total de la bahía (1573 ha) y se concentra principalmente en la margen derecha.

Para determinar las características hidrodinámicas de un estuario tiene especial relevancia el prisma de marea, es decir, el volumen de agua que entra y sale de un estuario en los ciclos de mareas vivas. En el caso de la Bahía de Santander, el prisma de marea es de aproximadamente $66.46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, lo que se traduce en un caudal de marea de $3077 \text{ m}^3/\text{s}$ como máximo.

Según los caudales descritos en los párrafos anteriores, se deduce que en la Bahía de Santander dominan las dinámicas mareales frente a las fluviales. Por otro lado, dada la orientación de la desembocadura, el estuario se encuentra abrigado respecto al oleaje.

La Bahía de Santander ha sufrido un proceso progresivo de reducción de su lámina de agua debido a la actividad humana en la zona. Una extensión significativa del estuario (entre el 40% y el 50% de su superficie original) ha sido rellenada para la ampliación del Puerto de Santander, para usos industriales, residenciales y de servicios. Además, se ha llevado a cabo la construcción de estructuras de fijación en las márgenes del estuario (el 50% de sus márgenes no son

naturales) y otras estructuras portuarias que interfieren con el flujo de las corrientes, así como las operaciones periódicas de dragado del canal de navegación para el acceso de los buques.

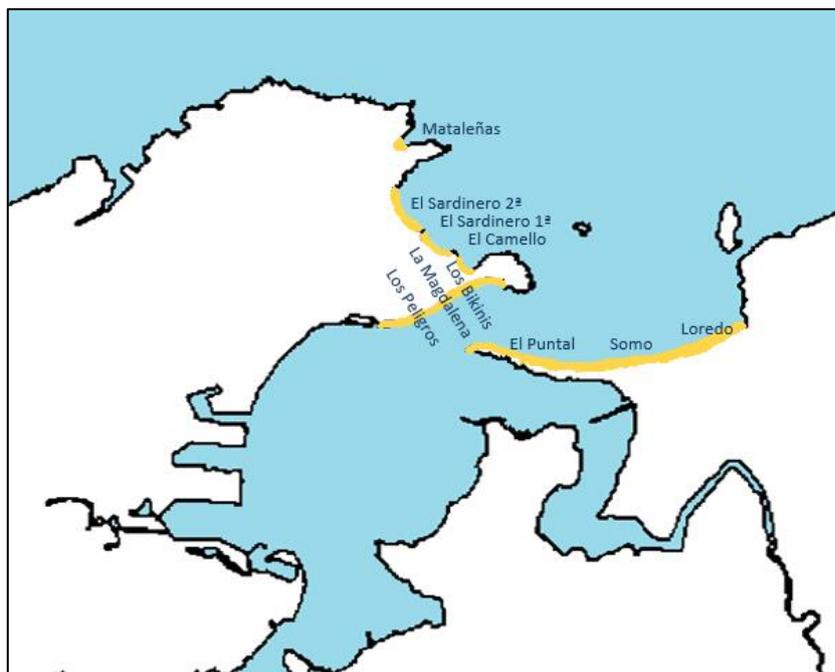


Figura 2.3 Playas en el entorno de la Bahía de Santander

Estas acciones han ocasionado alteraciones en el comportamiento hidrodinámico y el régimen sedimentario. La zona que ha sufrido una mayor afección es la margen Oeste dado que es donde se encuentra el frente urbano y las dársenas del puerto; por el contrario, la margen Este es la zona que ha sufrido menos modificaciones. Algunas de estas superficies rellenas son recuperables, aunque para otras muchas el proceso es irreversible. En la actualidad, se tratan de recuperar zonas de alto valor ecológico integrándolas de nuevo en la hidrodinámica del estuario.

Dado que se trata de un estudio sobre la contaminación por plásticos, hay que destacar la presencia de un punto de vertido de una estación depuradora de aguas residuales, la EDAR de Suesa. Las aguas procedentes de la depuradora se vierten al río Miera, en una zona que pertenece a la Red Natura 2000 (Directiva 92/43/CCE) por tratarse de un Lugar de Importancia Comunitaria: LIC ES1300005 - Dunas del Puntal y Estuario del Miera (véase la figura 2.4).

La EDAR de Suesa está situada en el municipio de Ribamontán al Mar y trata aguas residuales generadas por los municipios que conforman la cuenca media y baja del río Miera. Esta estación depuradora fue ampliada en el año 2009 y con ello se puso fin a los vertidos directos a la Bahía de Santander, consiguiendo así una buena calidad ambiental en la zona. Actualmente, la depuración garantiza una calidad del agua óptima para zonas sensibles y el caudal medio diario que vierte al río es de 8182.2 m³/día.

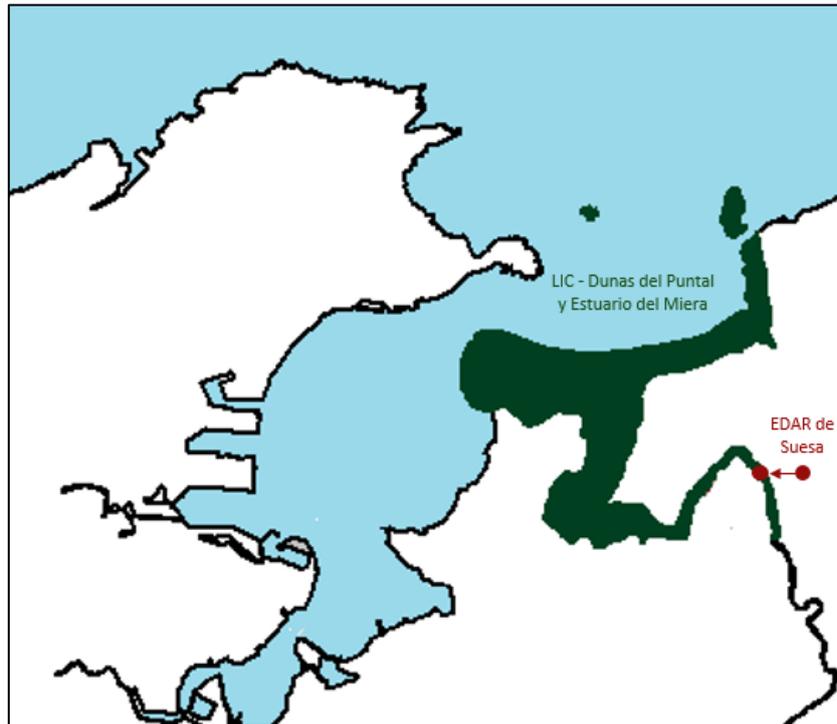


Figura 2.4 Localización del punto de vertido de la EDAR de Suesa y del LIC - Dunas del Puntal y Estuario del Miera

Además de la zona del LIC - Dunas del Puntal y Estuario del Miera, también es de importancia para este estudio las zonas de baño (véase la figura 2.3) y las de producción de moluscos (véase la figura 2.5) que se encuentran en la bahía, dada las molestias y afecciones que pueden causar la presencia de basuras marinas.

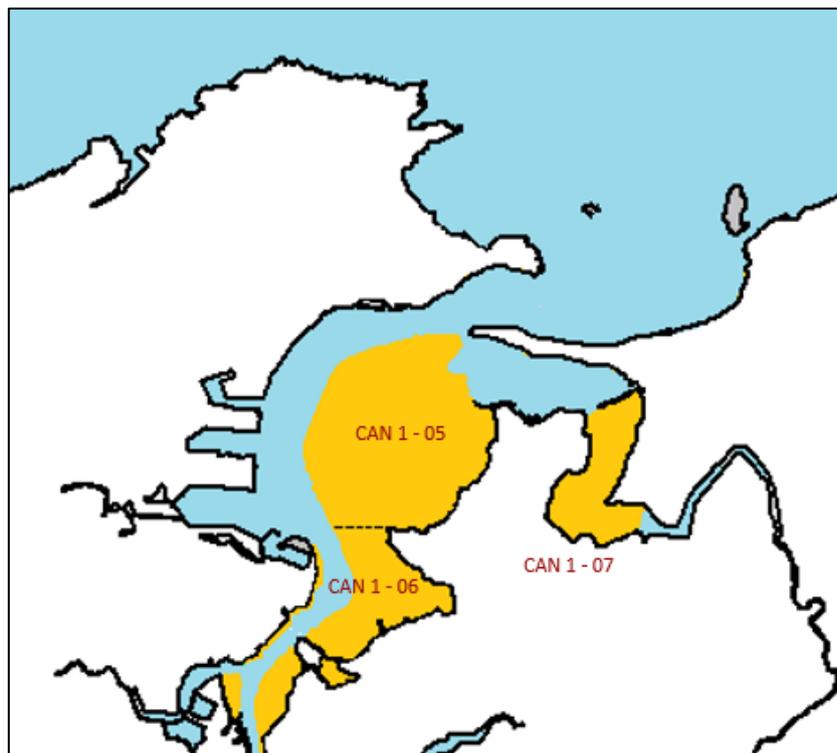


Figura 2.5 Localización de la zonas de producción de moluscos en la Bahía de Santander

Capítulo 3 . METODOLOGÍA

En el presente capítulo se define la metodología para identificar las zonas de acumulación de las basuras marinas en entornos estuarinos (véase el esquema de la figura 3.1).

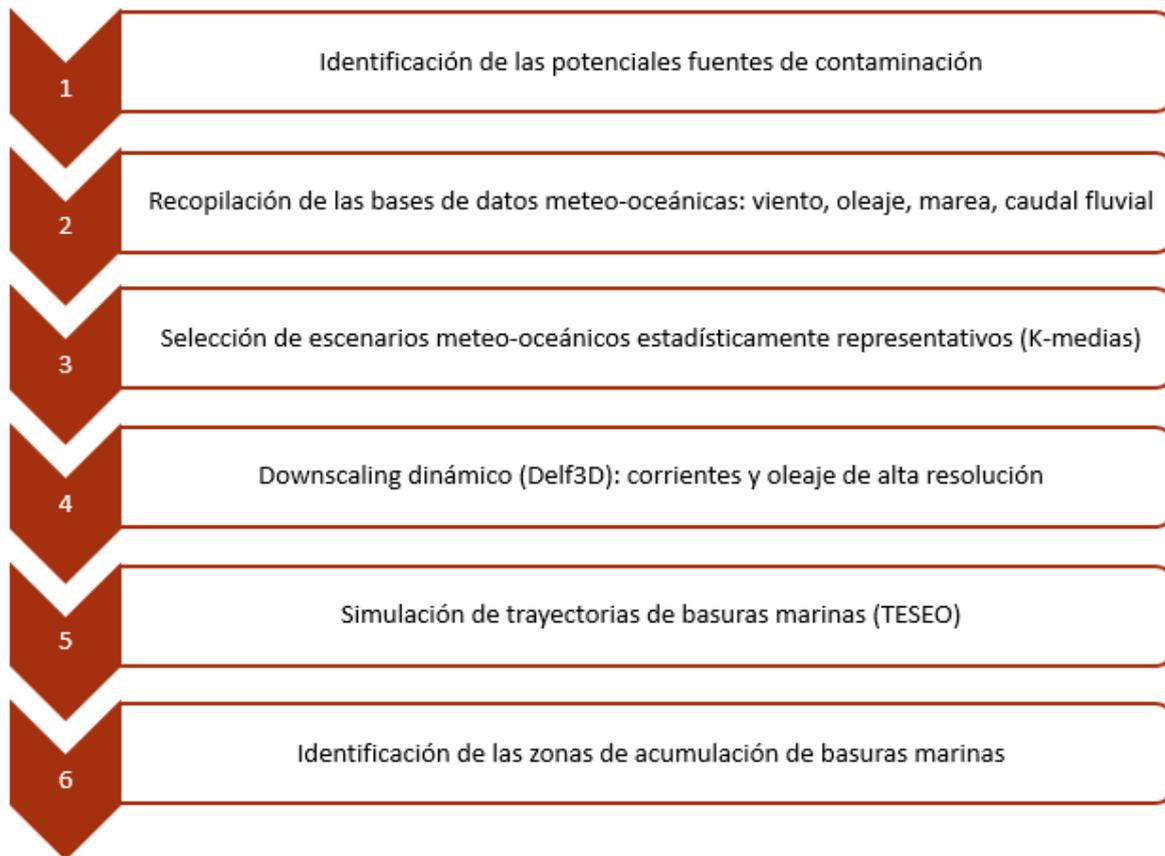


Figura 3.1 Metodología desarrollada para la identificación de basuras marinas

3.1 Identificación de las potenciales fuentes de contaminación

Los residuos plásticos que se encuentran en el medio marino y costero proceden principalmente de fuentes terrestres, aunque también pueden proceder de actividades marítimas.

Para determinar las principales fuentes de contaminación (véase la tabla 3.1) es importante conocer el área de estudio, teniendo en cuenta la proximidad a zonas urbanizadas o industrializadas, así como la localización cercana a plantas de tratamientos de residuos (EDAR). Por otro lado, también hay que tener en cuenta que los estuarios se forman en la desembocadura de los ríos y estos son considerados potenciales fuentes de contaminación (Rech *et al.*, 2014).

Fuentes terrestres	Fuentes marinas
<ul style="list-style-type: none"> • Ciudades • Playas • Ríos • Industrias • Puertos • EDAR 	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades marítimas: mar exterior

Tabla 3.1 Potenciales fuentes de contaminación

3.2 Recopilación de las bases de datos meteo-oceánicas

Para describir las condiciones meteo-oceánicas del lugar, con el fin de escoger unos escenarios estadísticamente representativos y realizar el downscaling dinámico, es necesario obtener los datos de viento, oleaje, marea y caudal fluvial con suficiente resolución para obtener unos resultados adecuados.

Los valores de estas variables se pueden obtener de observaciones o datos simulados. Normalmente se utilizan bases de datos de reanálisis ya que son continuas en el espacio y en el tiempo, son homogéneas y cuentan con registros largos. En el caso de la marea, es habitual el uso de datos instrumentales medidos por mareógrafos situados en las proximidades de la zona de estudio. Por otro lado, para el estudio del transporte de residuos a escala local se puede despreciar el efecto de la marea meteorológica.

3.3 Selección de escenarios meteo-oceánicos estadísticamente representativos

Partiendo de las bases de datos de las dinámicas actuantes que se han recopilado en el apartado anterior, se procede a identificar los escenarios meteorológicos, oceánicos y de caudal fluvial estadísticamente representativos de la zona de estudio para la escala temporal objeto de análisis, es decir, para el corto plazo (1 día).

Es importante tener en cuenta que la marea astronómica es una variable determinista y, por tanto, es independiente del resto de variables. Por ello, los escenarios hidrodinámicos de estudio serán el resultado de la combinación de una serie de casos representativos de marea astronómica y una serie de casos seleccionados de las variables locales dependientes (viento, oleaje y caudal fluvial).

3.3.1 Variables dependientes: viento, oleaje y caudal

Para realizar la selección de escenarios estadísticamente representativos de las variables locales dependientes se va a aplicar el algoritmo de clasificación K-medias (KMA). Este

algoritmo divide la nube de datos en un número determinado de grupos o clusters, cada uno de ellos definido por un centroide (Camus *et al.*, 2011).

Para realizar una selección de escenarios adecuada se ha de determinar el menor número posible de escenarios que representen adecuadamente las variables meteo-oceánicas, es decir, el número óptimo de escenarios representativos o número óptimo de clusters (Nc). Para saber si la clasificación representa adecuadamente la serie original de datos se puede utilizar el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe o el índice de acuerdo (skill).

El coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (E) (Nash and Sutcliffe, 1970) expresa la relación de la varianza de la serie de datos histórica que puede ser explicada por los datos clasificados. Es decir, proporciona una medida directa de la habilidad de la clasificación para representar la serie original (Usaquén Perilla *et al.*, 2012). Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 1

Donde:

- x_i : serie de datos original
- c_i : centroide representativo de cada valor de la serie de datos
- N: longitud de la serie de datos

Y en función de su valor, se puede considerar la siguiente escala de aceptación de la clasificación:

- $E \leq 0.5$ *no aceptable*
- $0.5 < E \leq 0.6$ *aceptable*
- $0.6 < E \leq 0.8$ *bueno*
- $E > 0.8$ *excelente*

El índice de acuerdo o índice skill (S) (Willmott, 1981) indica la habilidad de la clasificación según el método estadístico desarrollado por Willmott (1981) y empleado posteriormente por (Li, Zhong and Boicourt, 2005; Warner, Geyer and Lerczak, 2005). Este índice se presenta de forma estandarizada reflejando el nivel de precisión en el que las variables clasificadas estiman las variables históricas originales. Se determina de la siguiente manera:

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |x_{mod} - x_{obs}|^2}{\sum_{i=1}^N (|x_{mod} - \bar{x}_{obs}| + |x_{obs} - \bar{x}_{obs}|)^2}$$

Ecuación 2

Donde:

- x_{obs} : serie de datos original

- x_{mod} : serie sintética constituida por los centroides resultado de la clasificación
- N: longitud de la serie de datos

Según Li, Zhong and Boicourt (2005), el índice skill indica el grado en el que las desviaciones de la serie original respecto de su media se corresponden con las desviaciones de la serie clasificada respecto de dicha media.

Según los valores del índice, se obtiene la siguiente aceptación de la clasificación:

- $S = 1$ *excelente*
- $S = 0$ *pésimo*

Cuánto más próximo sea el valor del índice skill a 1, habrá un mejor acuerdo entre las dos series comparadas alcanzando el perfecto acuerdo en $S = 1$.

Para obtener el número óptimo de clusters (N_c) se efectuarán las clasificaciones con distintos nº de clusters y se calculará el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe y el índice de acuerdo (skill) con el fin de realizar una selección de escenarios que represente la serie óptimamente, eligiendo el N_c asociado a un valor de $E > 0.8$ y $S \sim 1$.

Por último, se aplica el algoritmo de clasificación K-medias para seleccionar los casos representativos de viento, oleaje y caudal (C_i) con el número óptimo de clusters obtenido.

3.3.2 Variable independiente: marea astronómica

Para determinar la marea astronómica se representa la función de distribución de carreras de marea (véase la figura 3.2), que se ha obtenido mediante una simulación de 500 años a partir del análisis armónico de los datos de marea (Pawlowicz, Beardsley and Lentz, 2002). Posteriormente, se seleccionan unas carreras de marea equiprobables representativas de la zona de estudio. Cada una de estas carreras de marea se combina con los escenarios de las variables dependientes para obtener los escenarios hidrodinámicos.

$$N_C \cdot N_{CM} = N^{\circ} \text{ de escenarios hidrodinámicos}$$

Ecuación 3

Siendo:

- N_C : nº de casos representativos de las variables dependientes (viento, oleaje, caudal fluvial), cada uno de ellos con una frecuencia de presentación P^{C_i}
- N_{CM} : nº de carreras de marea equiprobables (P^{CM_j})

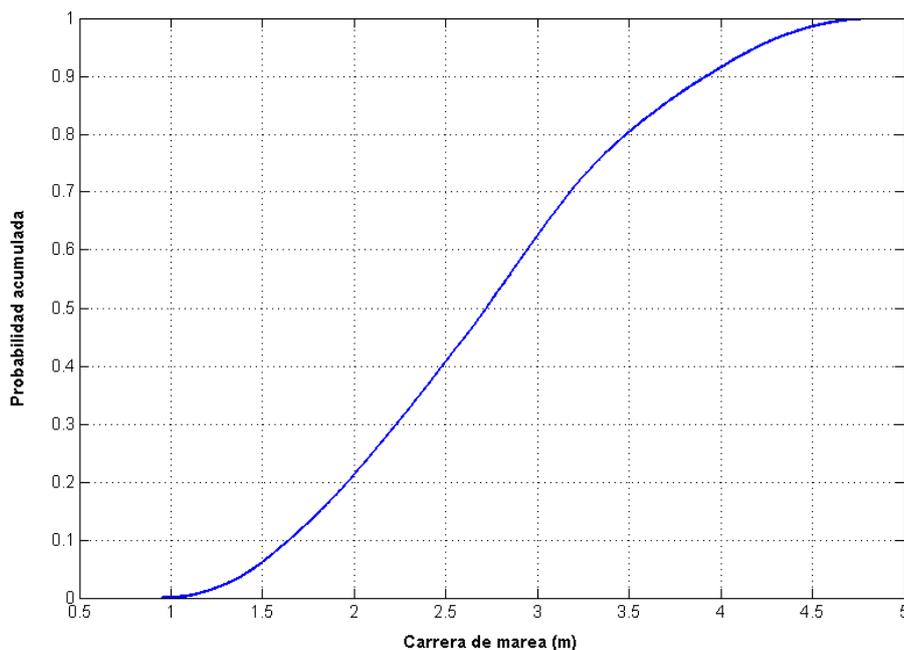


Figura 3.2 Función de distribución de carreras de marea

Para realizar el estudio de dispersión de residuos plásticos hay que tener en cuenta que la trayectoria de las partículas depende también de la fase de marea en la que se vierta la basura al mar. Por lo tanto, se establecen también unas fases de marea equiprobables que representen los posibles escenarios en los que se pueden verter las basuras.

Por lo tanto, para la simulación de trayectorias de partículas se tendrán los siguientes escenarios de transporte:

$$N_C \cdot N_{CM} \cdot N_{tk} = N^{\circ} \text{ de escenarios de transporte}$$

Ecuación 4

Siendo:

- N_C : nº de casos representativos de las variables dependientes (viento, oleaje, caudal fluvial), cada uno de ellos con una frecuencia de presentación P^{Ci}
- N_{CM} : nº de carreras de marea equiprobables (P^{CMj})
- N_{tk} : nº de fases de marea equiprobables (P^{tk})

3.4 Downscaling dinámico

Una vez determinados los escenarios meteo-oceánicos representativos de la zona, se procede a realizar un modelado numérico para caracterizar la hidrodinámica de la zona de estudio. Para ello se emplea el modelo Delft3D (Roelvink and Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics, 2006), cuyas características se recogen en el Anejo I.

Con el fin de generar las corrientes y el oleaje de alta resolución para cada uno de los escenarios hidrodinámicos seleccionados en el paso anterior se emplean los módulos Delft3D-FLOW y Delft3D-WAVE.

Para poder ejecutar el modelo es necesario definir la discretización del dominio de cálculo, las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y realizar un proceso de calibración de los diferentes parámetros del modelo.

3.5 Simulación de trayectorias de basuras marinas

Una vez obtenidos el oleaje y las corrientes de alta resolución, estos resultados serán los forzamientos del modelo lagrangiano de transporte de partículas TESEO (Abascal *et al.*, 2017) desarrollado por IHCantabria, cuyas características se detallan en el Anejo II.

Los resultados que se obtienen del modelo TESEO son las trayectorias de las partículas en los diferentes escenarios objeto de análisis. A partir de dichas trayectorias puede obtenerse la probabilidad de contaminación en diferentes instantes de tiempo.

3.6 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas

Conociendo las probabilidades de ocurrencia ($P_{i,j,k}$) y de contaminación ($P_{i,j,k}^C$) de los distintos escenarios de transporte objeto de análisis, se realiza un análisis estadístico para identificar las zonas de acumulación de basuras marinas en el corto plazo.

La probabilidad de contaminación global a un tiempo horizonte (P) se calcula según la siguiente expresión:

$$P = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_{CM}} \sum_{k=1}^{N_t} P_{i,j,k} \cdot P_{i,j,k}^C$$

Ecuación 5

Donde:

$$P_{i,j,k} = P^{C_i} \cdot P^{CM_j} \cdot P^{t_k} \quad \rightarrow \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{j=1}^{N_{CM}} \sum_{k=1}^{N_t} P_{i,j,k} = 1$$

$$C_i \{i=1,2,\dots,N_C\}, \{P^{C_1}, P^{C_2}, \dots, P^{C_N}\} \quad \rightarrow \sum_{i=1}^{N_C} P^{C_i} = 1$$

$$CM_j \{j=1,2,\dots,N_{CM}\}, \{P^{CM_1}, P^{CM_2}, \dots, P^{CM_N}\} \quad \rightarrow \sum_{j=1}^{N_{CM}} P^{CM_j} = 1$$

$$t_k \{k=1,2,\dots,N_t\}, \{P^{t_1}, P^{t_2}, \dots, P^{t_N}\} \quad \rightarrow \sum_{k=1}^{N_t} P^{t_k} = 1$$

$$P_{i,j,k}^C = n / N$$

Siendo:

- n: nº de partículas que han llegado a una zona determinada
- N: nº total de partículas empleado en la simulación

Dado que el objetivo específico de este estudio es realizar un análisis de sensibilidad del grado de afección que tiene la fase de marea en la que se produce el vertido en los resultados de acumulación, se aplicará la metodología descrita considerando diferente número de fases de mareas y se compararán los resultados obtenidos.

Análisis de sensibilidad de las fases de marea

Para determinar la influencia del número de fases de marea que se utilizan para estudiar la trayectoria de las partículas se realiza un análisis de sensibilidad de las fases de marea. Para ello, se escogerán los dos escenarios de las variables dependientes que se consideran más significativos en cuanto al estudio de la trayectoria de partículas, estos son: el escenario más probable y el que presenta el mayor caudal de avenida. Estos escenarios de viento, oleaje y caudal, junto a las carreras de marea equiprobables (véanse las figuras 3.3 y 3.4) se estudiarán considerando:

- 4 fases de marea equiprobables ($P^{tk} = 1/4$)
- 6 fases de marea equiprobables ($P^{tk} = 1/6$)
- 8 fases de marea equiprobables ($P^{tk} = 1/8$)

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos y se realizará una valoración cualitativa del número de fases de marea que resulta más adecuado para el presente estudio.

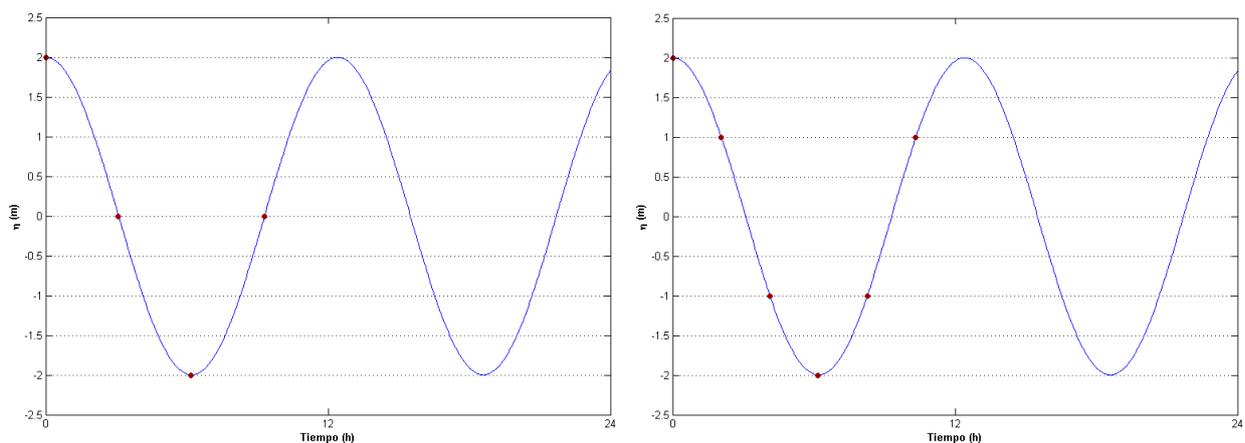


Figura 3.3 Fases de marea equiprobables: 4 ($P^{tk} = 1/4$), 6 ($P^{tk} = 1/6$)

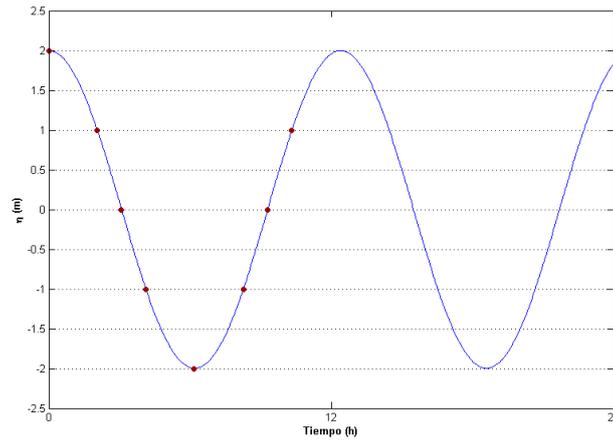


Figura 3.4 Fases de marea equiproables: 8 ($P^{tk} = 1/8$)

Una vez determinado el número de fases de marea más apropiado, se procede a evaluar los resultados obtenidos aplicando la metodología con este número de fases de marea. Se obtendrán, para los escenarios meteo-oceánicos más frecuente y de mayor caudal, los mapas con las zonas más probables de acumulación de desechos marinos en el corto plazo (1 día).

Capítulo 4 . DATOS DE PARTIDA

En el presente capítulo se describen las bases de datos e información utilizadas para el desarrollo de este estudio, que son datos batimétricos y de las dinámicas actuantes.

4.1 Batimetría

Las características del fondo marino tienen especial relevancia dado que afectan notablemente a la propagación del oleaje hacia la costa y, por tanto, a la formación de las corrientes. Los forzamientos generadores de dichas corrientes son principalmente el movimiento de rotación de la Tierra, la presión atmosférica y la acción de los vientos, así como la configuración de las costas y las características de los fondos marinos y litorales, es decir, la batimetría.

En grandes profundidades, las irregularidades del fondo que afectan a la propagación de las ondas son aquellas a gran escala, tales como cañones o grandes cabos; sin embargo, en profundidades intermedias y aguas someras el comportamiento de las ondas es un reflejo de las formas batimétricas.

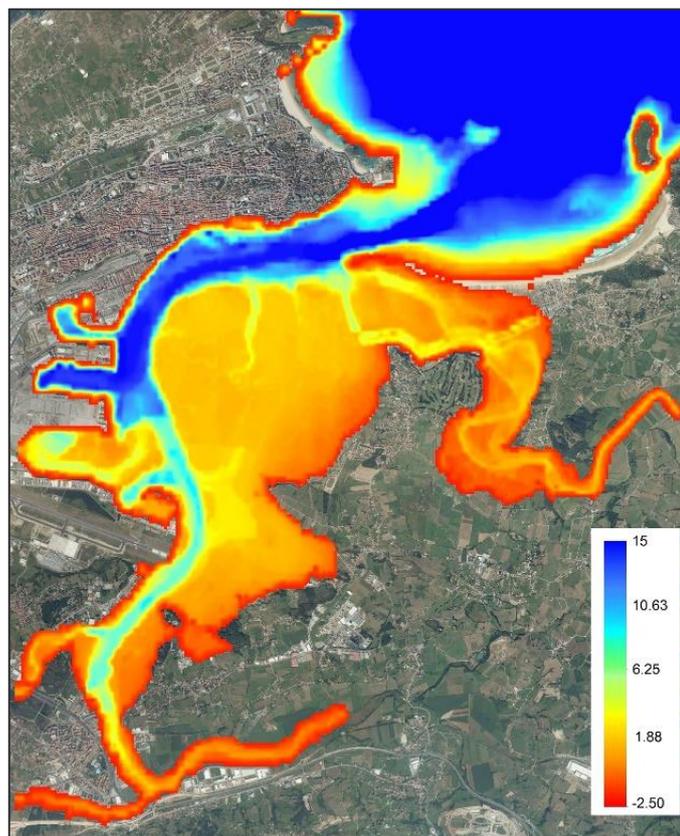


Figura 4.1 Batimetría de la zona de estudio (profundidad respecto al NMM local)

En este estudio se ha utilizado una batimetría de alta resolución de la Bahía de Santander (véase la figura 4.1), que ha sido obtenida mediante la combinación de diferentes fuentes de datos. Para la zona exterior de la Bahía se han utilizado los siguientes datos:

- ETOPO 1 Global Relief Model, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
- Carta náutica 940, Instituto Hidrográfico de la Marina

Para la zona interior se ha empleado la siguiente información:

- Batimetrías de la zona de los canales de navegación actualizadas en 2012, Autoridad Portuaria de Santander
- Batimetrías de las zonas de los bajos mareales actualizadas en 2013, Departamento de Topografía de la Universidad de Cantabria
- Datos obtenidos de la campaña batimétrica en la ría de Cubas, enero de 2013, llevada a cabo por AZTI
- Información batimétrica de la bocana y de pequeñas zonas del interior de la Bahía obtenidos de estudios anteriores del IHCantabria

4.2 Dinámicas actuantes

A continuación se describen las bases de las dinámicas actuantes en la zona de estudio, que son: marea, viento, oleaje y caudal fluvial. Como ya se ha comentado, dado que el estudio se lleva a cabo a escala local, se puede despreciar el efecto de la marea meteorológica en las corrientes y, por lo tanto, en el transporte de las basuras marinas.

4.2.1 Marea astronómica

Para caracterizar la marea astronómica en el exterior de la Bahía de Santander se han utilizado los datos instrumentales comprendidos entre febrero de 2008 y diciembre de 2012, procedentes del mareógrafo de Santander, suministrados por Puertos del Estado. El mareógrafo recoge datos de altura de marea en el punto donde se encuentra situado (véase la figura 4.2), con una resolución temporal de 1 h.

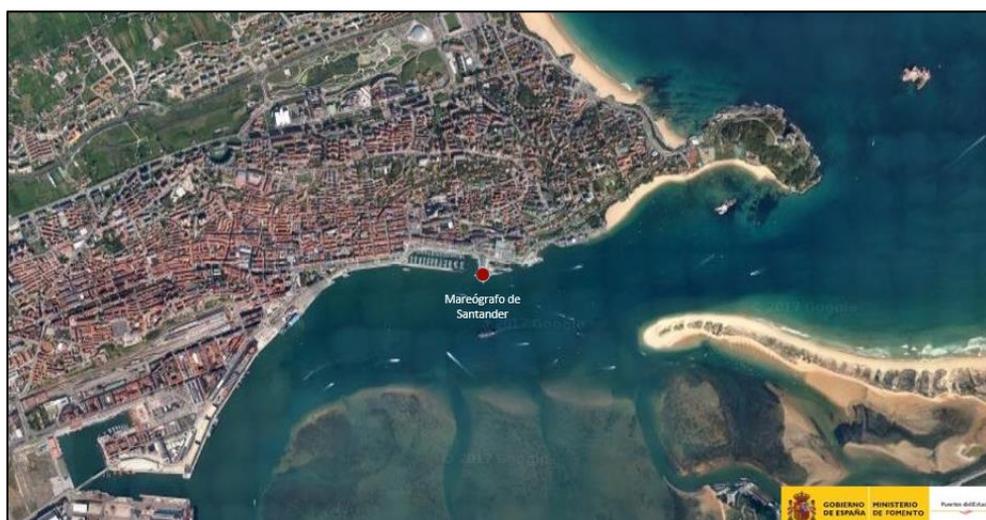


Figura 4.2 Localización del mareógrafo de Santander (Fuente: Puertos del Estado)

4.2.2 Oleaje

Para la caracterización del oleaje en las proximidades del litoral español se dispone de la base de datos de reanálisis Downscaled Ocean Waves (DOW) (Cid *et al.*, 2014) de IHCantabria. Para este estudio se han utilizado los datos de estados de mar comprendidos entre octubre de 1970 y diciembre de 2008.

Esta base de datos ha sido obtenida mediante un downscaling híbrido, consistente en la selección y propagación de un subconjunto de estados de mar representativos de aguas profundas obtenidos de la base de datos calibrada GOW. La propagación se realizó con el modelo de propagación de oleaje Simulating Waves Nearshore (SWAN) (Booij, Ris and Holthuijsen, 1999) con una elevada resolución espacial ($dx \sim 0.005^\circ$ y $dy \sim 0.004^\circ$) sobre una batimetría de detalle. La serie temporal de los estados de mar propagados puede ser reconstruida en cada punto de la malla, entre febrero de 1948 y agosto de 2015, usando una técnica de interpolación no lineal. La capacidad para reproducir las series temporales ha sido validada comparando los datos DOW con los registros de las boyas. En la figura 4.3 se muestran las mallas de propagación empleadas para generar la base de datos DOW en el Cantábrico.

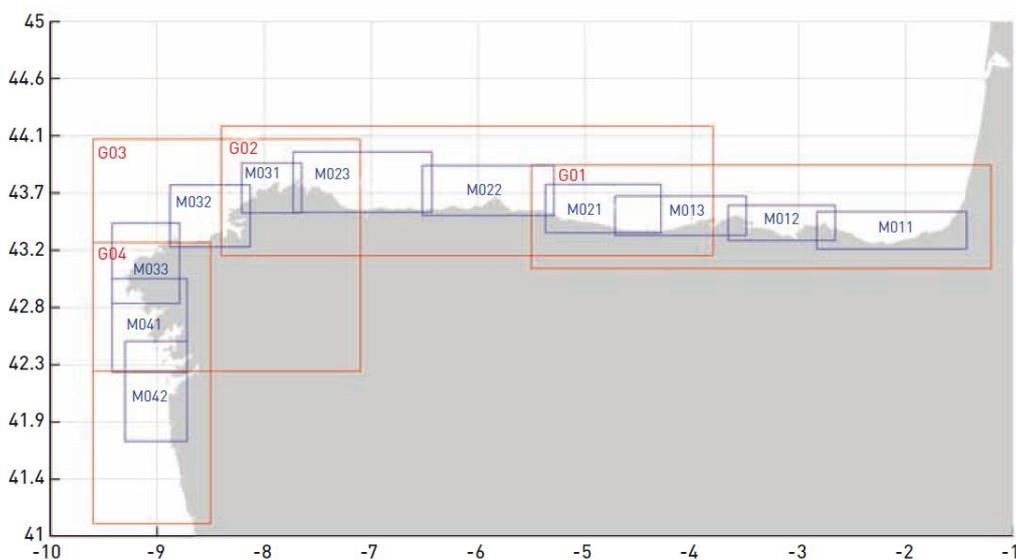


Figura 4.3 Mallas de propagación del oleaje en el Cantábrico (Fuente: IHCantabria)

4.2.3 Viento

Los datos de velocidad y dirección del viento a 10 m sobre el nivel del mar se han obtenido de la base de datos SeaWindNCEP-HR (IHCantabria) con una resolución espacial de aproximadamente 0.02° y una resolución temporal de 1 h. Para el presente estudio se han utilizado los datos de velocidad y dirección del viento medios diarios entre octubre de 1970 y diciembre de 2008.

Se trata de unos datos obtenidos mediante un downscaling híbrido que combina el modelado numérico (downscaling dinámico) y herramientas matemáticas (downscaling estadístico). El

downscaling dinámico consiste en una simulación de vientos horaria, utilizando el modelo WRF (Michalakes J *et al.*, 2001). La selección para la simulación se llevó a cabo utilizando el algoritmo de máxima disimilitud. Este subconjunto de escenarios de viento permite realizar una reconstrucción de series temporales usando la técnica de análogos.

En la figura 4.4 se muestran los puntos con datos de viento en la zona de estudio y en la figura 4.5 la capacidad de la reconstrucción mediante la comparación de la base de datos de alta resolución generada y la base de datos de baja resolución en un mismo punto.

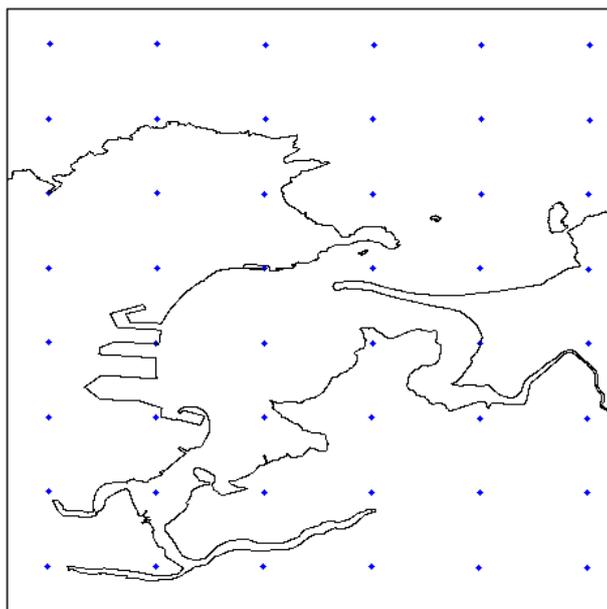


Figura 4.4 Puntos con datos de viento (SeaWindNCEPHR) en la Bahía de Santander (Fuente: IHCantabria)

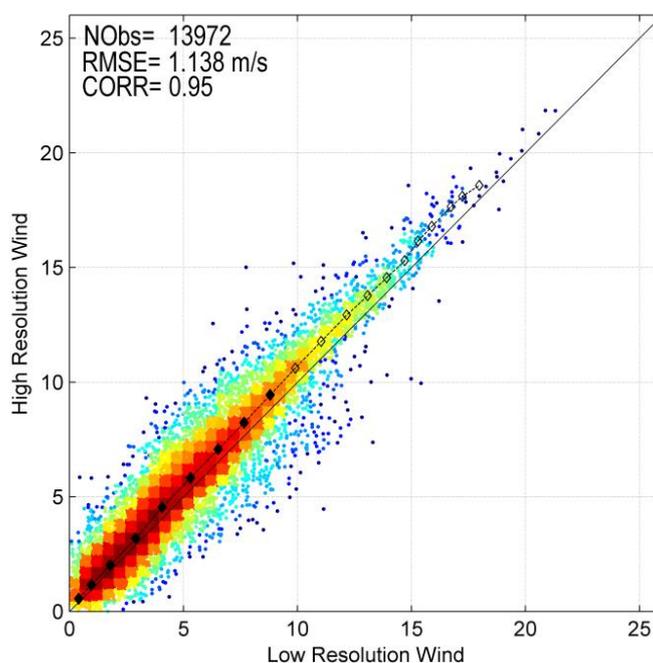


Figura 4.5 Capacidad de la técnica de análogos para la reconstrucción de la serie completa SeaWindNCEP-HR (Fuente: IHCantabria)

4.2.4 Caudal fluvial

Para determinar el aporte fluvial del río Miera a la Bahía de Santander se han utilizado los datos del “Estudio de Recursos Hídricos de los Ríos de la Vertiente Norte de Cantabria. Periodo 1987-2012”, elaborado por el IHCantabria y el Gobierno de Cantabria.

En este estudio se realizó una simulación numérica del caudal medio diario de varios ríos en régimen natural, entre ellos, el Miera. En concreto, en este estudio se va a emplear el caudal obtenido en el punto de cálculo más próximo a la desembocadura (véase la tabla 4.1 y la figura 4.6).

PC	UTM X	UTM Y	Cuenca Vertiente (Km ²)
1	442659	4795779	97,01
2	442456	4801065	162,20
3	442864	4806872	52,53
4	442675	4806992	207,86
5	442692	4807097	260,39
6	442063	4808647	296,38

Tabla 4.1 Localización de los puntos de cálculo y área vertiente en la cuenca del río Miera (Fuente: IHCantabria)

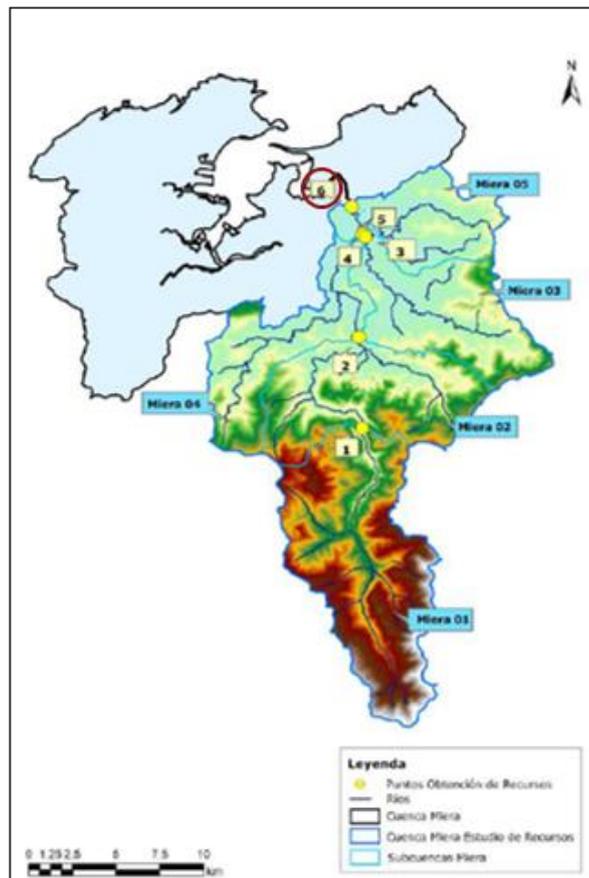


Figura 4.6 Localización de los puntos de obtención de recursos y definición de subcuencas de la cuenca del río Miera (Fuente: IHCantabria)

Capítulo 5 . ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA MAREA

En este capítulo se realiza un análisis de sensibilidad del grado de afección del número de fases de marea que se escogen para determinar las trayectorias de partículas en estuarios y bahías. Para ello, se aplica la metodología descrita en el capítulo 3 a la zona de estudio, es decir, a la Bahía de Santander, considerando, para dos escenarios meteo-oceánicos (el más frecuente y el de mayor caudal), diferente número de fases de marea, con el fin de comparar los resultados que se obtengan.

5.1 Identificación de las potenciales fuentes de contaminación

Una vez analizadas las características de la zona de estudio descritas en el capítulo anterior, se determina que las principales fuentes de contaminación de la bahía son de origen terrestre, centrándose principalmente en la desembocadura del río Miera, en el cual se encuentra un punto de vertido de la EDAR de Suesa, el frente marítimo de la ciudad, las playas y la zona del puerto.

En la figura 5.1 se señalan las principales fuentes de contaminación de la Bahía de Santander.

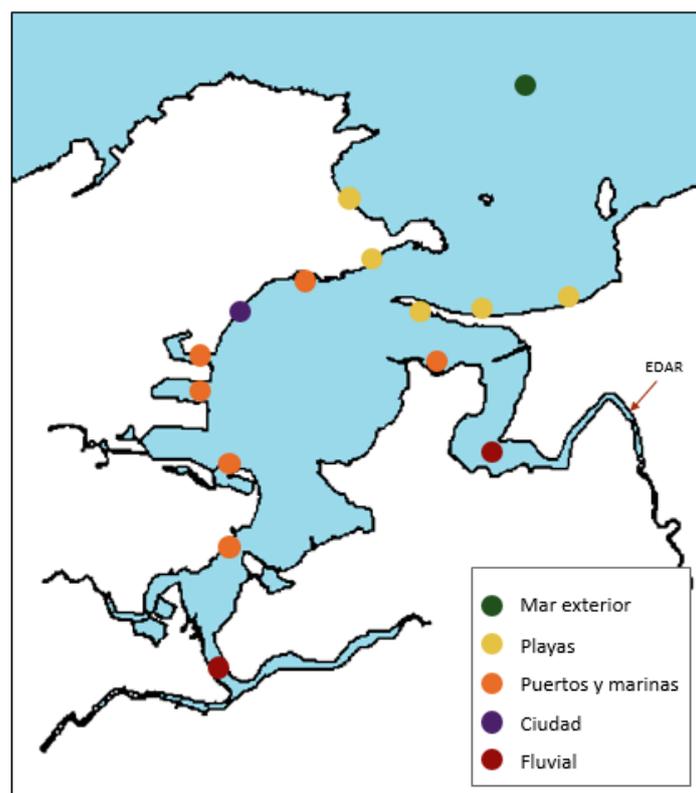


Figura 5.1 Principales fuentes de contaminación en la Bahía de Santander

Sin embargo, como el objetivo de este capítulo es realizar un análisis de sensibilidad del grado de afección de la marea, de los puntos identificados como principales fuentes de contaminación, se han seleccionado 3 distribuidos de forma que puedan presentar distinto

comportamiento al efecto de la marea. Estos 3 puntos seleccionados son los que se presentan en la figura 5.2.

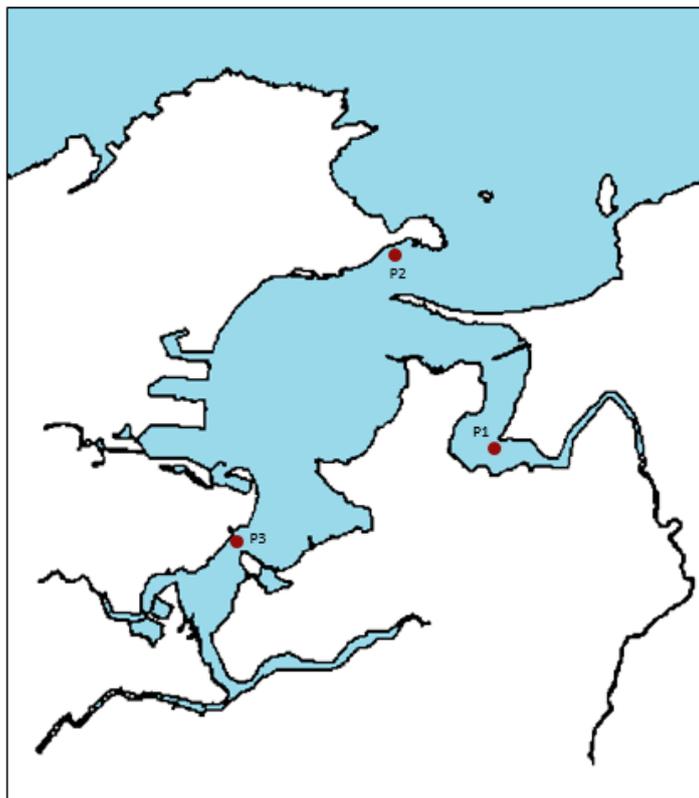


Figura 5.2 Fuentes de contaminación seleccionadas para el análisis de sensibilidad de la marea

5.2 Recopilación de las bases de datos meteo-oceánicas

Las bases de datos que se han utilizado para el presente estudio son las que se presentan en la tabla 5.1, y se describen con mayor detalle en el capítulo 4.

Variable	Base de datos	Periodo de tiempo	Resolución temporal	Resolución espacial
Marea astronómica	Mareógrafo de Santander	01/07/1992 Actualidad	1 h	$dx = dy \sim 0.02^\circ$
Viento	SeaWindNCEPHR	01/02/1948 31/12/2009	1 día	Puntual
Oleaje	DOW	01/02/1948 31/08/2015	1 h	$dx = dy \sim 0.125^\circ$
Caudal fluvial	Estudio de Recursos Hídricos de los Ríos de la Vertiente Norte de Cantabria	01/10/1970 31/12/2008	1 h	Puntual

Tabla 5.1 Bases de datos meteo-oceánicas

Cabe destacar que de las bases de datos empleadas, la correspondiente a la variable viento tiene una resolución espacial de aproximadamente $dx = 0.02^\circ \sim 2.5$ km (véase la figura 4.4).

Esta resolución resulta adecuada para el cálculo hidrodinámico, por lo que será aquí donde se incluya el efecto del viento.

5.3 Selección de escenarios meteo-oceánicos estadísticamente representativos

5.3.1 Variables dependientes: viento, oleaje y caudal

Para determinar el número óptimo de clusters (N_c) que representen adecuadamente las variables meteo-oceánicas, se ha calculado el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (véase la figura 5.3) y el índice de acuerdo (skill) (véase la figura 5.4) asociados a clasificaciones obtenidas con distinto nº de clusters.

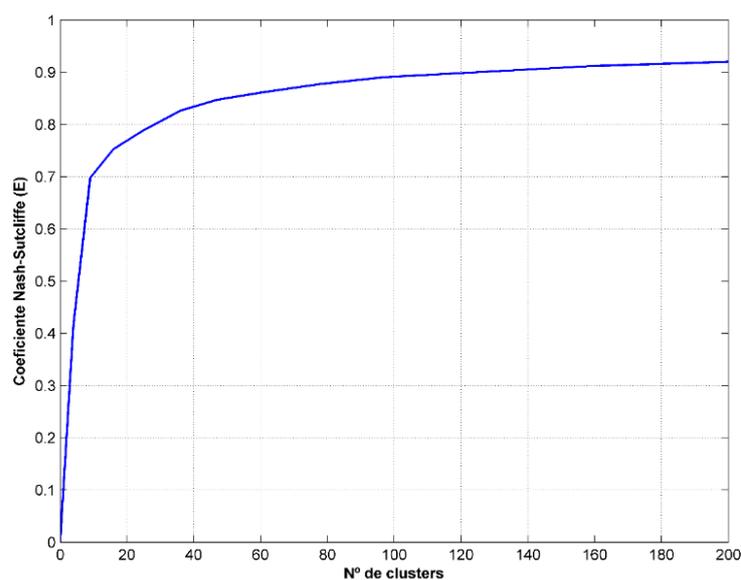


Figura 5.3 Valores del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe en función del número de clusters empleados

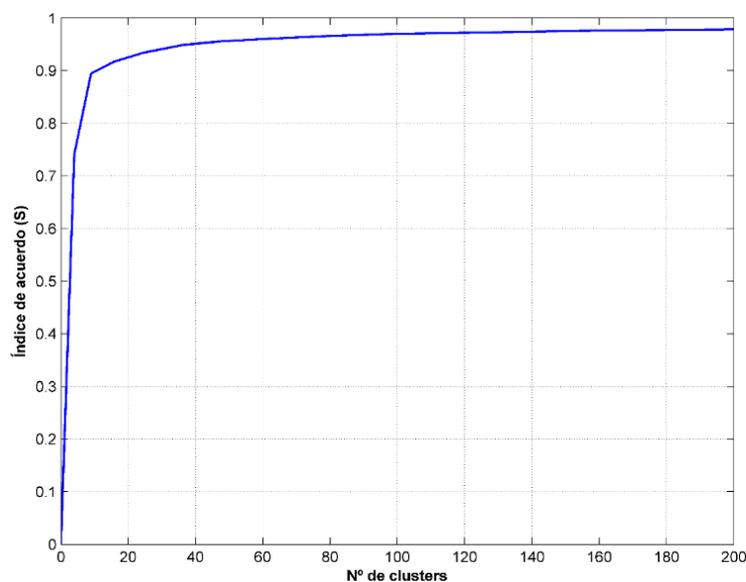


Figura 5.4 Valores del índice de acuerdo en función del número de clusters empleados

De los gráficos anteriores se obtiene que utilizando 36 clusters el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe es de 0.8265, siendo mayor que 0.8 es excelente. Además, el índice de acuerdo es de 0.9486 que se aproxima bastante a 1. Por lo tanto, el nº óptimo de clusters (N_c) para las variables de estudio es de 36.

A continuación, en las figuras 5.5 y 5.6, se representa en color rojo la nube de datos de las variables relacionadas entre sí: viento en la dirección x (v_x), viento en la dirección y (v_y), altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p), dirección del oleaje (θ), y caudal fluvial (Q); y en azul los centroides de cada uno de los 36 grupos definidos según el algoritmo de clasificación K-medias (KMA).

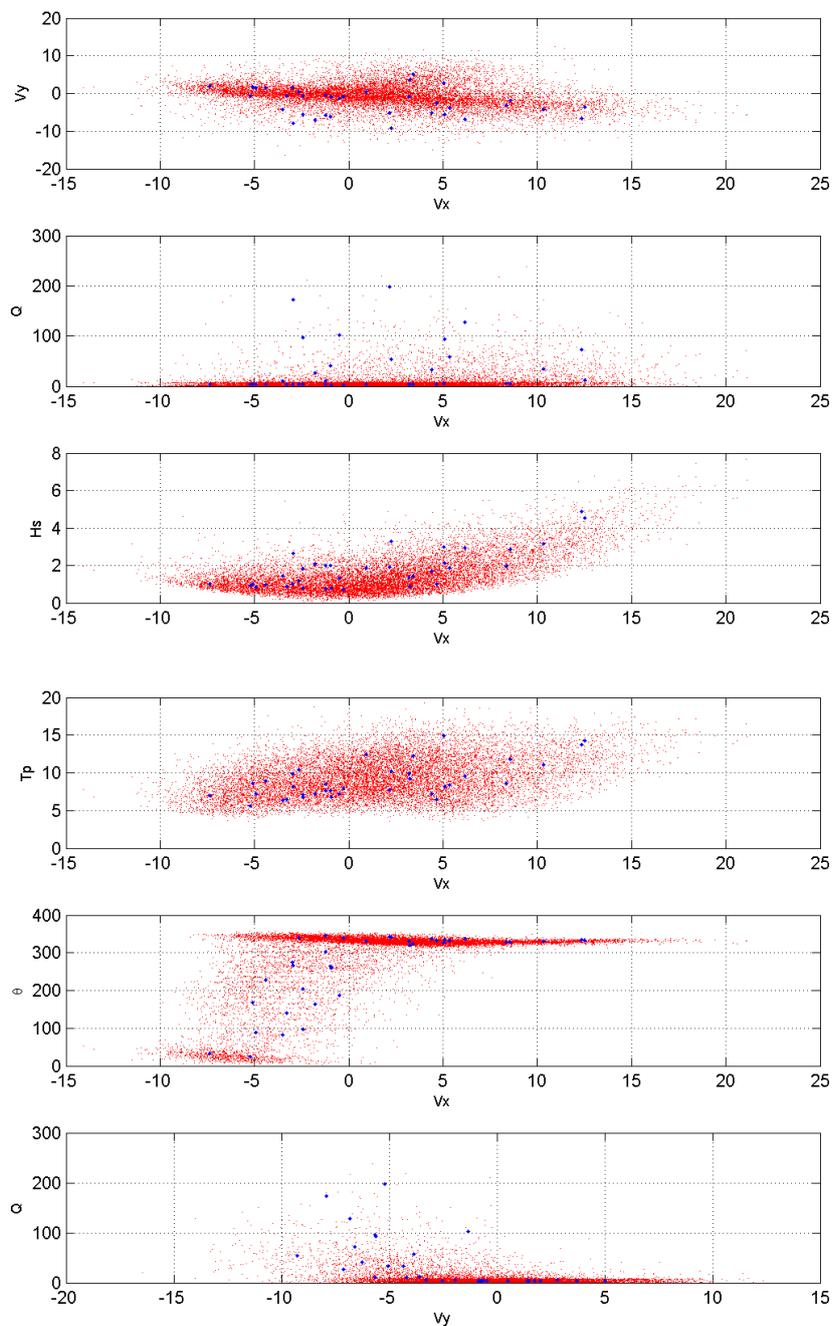


Figura 5.5 Distribución de los centroides del algoritmo K-medias (KMA). Parte 1

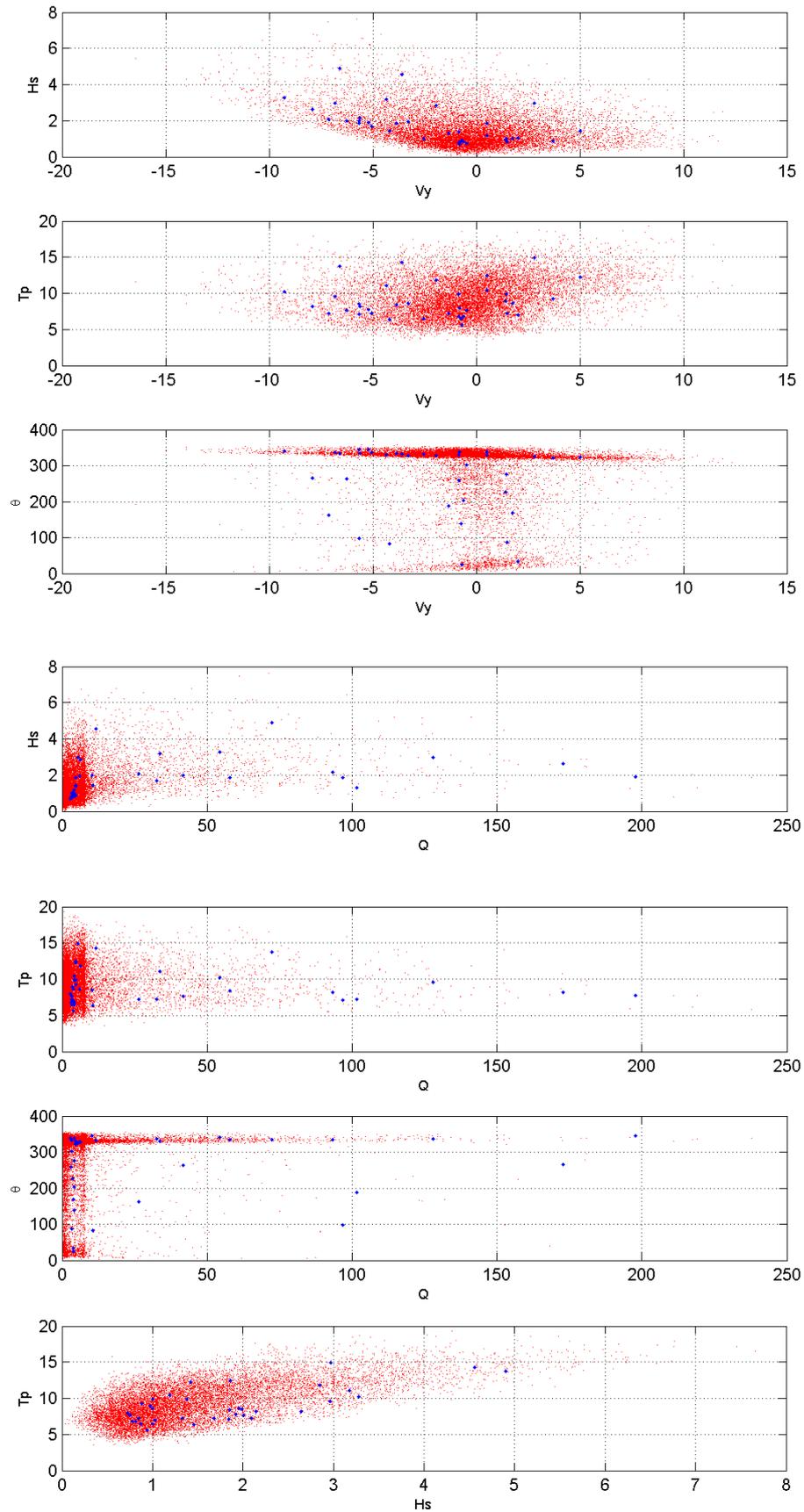


Figura 5.6 Distribución de los centroides del algoritmo K-medias (KMA). Parte 2

Como podemos observar en la figura anterior, la distribución de los datos queda correctamente representada mediante los centroides de los 36 clusters seleccionados. A continuación, en la figura 5.7, se muestran los valores de las variables para cada uno de los escenarios, así como su frecuencia de ocurrencia asociada.

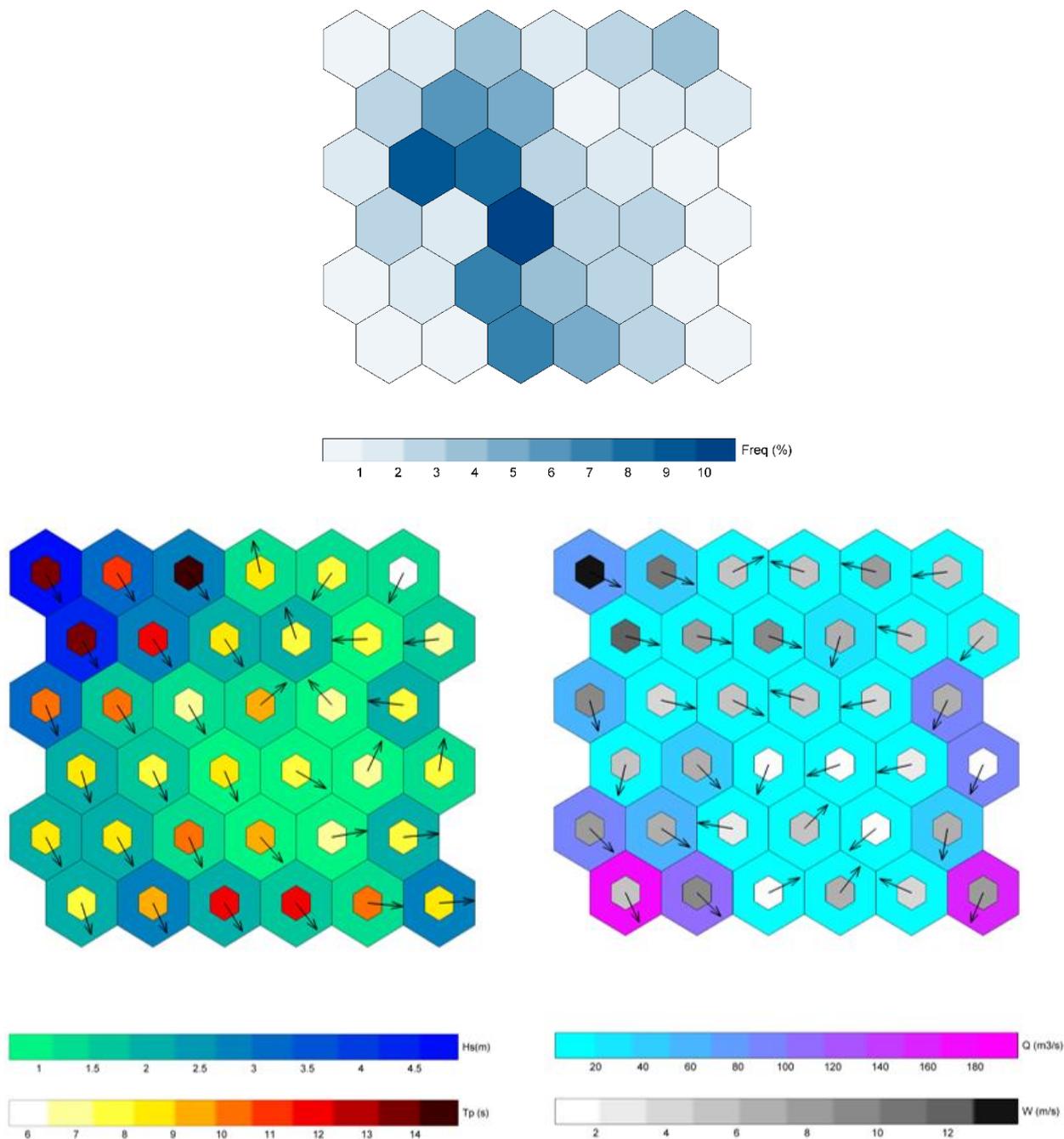


Figura 5.7 Escenarios estadísticamente representativos de las variables viento, oleaje y caudal fluvial

Para el análisis de sensibilidad de las fases de marea se han seleccionado los 2 escenarios de las variables locales dependientes (viento, oleaje y caudal fluvial) que se consideran de mayor relevancia para el objetivo perseguido. Estos son: el escenario más probable (Esc. 16) y el

escenario que presenta mayor caudal de avenida (Esc. 6). Los valores de las variables meteorológicas de estos escenarios se presentan en la tabla 5.2.

	Escenario 6	Escenario 16
Freq. Ocurrencia (%)	0.0644	10.8100
Q (m ³ /s)	197.8782	2.7915
Vx (m/s)	2.1554	-0.2664
Vy (m/s)	-5.1987	-0.7921
Hs (m)	1.9174	0.7225
Tp (s)	7.7211	7.9336
θ (°)	344.2409	338.3845

Tabla 5.2 Escenarios meteo-oceánicos que se van a utilizar para el análisis de sensibilidad de la marea

5.3.2 Variables independientes: marea astronómica

La marea astronómica en la Bahía de Santander tiene la función de distribución que se muestra en la figura 5.8. Se ha optado por la selección de 4 carreras de marea equiprobables ($P^{CMj} = 1/4$) representativas de la zona de estudio.

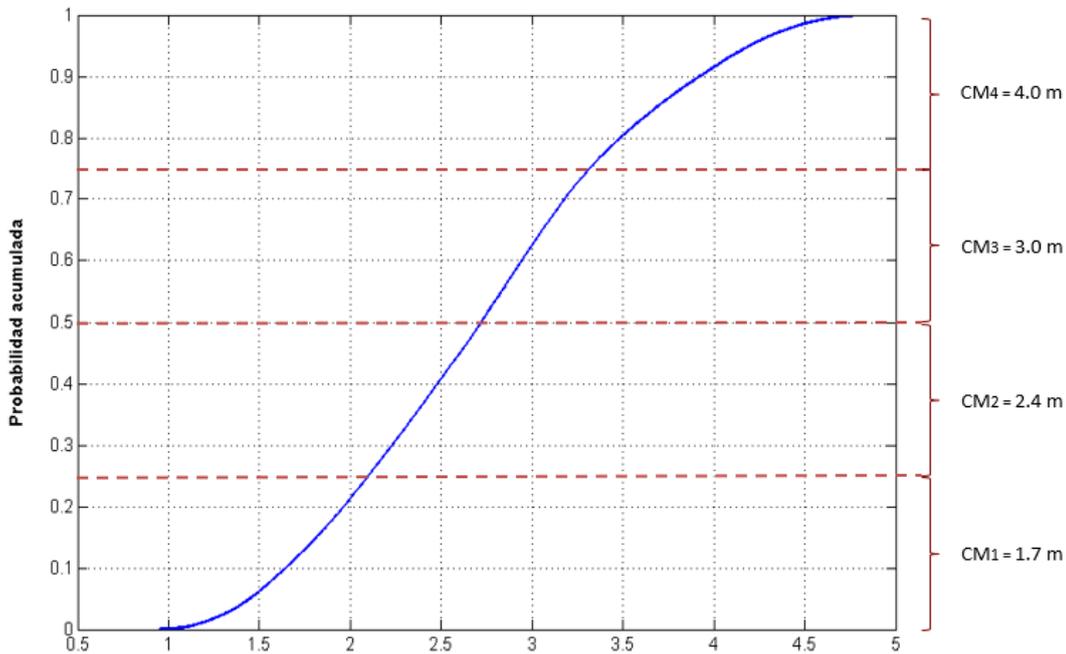


Figura 5.8 Carreras de marea equiprobables ($P^{CMj} = 1/4$)

Las carreras de marea representadas se combinan con los escenarios de las variables dependientes para obtener los escenarios hidrodinámicos.

$$N_C \cdot N_{CM} = N^{\circ} \text{ de escenarios hidrodinámicos} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$2 \cdot 4 = 8 = N^{\circ} \text{ de escenarios hidrodinámicos}$$

La trayectoria que siguen las partículas es muy dependiente de la fase de marea en la que se produzca el vertido de basura al mar. Por lo tanto, se consideran diferentes fases de marea que representen los posibles escenarios de vertido y que son las que se utilizan para simular los escenarios de transporte:

$$N_C \cdot N_{CM} \cdot N_{tk} = \text{Escenarios de transporte (Ecuación 4)}$$

El análisis de sensibilidad de las fases de marea se va a realizar para las fases definidas en las figuras 3.3 y 3.4, correspondiéndose con los siguientes escenarios de transporte:

- 4 fases de marea equiprobables: $2 \cdot 4 \cdot 4 = 32 = \text{Escenarios de transporte}$
- 6 fases de marea equiprobables: $2 \cdot 4 \cdot 6 = 48 = \text{Escenarios de transporte}$
- 8 fases de marea equiprobables: $2 \cdot 4 \cdot 8 = 64 = \text{Escenarios de transporte}$

5.4 Downscaling dinámico

Para generar las corrientes y el oleaje de alta resolución se emplea el modelo numérico Delft3D (Roelvink and Banning, 1994; WL/Delft Hydraulics, 2006). Este modelo ha sido previamente calibrado en la Bahía de Santander en el TFM (Granado Domínguez, 2016).

5.4.1 Configuración del modelo hidrodinámico

Discretización del dominio

La discretización del dominio consiste en definir cada celda de la malla en la dirección horizontal y vertical para la zona de estudio, así como la profundidad de cada celda. Sin embargo, al ser un modelo bidimensional promediado en la dirección vertical (2DH) porque la zona de estudio es un estuario de aguas poco profundas y bien mezcladas, se utiliza una sola capa vertical.

Debido a la complejidad del estuario de Santander, se ha empleado una malla curvilínea con 498 celdas en la dirección del flujo (dirección M) y 510 en la dirección transversal al flujo (dirección N) para la hidrodinámica. Para el oleaje se ha empleado una malla que cubre una extensión similar, de 210 x 235 elementos de cálculo, que cuenta con una menor resolución en la zona interior de la bahía donde el oleaje deja de ser relevante (véase la figura 5.9). En la figura 5.10 se muestra la batimetría utilizada para el área de estudio.

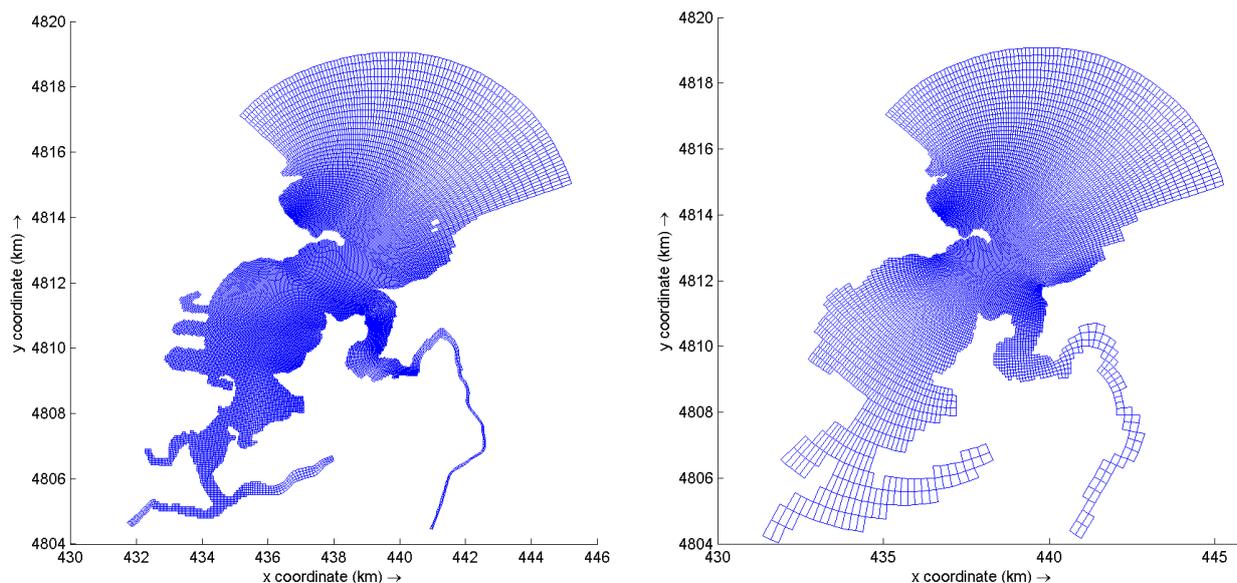


Figura 5.9 Mallas curvilíneas utilizadas para la hidrodinámica (izq) y para el oleaje (der)

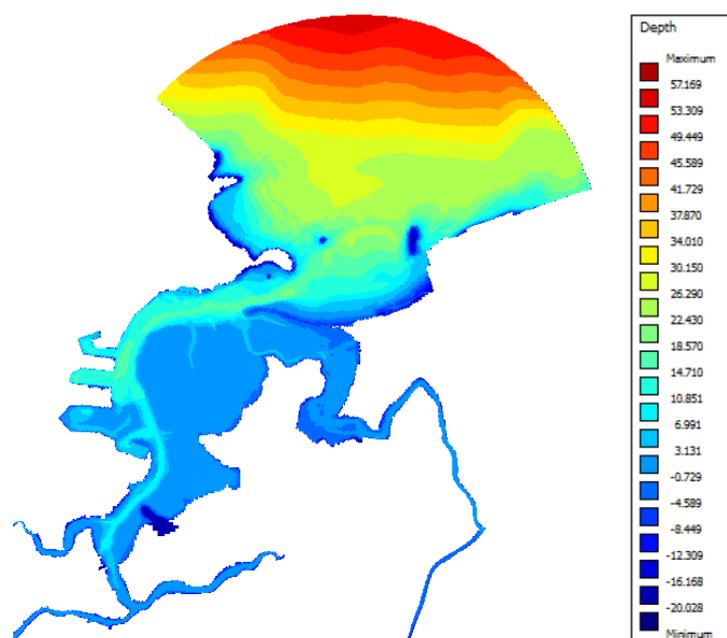


Figura 5.10 Batimetría utilizada para el downscaling dinámico

Parámetros físicos y numéricos

Los valores de los parámetros físicos y numéricos utilizados para el modelado hidrodinámico, son los obtenidos de la calibración llevada a cabo por (Granado Domínguez, 2016). En la siguiente tabla se resumen dichos valores:

Parámetros físicos	
Rugosidad del fondo	Variable
Rugosidad lateral	Free
Viscosidad horizontal de remolino (K)	0.12
Difusividad horizontal de remolino (σ_t)	0.7
Parámetros numéricos	
Paso de tiempo (Δt)	0.2 min
Profundidad umbral	0.1 m
Esquema numérico	Cyclic
Filtro Forester	No

Tabla 5.3 Parámetros de calibración del modelo (Granado Domínguez, 2016)

Condiciones iniciales y de contorno

Como condición inicial se estableció para cada escenario su correspondiente nivel de marea.

Como condiciones de contorno se han introducido las series temporales de nivel (marea astronómica), caudal fluvial, viento y oleaje definidos para cada escenario hidrodinámico.

5.4.2 Resultados

Los resultados obtenidos son las corrientes y oleaje de alta resolución en cada uno de los escenarios hidrodinámicos simulados. Estos resultados son los forzamientos que se utilizarán en el modelado del transporte de partículas.

A continuación se presentan los mapas de altura de ola significativa y corrientes del escenario 16 (mayor frecuencia de ocurrencia) con la carrera de marea $CM4 = 4$ m. En el Anejo III se recogen los resultados del escenario 6 y el 16 con las 4 carreras de mareas diferentes.

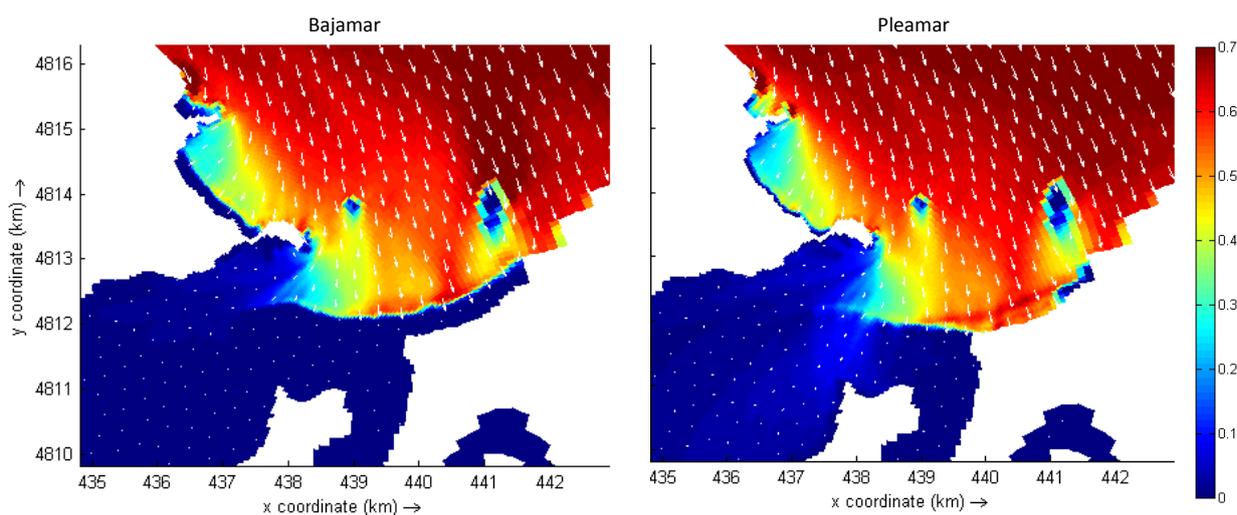


Figura 5.11 Mapas de altura de ola significativa del E.16 CM4 en bajamar y pleamar

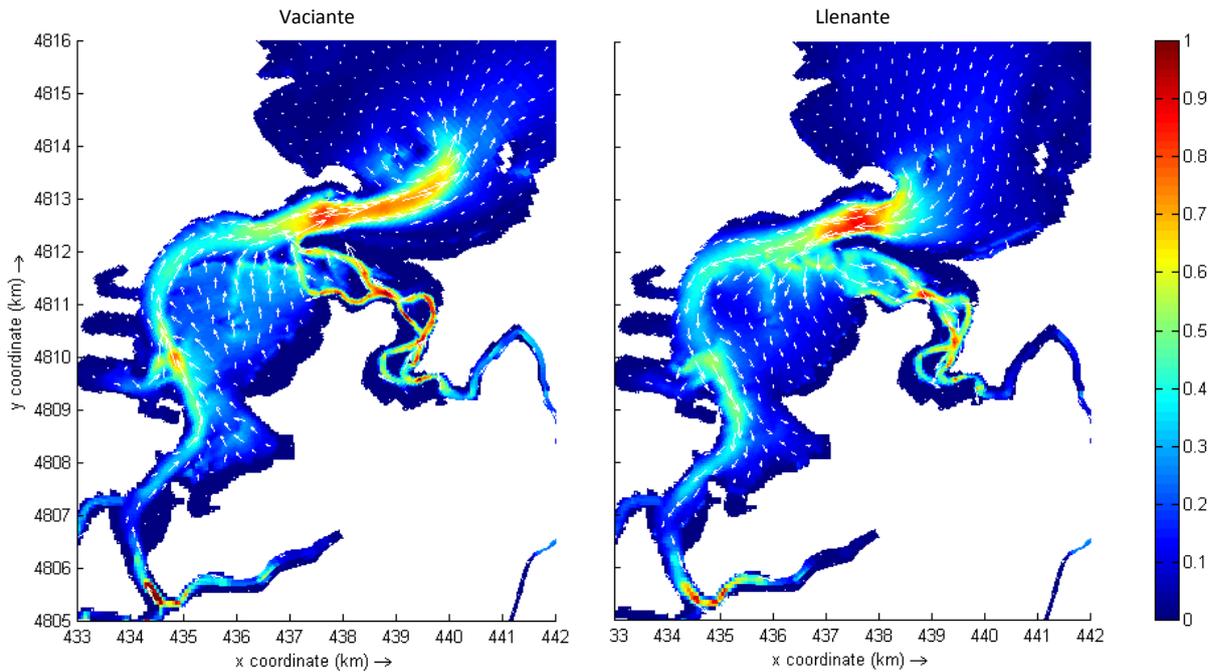


Figura 5.12 Mapas de corrientes del E.16 CM4 en vaciante y llenante

Los oleajes más frecuentes que llegan al área de estudio son los que se presentan en la figura 5.11 y tienen una altura de ola significativa de 0.79 m, un periodo pico asociado de 7.93 s y proceden del NNW.

El oleaje se refracta debido a la orientación de la costa y los frentes de onda tienden a situarse paralelos a la misma. Por esta razón las playas del Sardinero se encuentran más protegidas del oleaje que las de Somo y Loredo, que tienen unas alturas de ola mayores. Sin embargo, hay zonas de estas dos últimas playas que se encuentran protegidas por la presencia de las islas de Santa Marina y de Mouro.

La bocana de la bahía está resguardada de los oleajes procedentes de esta dirección y, por ello, las alturas de ola en la bocana no son muy significativas, siendo de aproximadamente 30 cm tanto en pleamar como en bajamar. En el interior de la bahía el oleaje afecta a la zona próxima a la bocana en bajamar, mientras que en pleamar si es más notable en otras zonas de la bahía, aunque como máximo alcanza los 20 cm.

En cuanto a las corrientes, los valores más altos en la bahía se presentan en media marea vaciante y media marea llenante, que son los mapas que se muestran en la figura 5.12. En ambos casos las velocidades máximas se producen en la bocana al ser la zona más estrecha del estuario por cuya sección tiene que pasar el prisma de marea en cada ciclo mareal.

Como puede verse, en marea vaciante se produce el efecto chorro en la bocana de la bahía, donde las corrientes alcanzan valores próximos a los 1 m/s. Además, en la ría de Cubas, desembocadura del río Miera, las corrientes alcanzan los 0.8 m/s. También puede observarse que en la zona del canal de navegación las velocidades rondan los 0.4 m/s y son mayores que

en el resto de la bahía. En marea llenante, las zonas con mayores corrientes coinciden con lo dicho anteriormente para vaciante, aunque las velocidades en las rías y en la bocana son algo menores en este caso.

5.5 Simulación de trayectorias de basuras marinas

Con los resultados de corrientes y oleaje de alta resolución obtenidos del downscaling dinámico se ha forzado el modelo lagrangiano de transporte de partículas TESEO.

Los parámetros fundamentales que utiliza TESEO para la simulación son los siguientes:

- Coeficiente de arrastre del viento (C_D): un valor habitual de este coeficiente es 1.5%, obtenido en calibraciones realizadas por IHCantabria en estudios previos. Sin embargo, como se ha indicado en el apartado 5.2, dada la resolución espacial de los datos disponibles de viento, sólo se ha incluido su efecto en el cálculo de la hidrodinámica
- Coeficiente de dispersión (D): depende de la zona en donde se encuentre el punto de vertido. Teniendo en cuenta lo recogido en estudios previos, se ha establecido un valor de 0.5 para la zona del río, 2 para el interior de la bahía y 15 para el mar exterior
- Factor de oleaje: se ha adoptado el valor recomendado de 0.01
- Número de partículas del vertido: se ha adoptado un valor típico recomendado de 1000 partículas

Los escenarios de transporte analizados son los definidos en el apartado 5.3.2. Estos escenarios consideran un número diferente de fases de marea (4, 6 y 8) permitiendo el análisis de sensibilidad objeto del presente estudio.

Los resultados obtenidos son las trayectorias seguidas por las partículas en los diferentes escenarios. A partir de dichas trayectorias, se ha realizado el análisis estadístico definido en el apartado 3.6 para obtener la distribución de la probabilidad de contaminación en la zona de estudio, en los dos escenarios meteo-oceánicos seleccionados (el más probable y el de mayor caudal). La probabilidad se ha calculado de acuerdo a la Ecuación 5 en una malla que cubre dicho área y cuenta con una resolución de 20x20 m².

5.6 Análisis de sensibilidad de las fases de marea

Con los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis cualitativo de la influencia del número de fases de marea seleccionado para el estudio.

A continuación se muestran los mapas de probabilidad en los instantes $t = 1h, 3h, 6h, 12h$ y $24h$, para el punto de vertido P1 (río), en los escenarios E.6 (mayor caudal fluvial) y E.16 (mayor frecuencia de ocurrencia) con los distintos números de fases de marea analizados (4, 6 y 8 fases) y se realiza una comparación cualitativa de los resultados. El resto de los mapas de probabilidades de los puntos P2 y P3 de ambos escenarios se presentan en el Anejo IV, ya que la comparación entre las fases en estos puntos es similar a la del P1.

Escenario 6

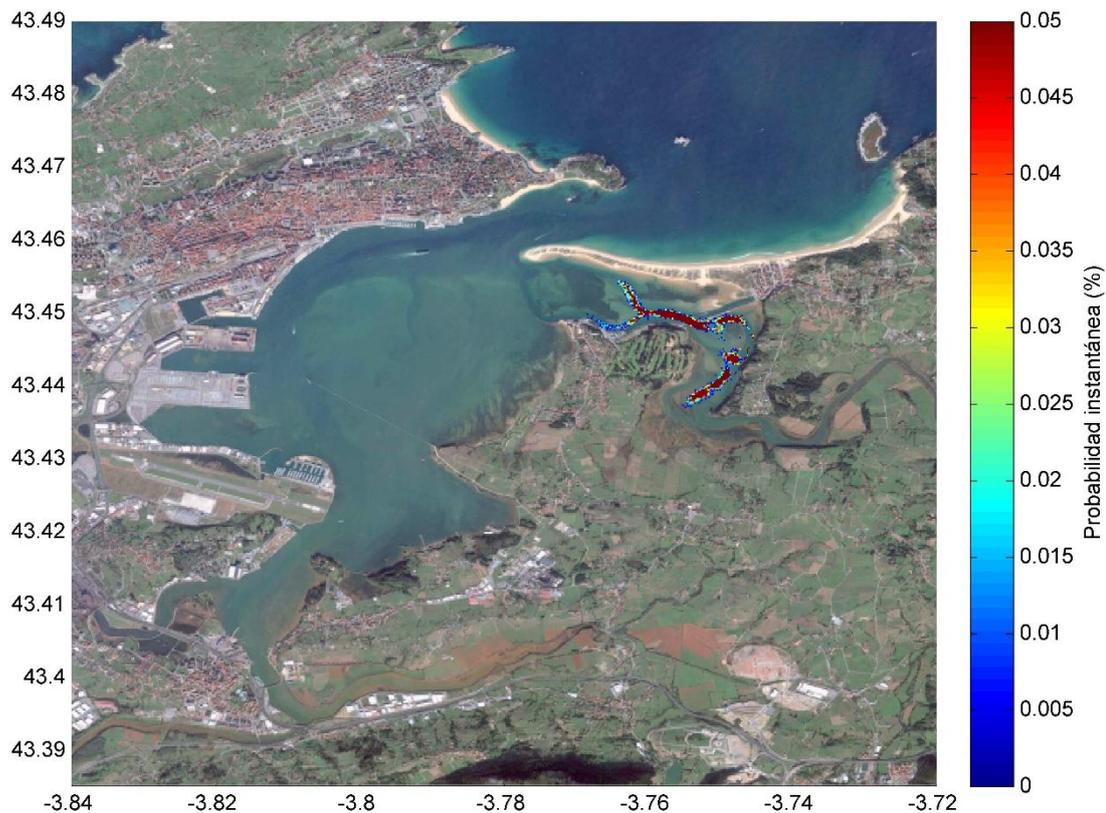


Figura 5.13 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 6, punto de vertido P1, 4 fases de marea

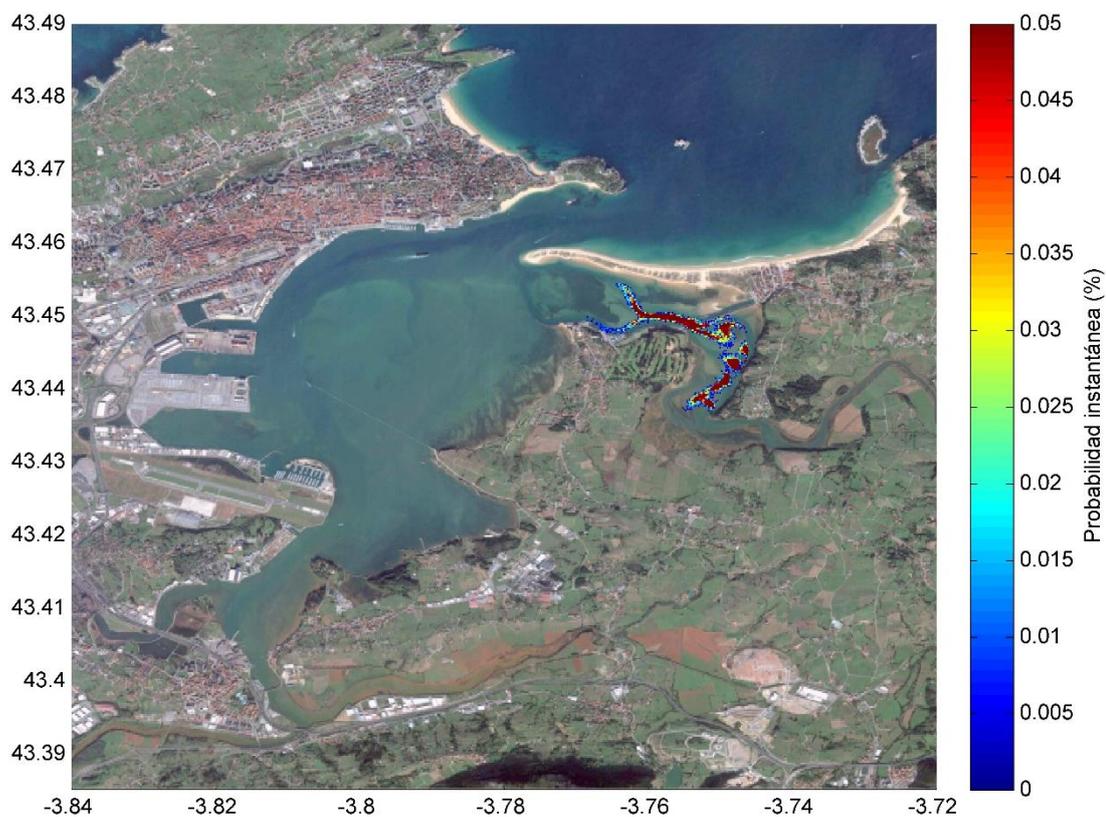


Figura 5.14 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 6, punto de vertido P1, 6 fases de marea

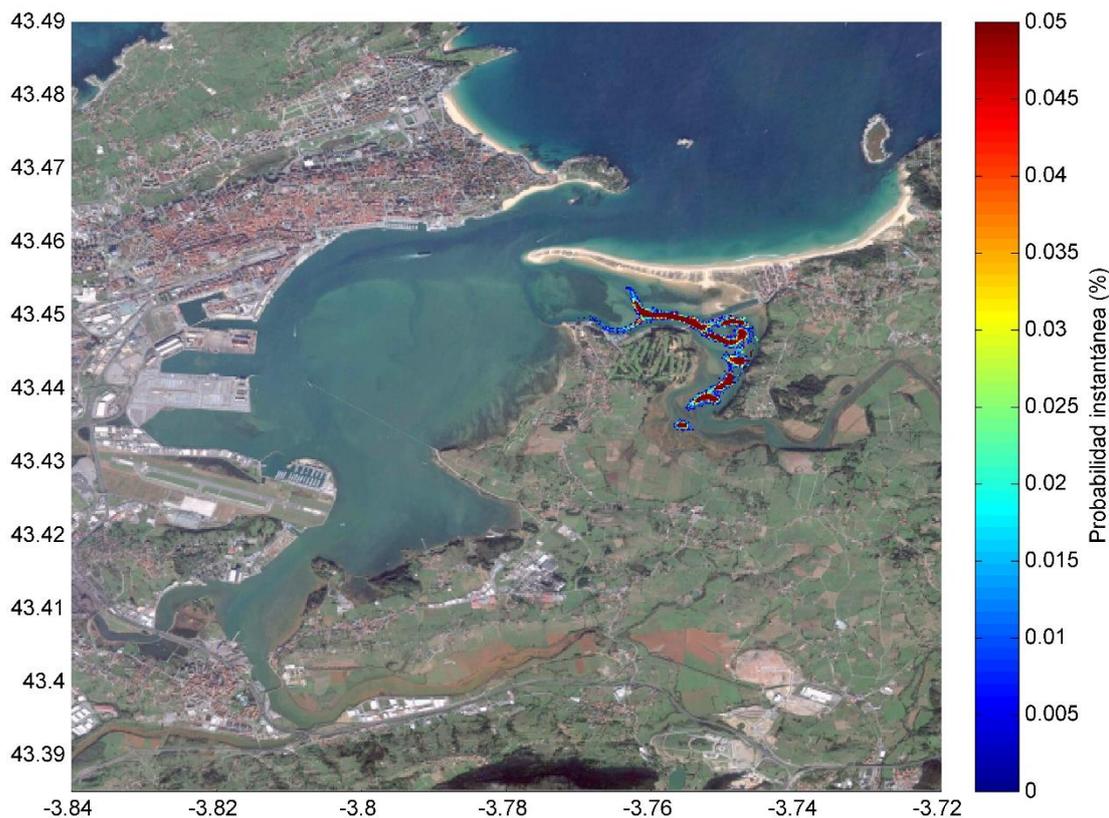


Figura 5.15 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 6, punto de vertido P1, 8 fases de marea

Para el instante $t = 1h$ (véanse las figuras 5.13, 5.14 y 5.15), como ha transcurrido poco tiempo desde el momento del vertido, las basuras no se han dispersado mucho y permanecen en el cauce del río, aguas abajo del punto de contaminación, y llegan en la ría de Cubas donde el contenido de las basuras se distribuyen entre los dos brazos.

Se puede observar que las partículas se encuentran repartidas de forma similar en los tres casos. En la zona del cauce se ve una mayor presencia de partículas en los mapas de 6 y 8 fases que en el de 4 fases. Además, en el de 8 fases se ve una acumulación de basuras en el meandro del río que no está presente en los resultados obtenidos para 4 y 6 fases.

Trascurridas 3h desde el momento del vertido (véanse las figuras 5.16, 5.17 y 5.18), se observa que las basuras se extienden hacia la ría de Cubas, rodean El Puntal y salen hacia el exterior de la bahía.

Para 8 fases de marea advertimos que las mayores probabilidades se encuentran en el extremo del Puntal, así como en el brazo que sale hacia el exterior de la bahía. El mapa de las 6 fases de marea es bastante similar al de 8 fases, aunque las probabilidades en la zona del extremo del Puntal y en el interior de la ría de Cubas son mayores. En el caso de 4 fases, se distinguen menos partículas en el cauce del río, la mayoría se encuentran en la ría de Cubas y en la zona de la desembocadura de la bahía.

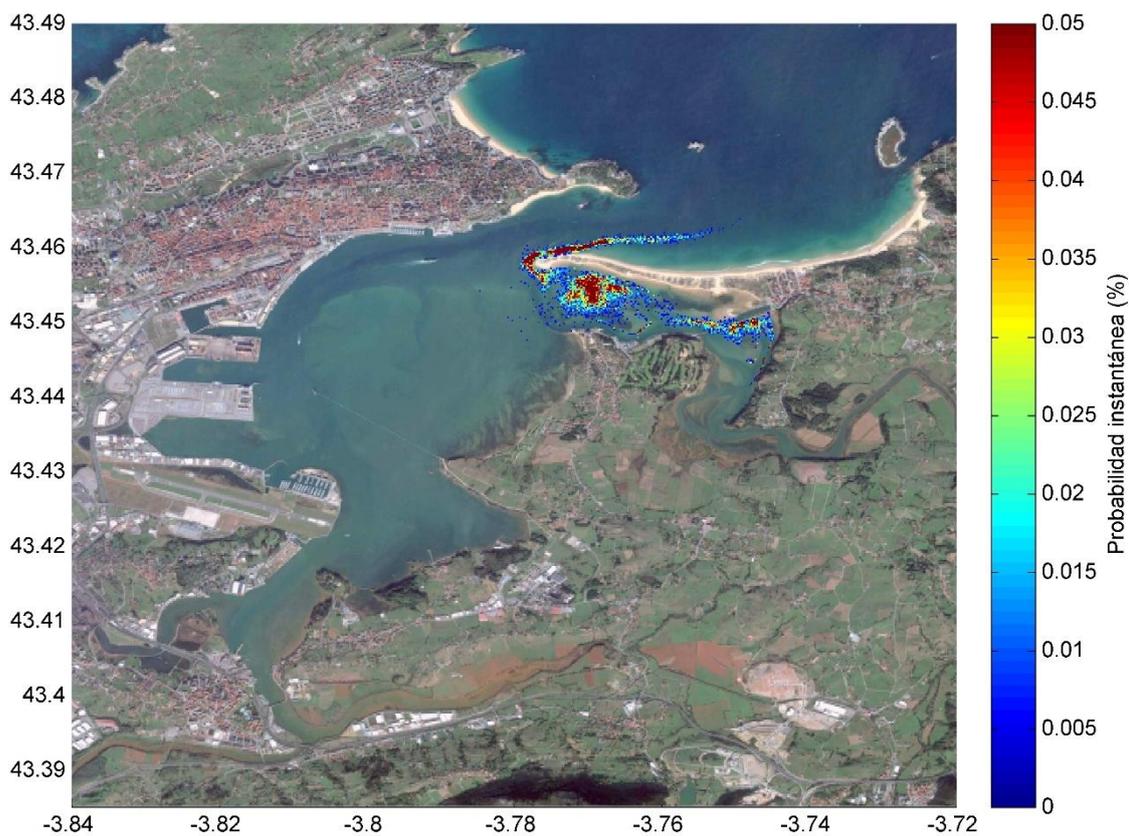


Figura 5.16 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 6, punto de vertido P1, 4 fases de marea

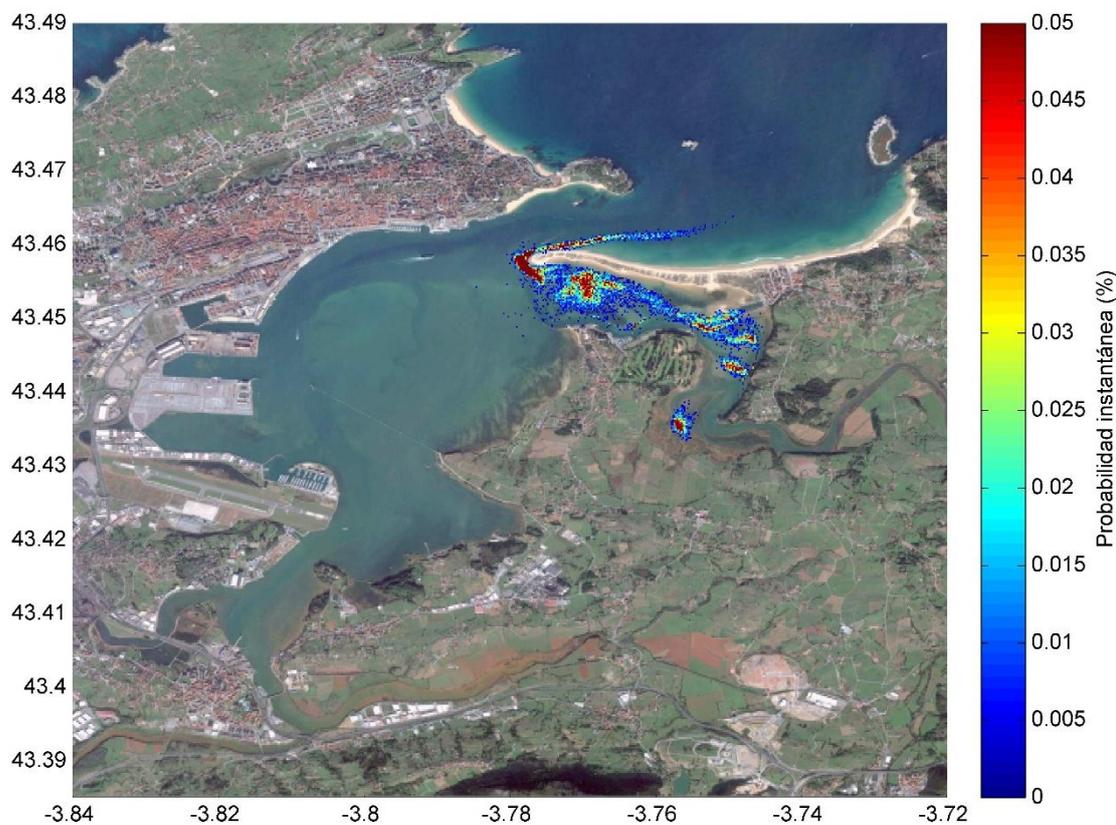


Figura 5.17 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 6, punto de vertido P1, 6 fases de marea

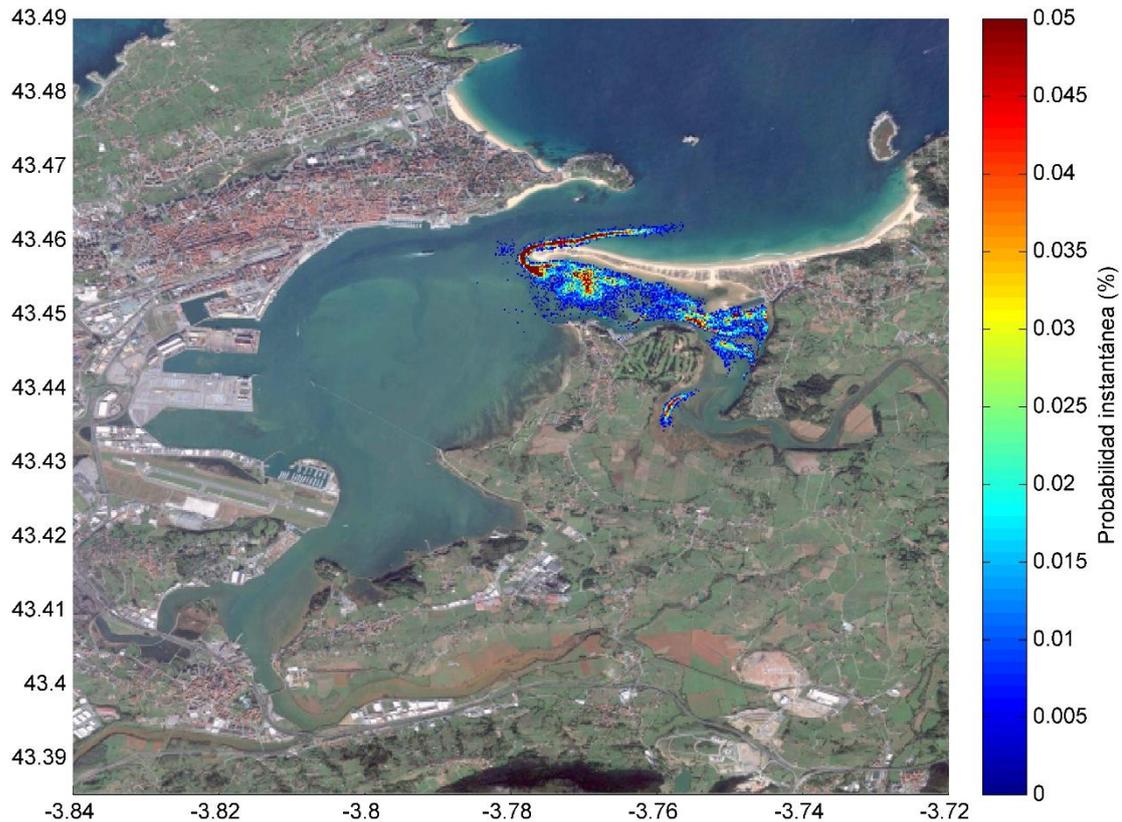


Figura 5.18 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 6, punto de vertido P1, 8 fases de marea

A las 6h de producirse el vertido (véanse las figuras 5.19, 5.20 y 5.21) las basuras se distribuyen por la ría de Cubas, rodean El Puntal y salen al exterior de la bahía hacia el Este, llegando a la costa de la isla de Santa Marina.

En los mapas de 4 y 8 fases de marea la extensión de la mancha se asemeja bastante. La principal diferencia entre ambos es la zona en donde hay más probabilidad de existencia de basuras, en el caso de 8 fases la zona de la desembocadura frente a la Península de la Magdalena presenta una probabilidad muy alta, mientras que para 4 fases la zona contigua al Puntal es la que presenta una mayor probabilidad. Para el caso de las 6 fases de marea se observa que una parte de las partículas vertidas se dispersan en el interior de la bahía, aunque con una probabilidad baja. Además, no hay acumulación en el Puntal sino que la mayor probabilidad se encuentra en la parte de la desembocadura del estuario.

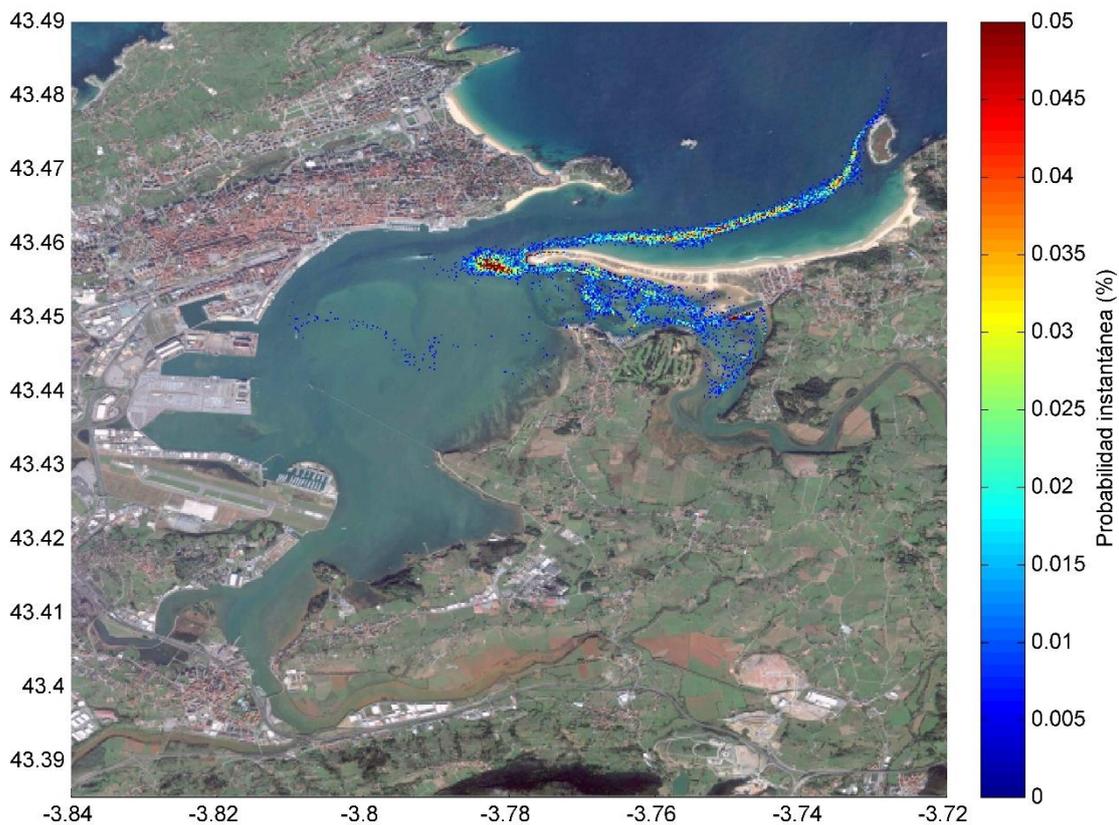


Figura 5.19 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 6, punto de vertido P1, 4 fases de marea

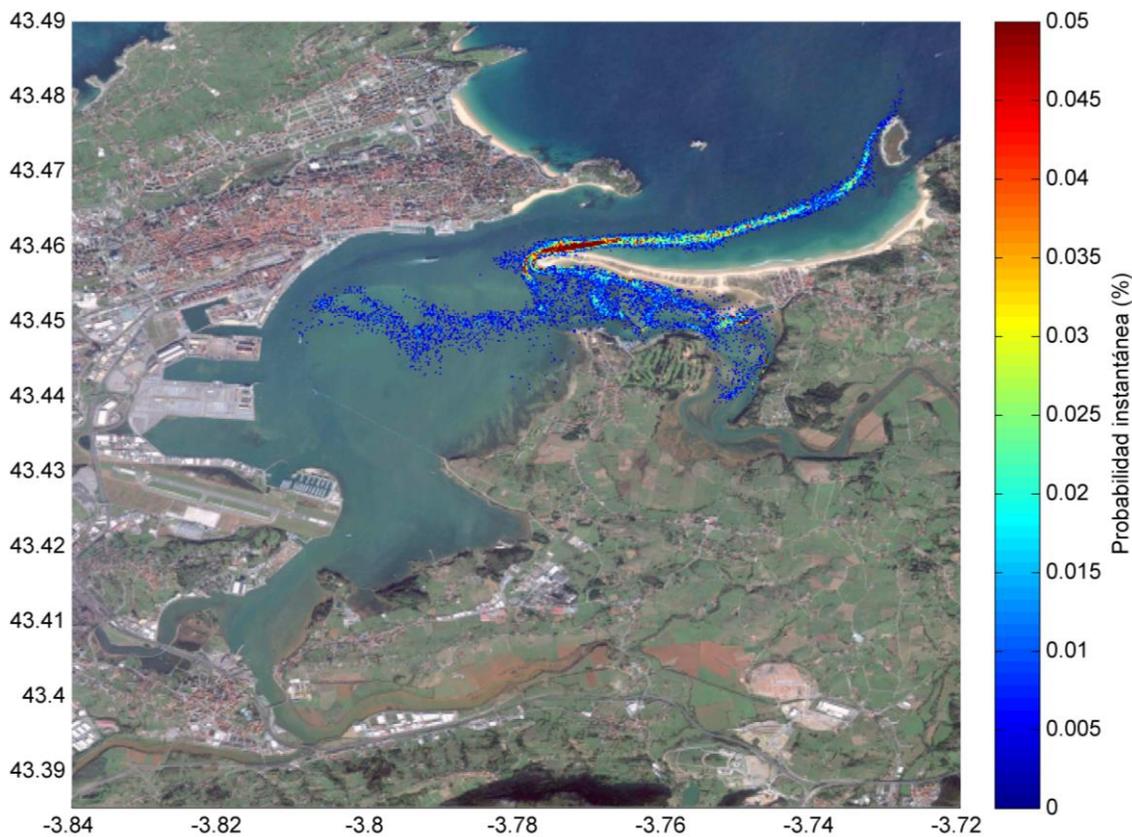


Figura 5.20 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 6, punto de vertido P1, 6 fases de marea

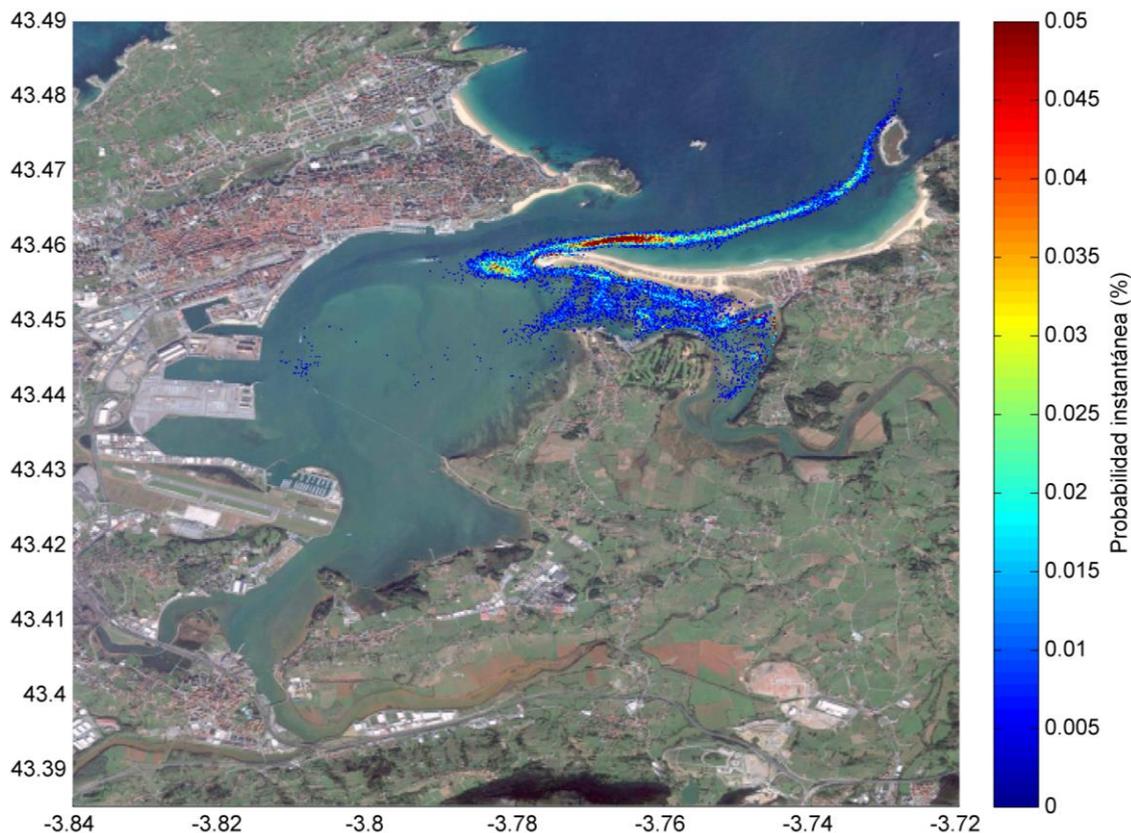


Figura 5.21 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 6, punto de vertido P1, 8 fases de marea

En el instante $t = 12h$ (véanse las figuras 5.22, 5.23 y 5.24) en el cauce bajo del río ya no hay tanta presencia de partículas, la mayoría se distribuyen en la ría de Cubas, el interior de la bahía y la zona exterior frente a las playas de Somo y Loredo, llegando hasta la isla de Santa Marina. Al haber transcurrido más tiempo, las basuras se distribuyen más espacialmente y, por tanto, las probabilidades son menores.

En los tres mapas se observa que los puntos de mayor concentración de basuras se encuentran en la margen derecha del río Miera antes del embarcadero, en El Puntal y en la costa Oeste de la isla de Santa Marina. Además, al comparar con los mapas de $t = 6h$, hay mayor cantidad de basuras marinas frente a las playas de Somo y Loredo y tienden a aproximarse a la costa.

Los mapas correspondientes a los resultados obtenidos con 8 y 6 fases de marea son prácticamente iguales, el mapa de 4 fases de marea también es similar aunque presenta una menor presencia de basuras en el interior de la bahía y de la ría de Cubas.

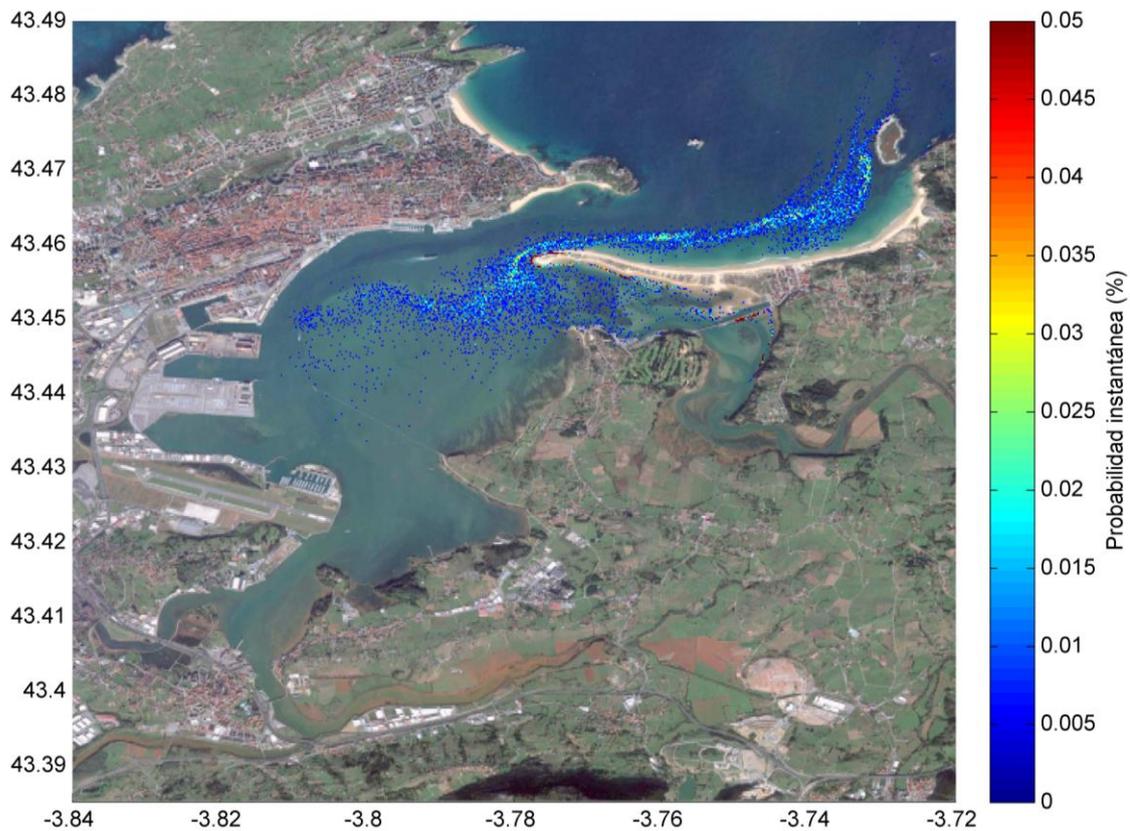


Figura 5.22 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 6, punto de vertido P1, 4 fases de marea

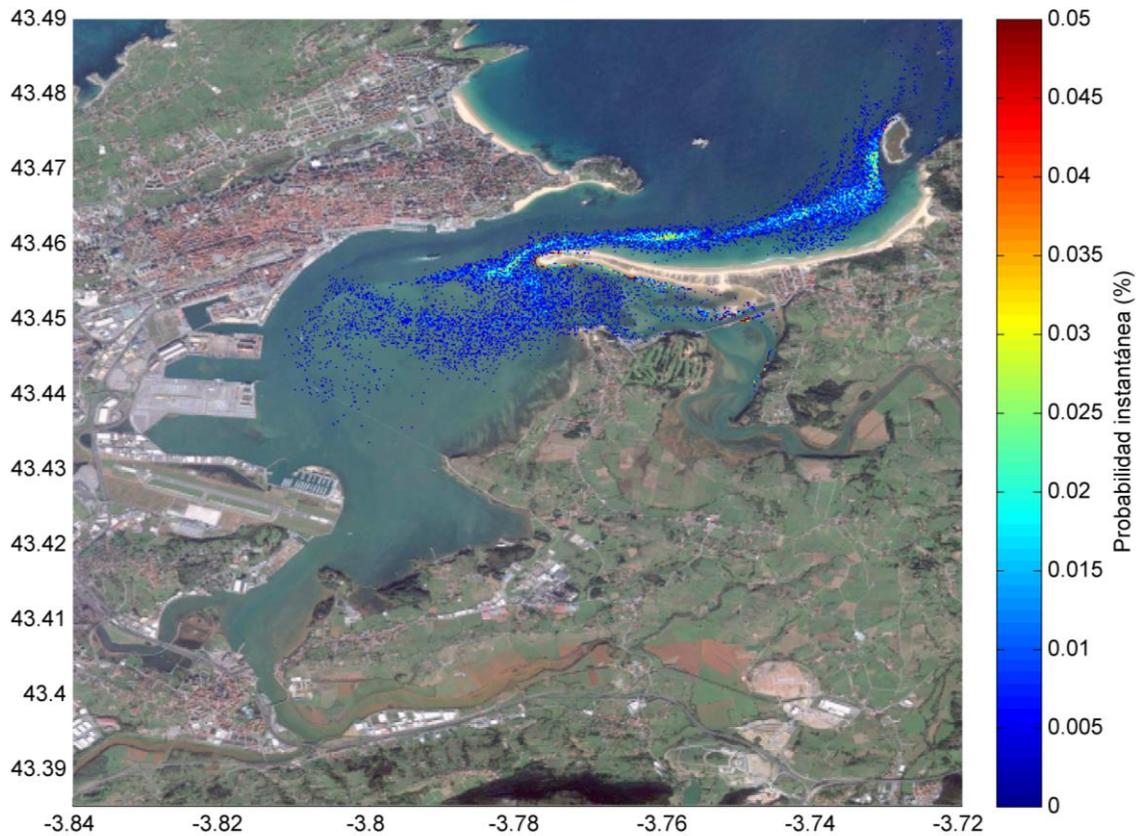


Figura 5.23 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 6, punto de vertido P1, 6 fases de marea

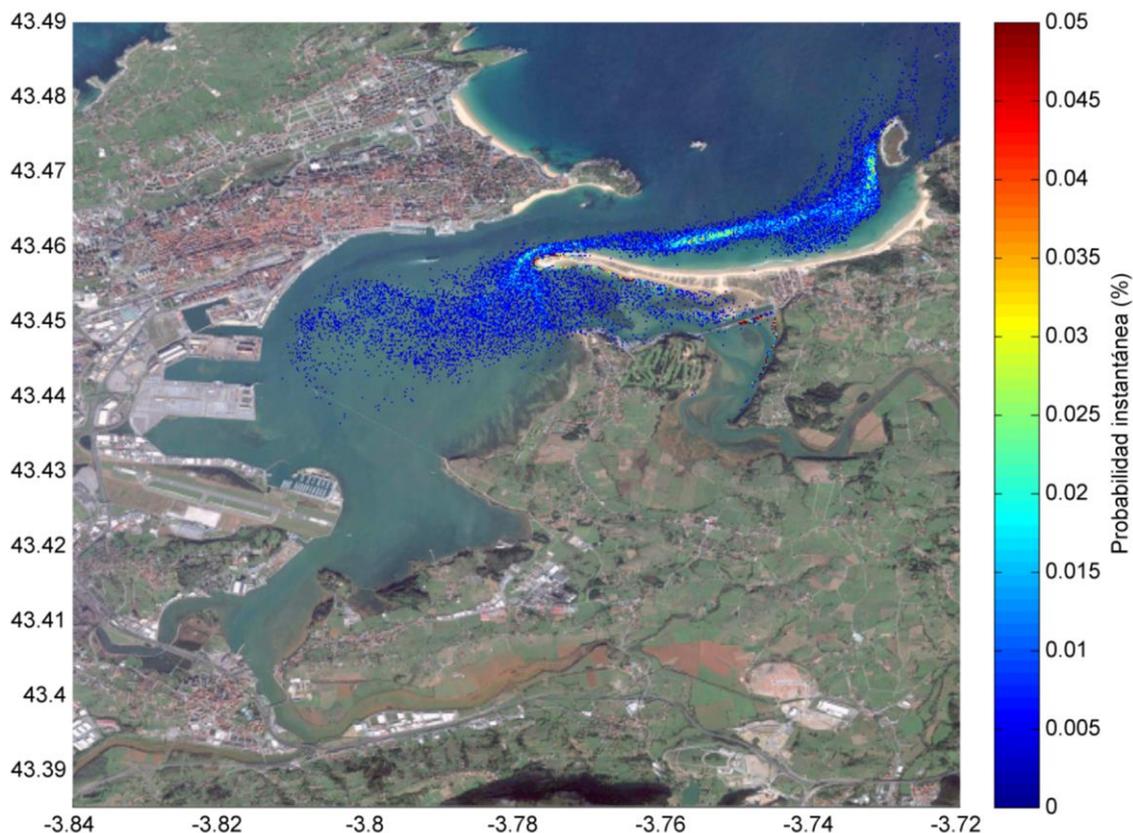


Figura 5.24 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 6, punto de vertido P1, 8 fases de marea

Finalmente, pasadas 24h del vertido (véanse las figuras 5.25, 5.26 y 5.27), las partículas se encuentran principalmente en la zona exterior, frente a las playas de Somo y Loredo y al Norte de la isla de Santa Marina.

Como se puede ver en las figuras, no hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos con 4, 6 y 8 fases de marea. Las partículas se encuentran en localizaciones muy similares en los tres mapas, y las mayores probabilidades instantáneas son las mismas que para $t = 12h$, es decir, en el río Miera antes del embarcadero, en El Puntal y en la costa Noroeste de la isla de Santa Marina. También se puede ver que para el mapa de 4 fases hay menos basuras que en el de 6 y 8 fases, esto se debe a que, pasadas 24h del momento del vertido, las partículas se salen del dominio de estudio por la zona Norte y Este.

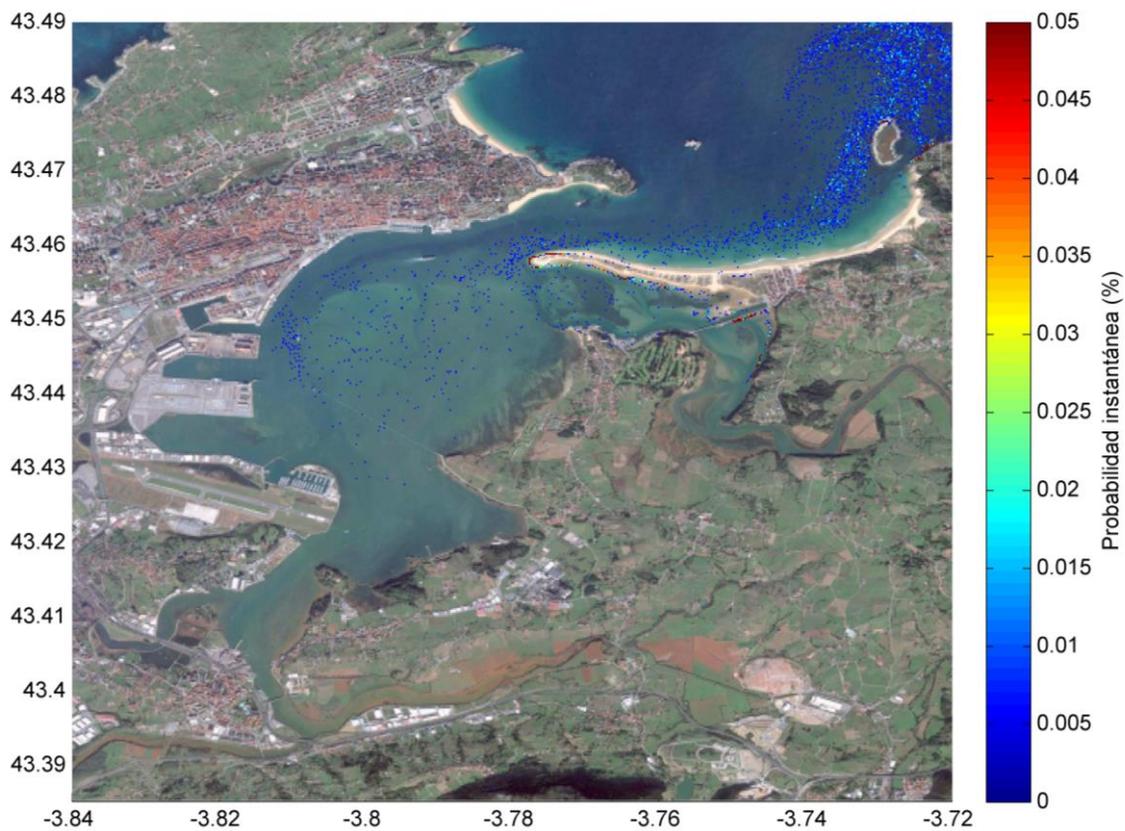


Figura 5.25 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 6, punto de vertido P1, 4 fases de marea

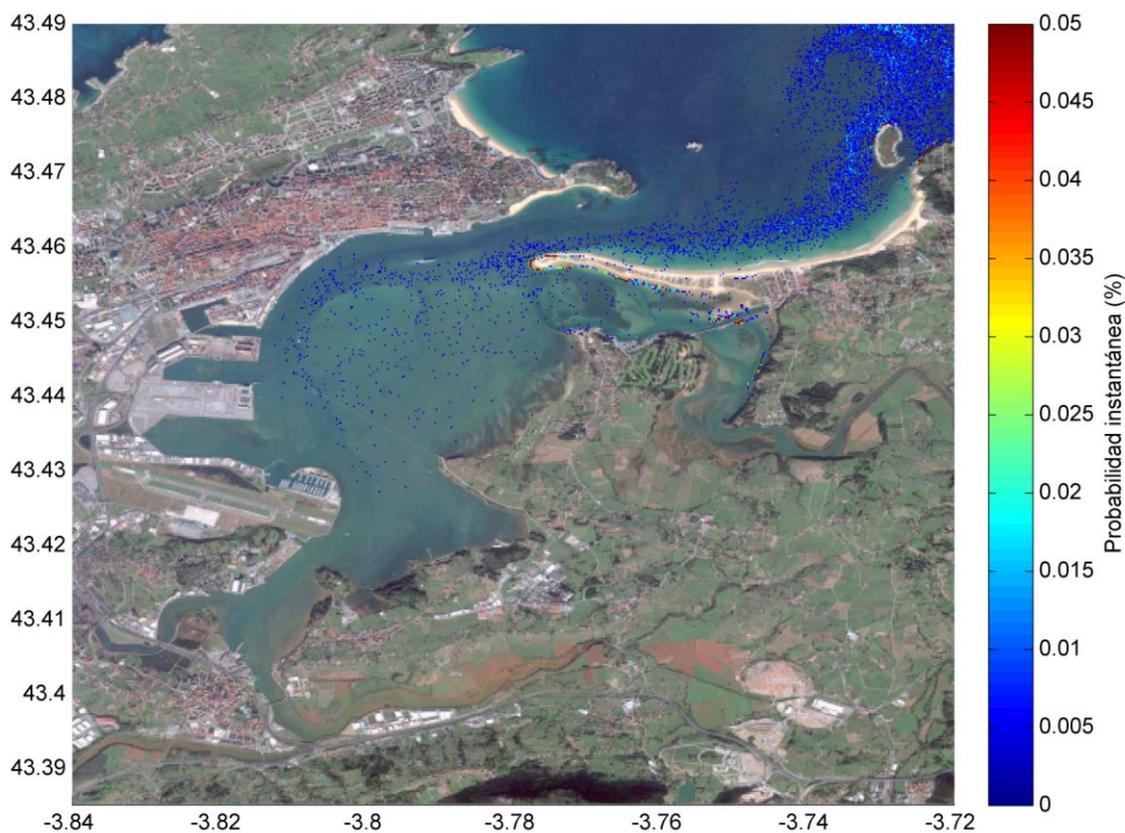


Figura 5.26 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 6, punto de vertido P1, 6 fases de marea

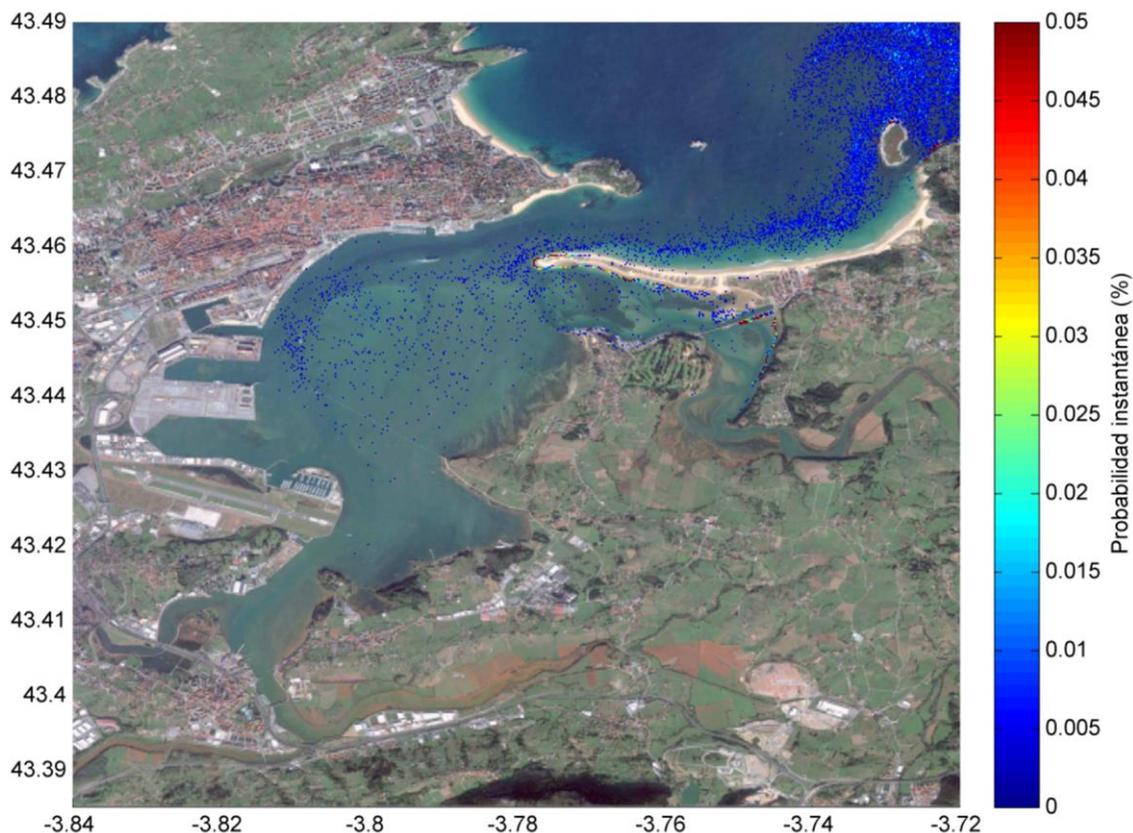


Figura 5.27 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 6, punto de vertido P1, 8 fases de marea

Escenario 16

Como puede verse en las figuras 5.28, 5.29 y 5.30, transcurrida 1h desde el vertido, la mancha de basuras se extiende por el cauce del río y llega a la zona del embarcadero. Sin embargo, hay diferencias notables entre los tres mapas que se comentan a continuación.

En el mapa correspondiente a las 6 fases de marea, en la región próxima al embarcadero, las probabilidades de que haya basura son menores que las que se presentan en el mapa de 8 fases. Asimismo, en el mapa de 4 fases de marea las probabilidades en esa área son aún menores que en el mapa de 6 fases. Otra consideración a tener en cuenta es que, al aumentar el número de fases, los resultados muestran que las partículas se encuentran más próximas al foco de contaminación.

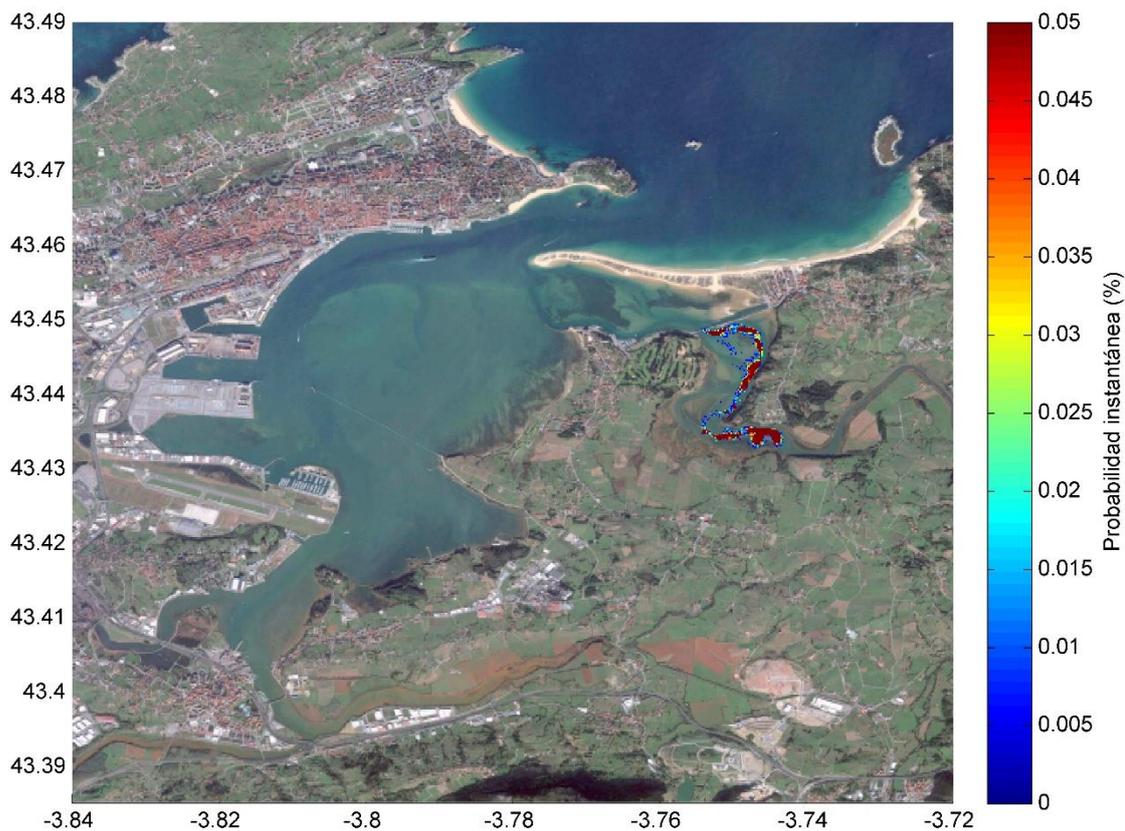


Figura 5.28 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 16, punto de vertido P1, 4 fases de marea

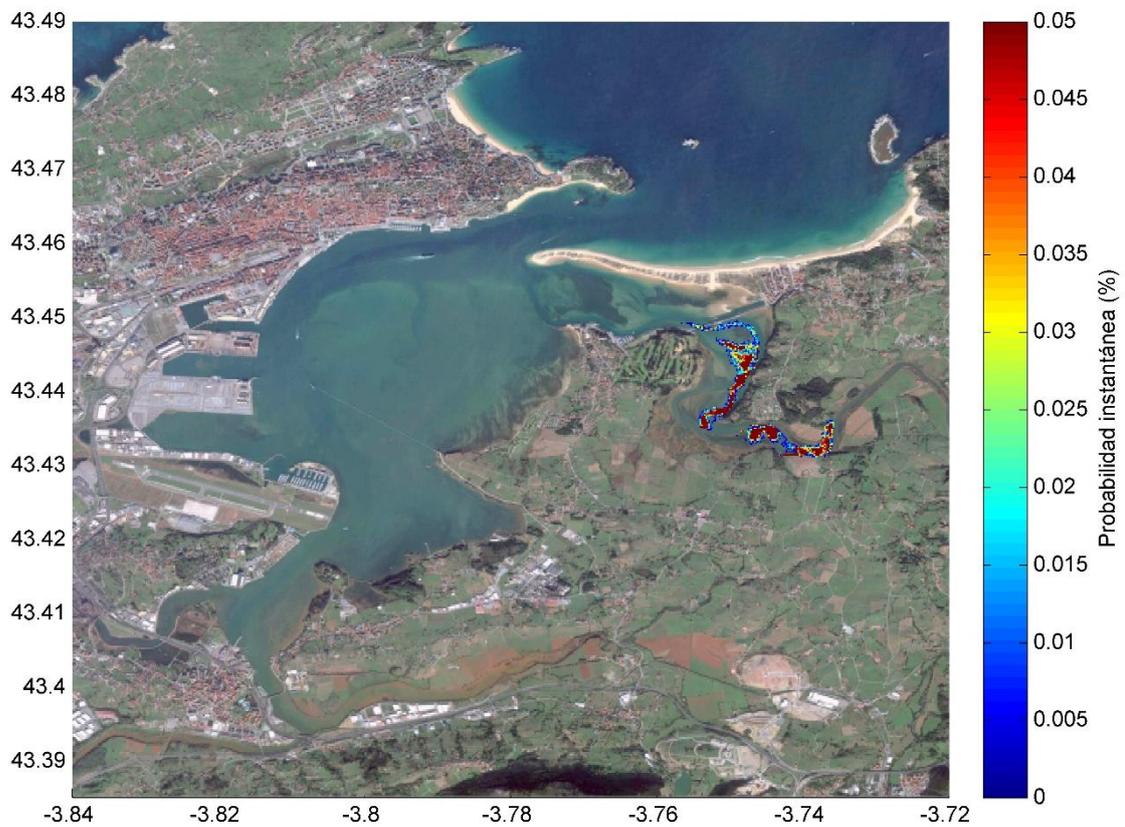


Figura 5.29 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 16, punto de vertido P1, 6 fases de marea

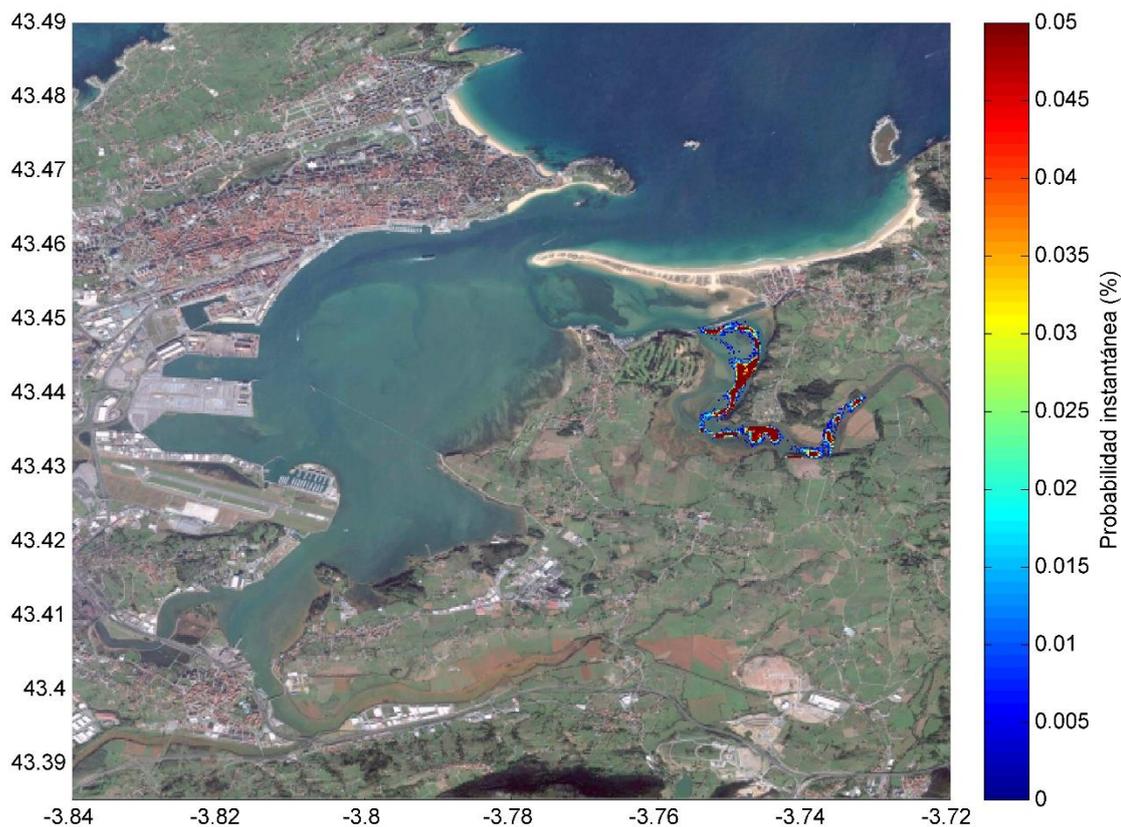


Figura 5.30 Probabilidad instantánea en $t = 1h$, escenario 16, punto de vertido P1, 8 fases de marea

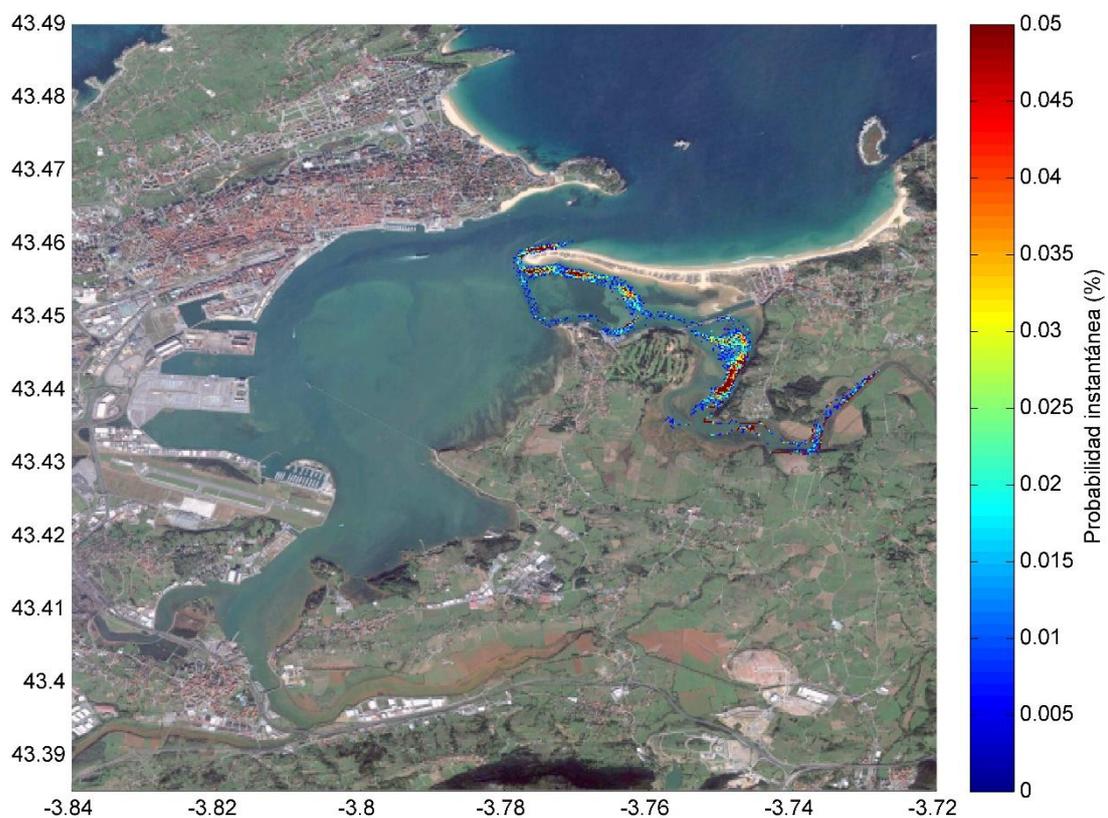


Figura 5.31 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 16, punto de vertido P1, 4 fases de marea

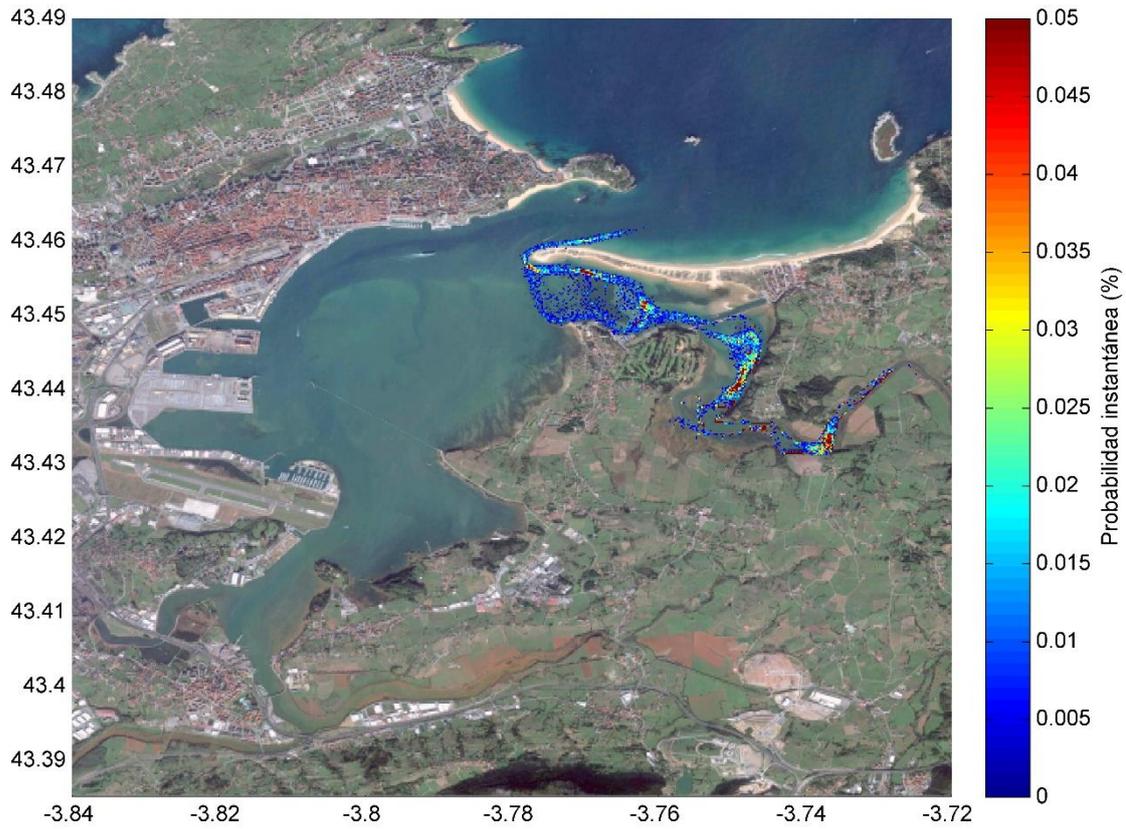


Figura 5.32 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 16, punto de vertido P1, 6 fases de marea



Figura 5.33 Probabilidad instantánea en $t = 3h$, escenario 16, punto de vertido P1, 8 fases de marea

Para el instante $t = 3h$ (véanse las figuras 5.31, 5.32 y 5.33), el vertido se extiende a lo largo del cauce fluvial, la ría de Cubas y rodea El Puntal para salir al exterior de la bahía.

En el mapa de 6 fases se pueden encontrar basuras en el cauce del río en las proximidades al punto de vertido con una probabilidad mucho mayor que para los otros dos casos. Sin embargo, en la zona más próxima al embarcadero, hay acumulación de partículas en los tres mapas, aunque hay una probabilidad un poco mayor en el caso de 4 fases.

Además, en el mapa correspondiente a las 4 fases de marea, las basuras se distribuyen menos por el interior de la ría de Cubas, acumulándose principalmente en las márgenes de la misma, sobre todo en la margen que transcurre por El Puntal, y en el extremo de este.

A las 6h de producirse el vertido (véanse las figuras 5.34, 5.35 y 5.36), las basuras se pueden encontrar en el cauce del río, en la ría de Cubas y en la zona exterior frente a la playa de Somo. Para los tres casos se encuentran basuras acumuladas en las márgenes del río Miera.

En el mapa correspondiente a las 8 fases hay bastante presencia en la zona del Puntal aunque algunas partículas se dispersan en las proximidades de la bocana de la bahía. El mapa de las 6 fases es bastante similar, aunque hay una mayor acumulación de partículas en El Puntal y menos cantidad en el interior de la bahía. En los resultados obtenidos para 4 fases hay menor probabilidad en El Puntal y en la mancha que sale hacia el exterior.

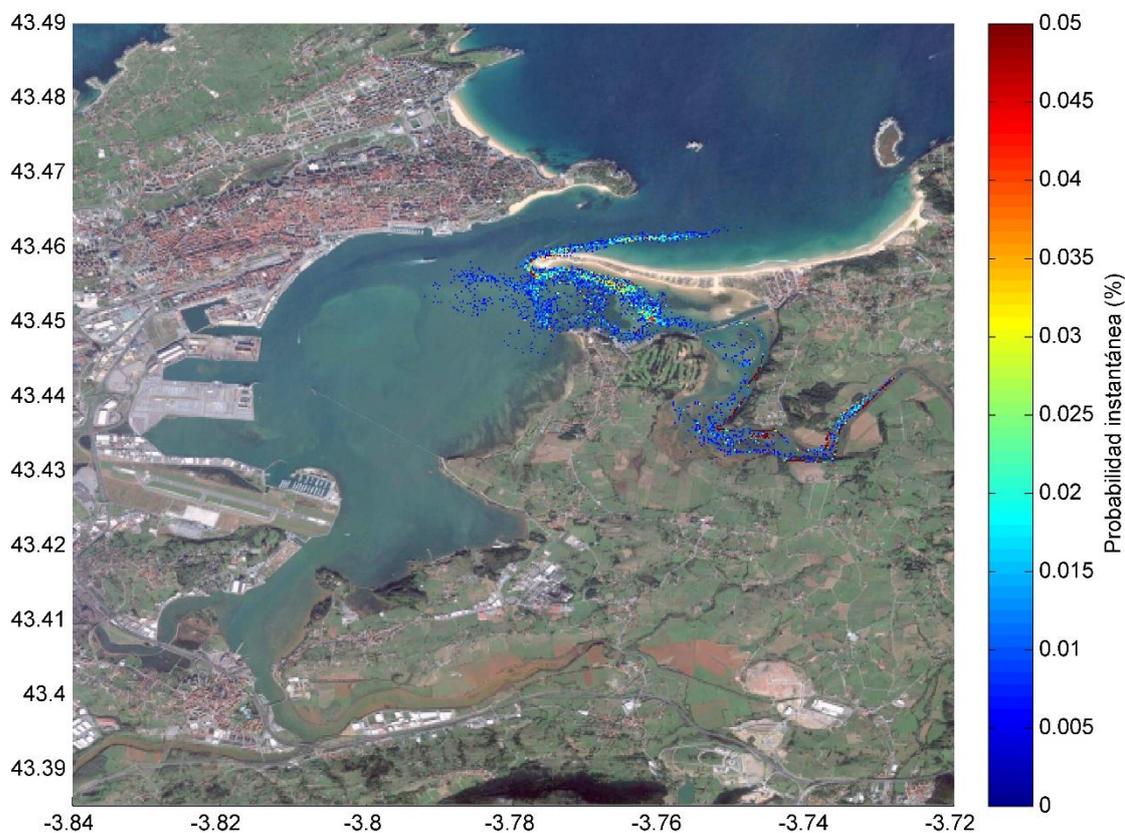


Figura 5.34 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 16, punto de vertido P1, 4 fases de marea

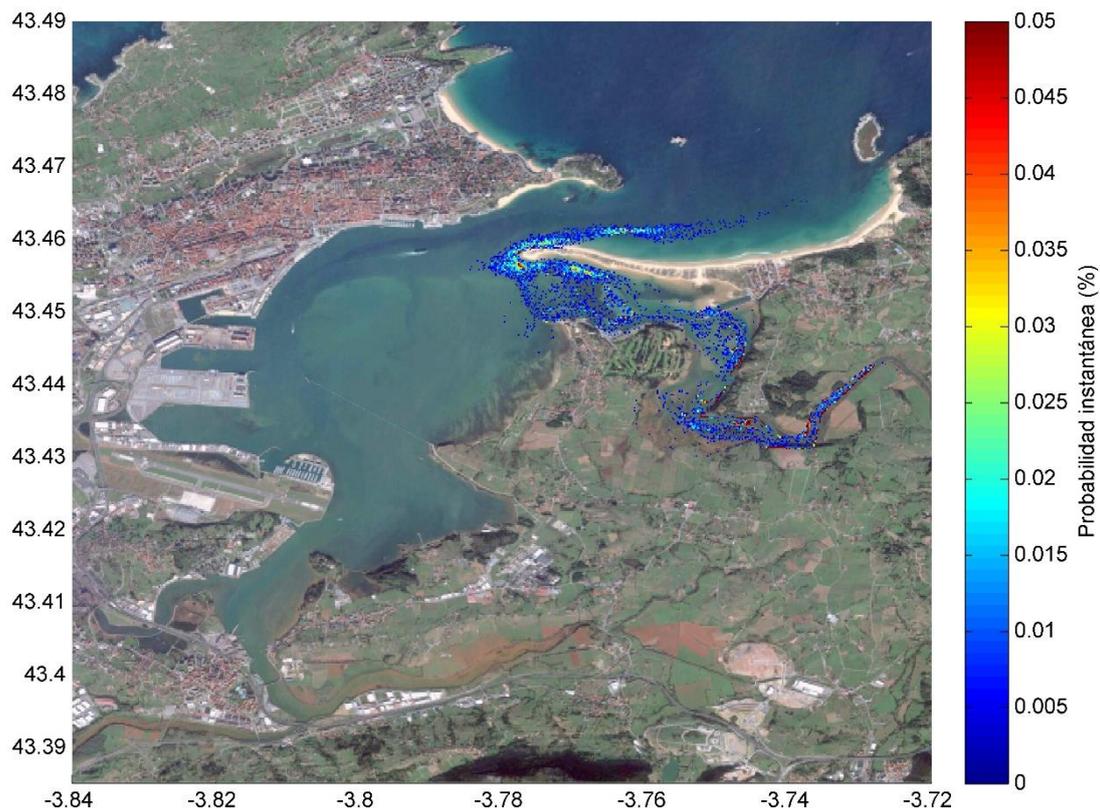


Figura 5.35 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 16, punto de vertido P1, 6 fases de marea

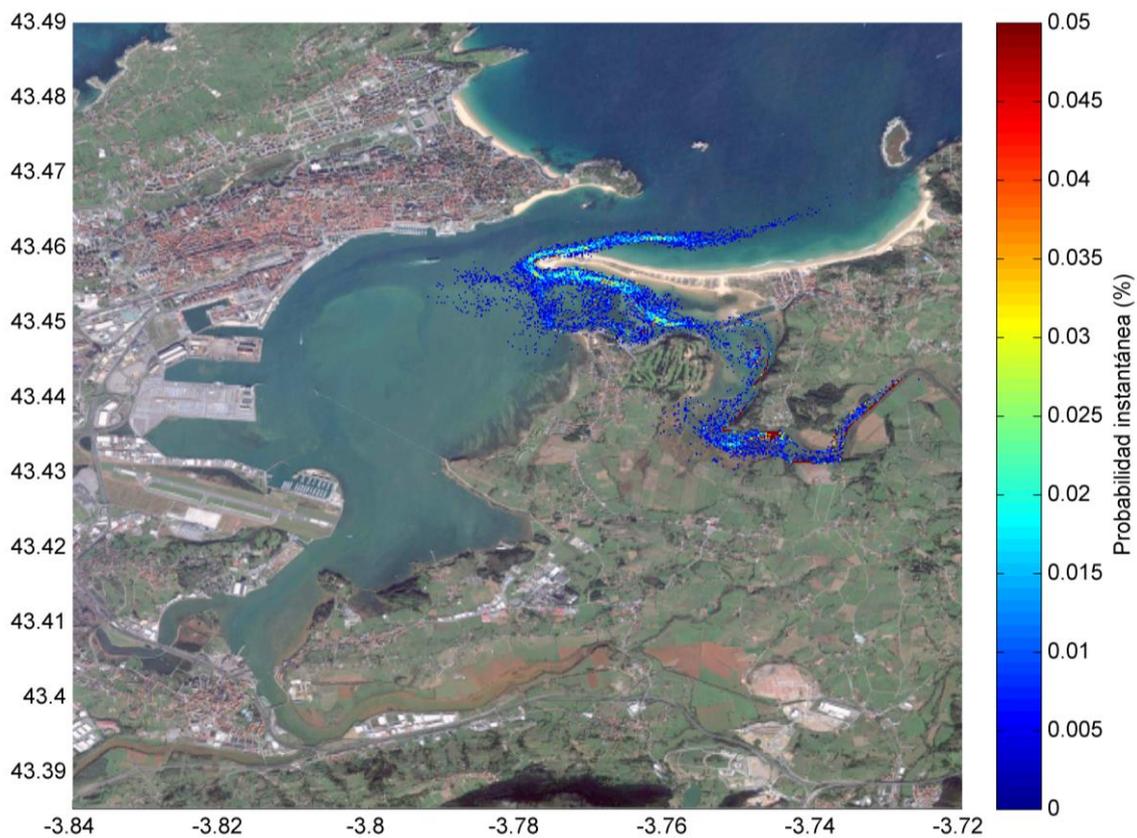


Figura 5.36 Probabilidad instantánea en $t = 6h$, escenario 16, punto de vertido P1, 8 fases de marea

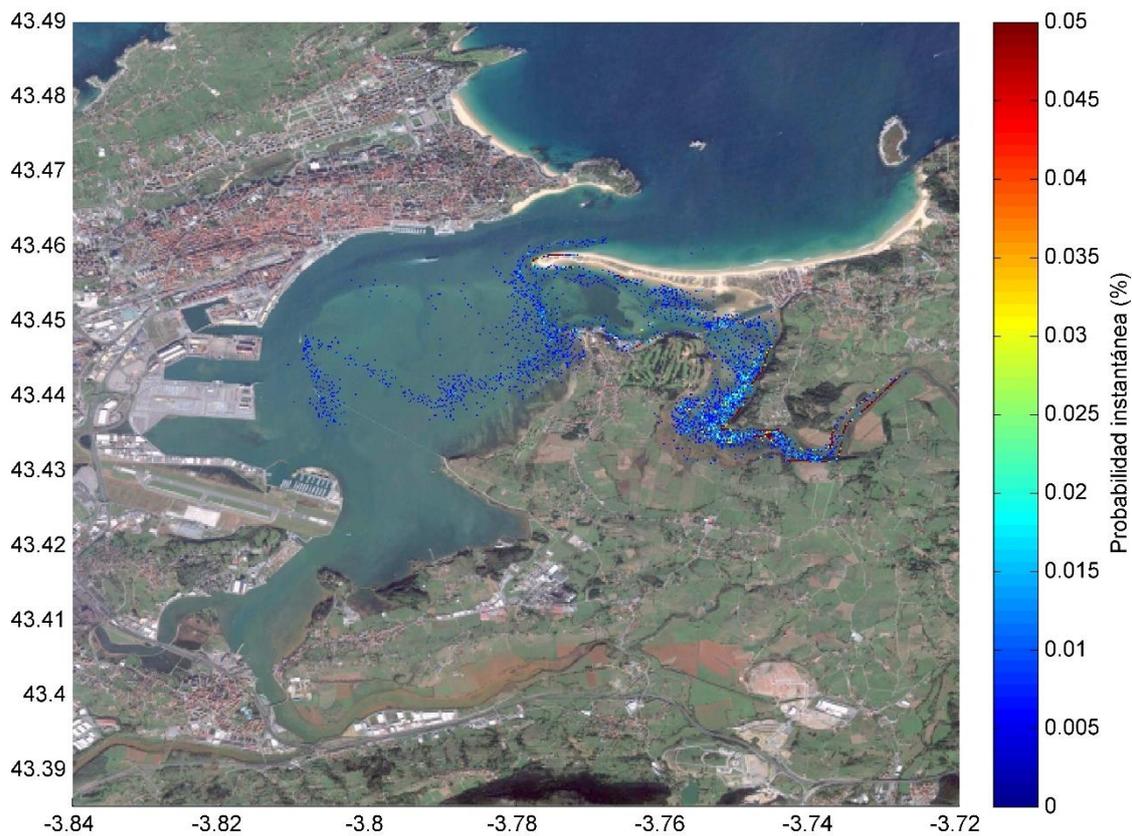


Figura 5.37 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 16, punto de vertido P1, 4 fases de marea

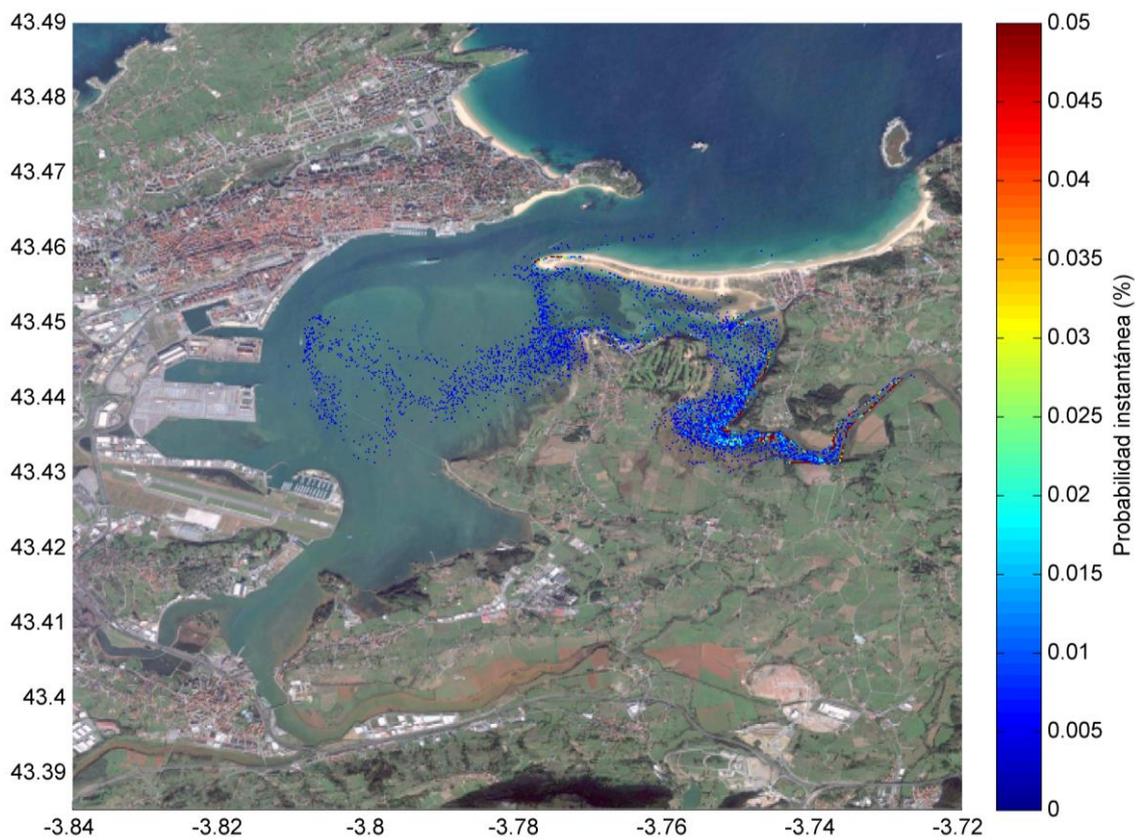


Figura 5.38 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 16, punto de vertido P1, 6 fases de marea

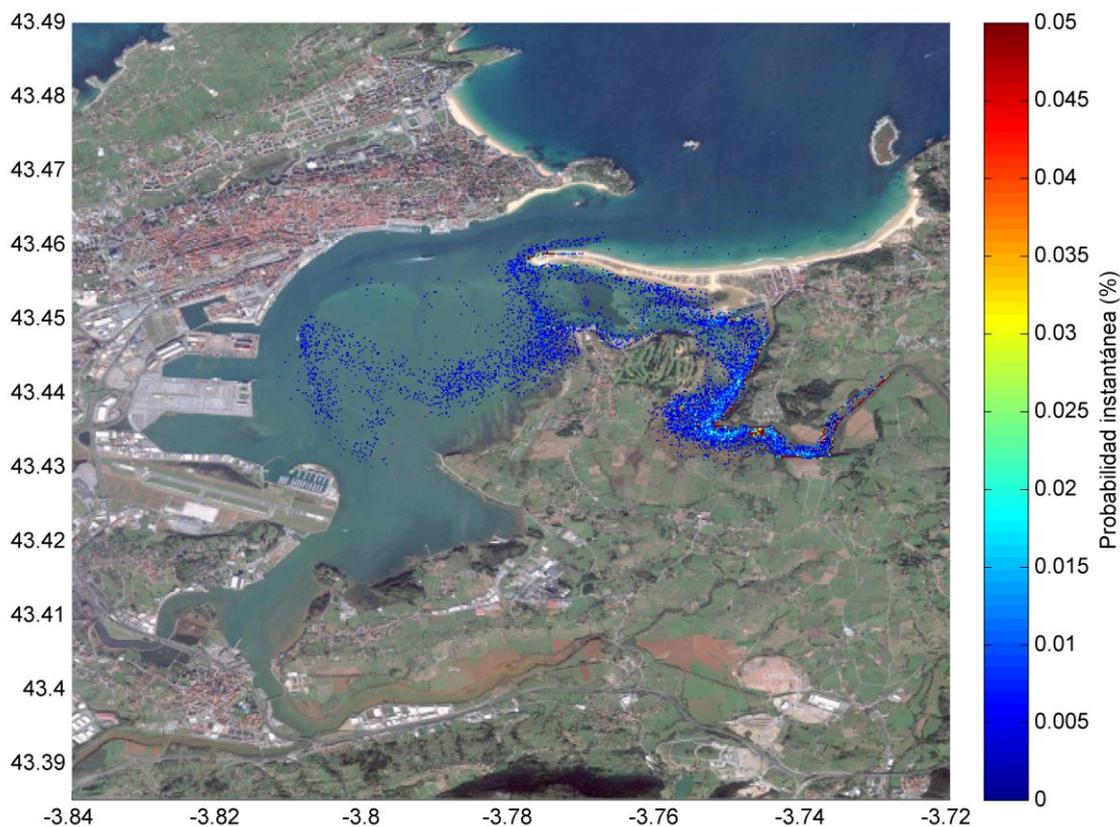


Figura 5.39 Probabilidad instantánea en $t = 12h$, escenario 16, punto de vertido P1, 8 fases de marea

Pasadas 12h desde el momento del vertido (figuras 5.37, 5.38 y 5.39), las partículas se han distribuido bastante y las probabilidades de encontrar zonas con mayor presencia son menores. Las basuras se encuentran principalmente en el cauce del río, aunque también encontramos dispersadas en el interior de la bahía y en El Puntal. Hay muy poca presencia de basuras frente a las playas de Somo y Loredo. Las áreas con mayor probabilidad se encuentran en el borde del cauce del río, así como en El Puntal..

Los resultados obtenidos utilizando 6 fases son muy similares a los de 8 fases, aunque se observa una menor presencia de partículas en El Puntal. Asimismo, los resultados obtenidos para 4 fases muestran una presencia aún menor que los de 6 fases en esta zona.

Por último, para el instante $t = 24h$ (figuras 5.40, 5.41 y 5.42), el vertido se encuentra muy disgregado. Se pueden encontrar partículas en el río, a lo largo de la bahía, frente a las playas de Somo y Loredo y en el Oeste y Norte de la isla de Santa Marina. Las zonas con mayor probabilidad son la margen derecha del río y El Puntal.

Los tres mapas se parecen bastante entre sí, siendo la principal diferencia que en los de 6 y 4 fases tienen las partículas más dispersas y hay menor cantidad de ellas en El Puntal que en el de 8 fases.

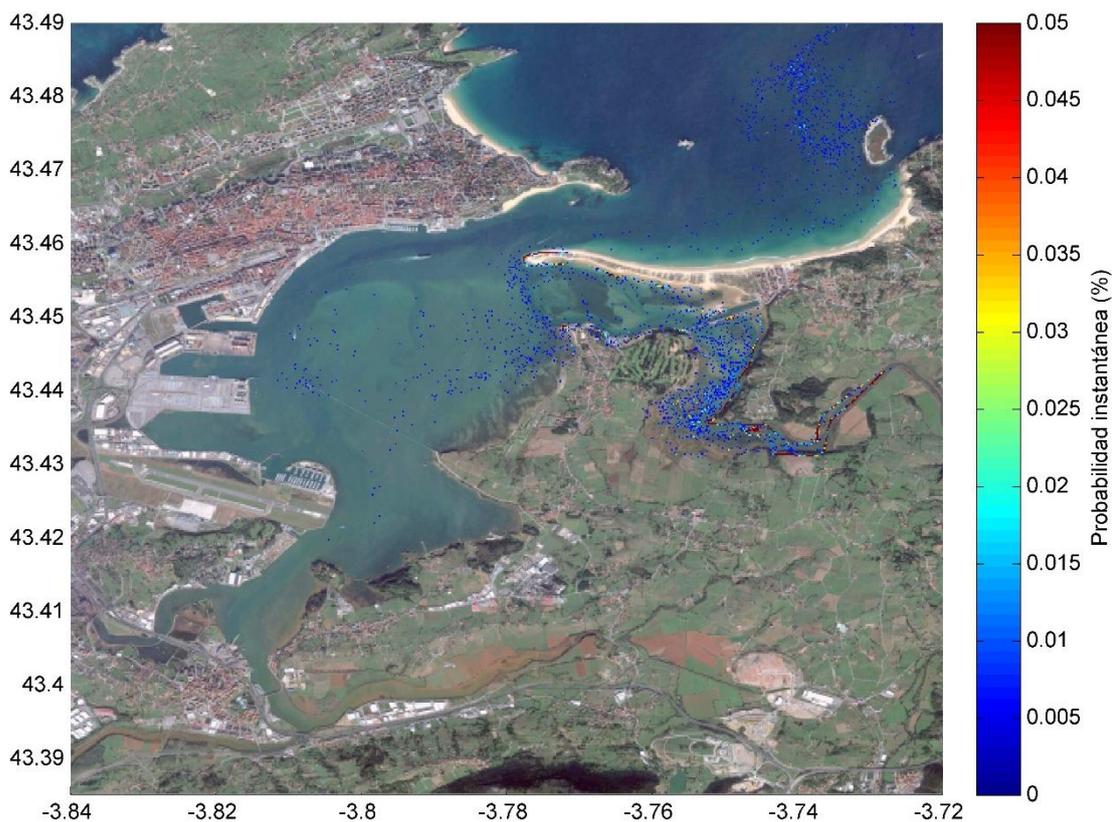


Figura 5.40 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 16, punto de vertido P1, 4 fases de marea

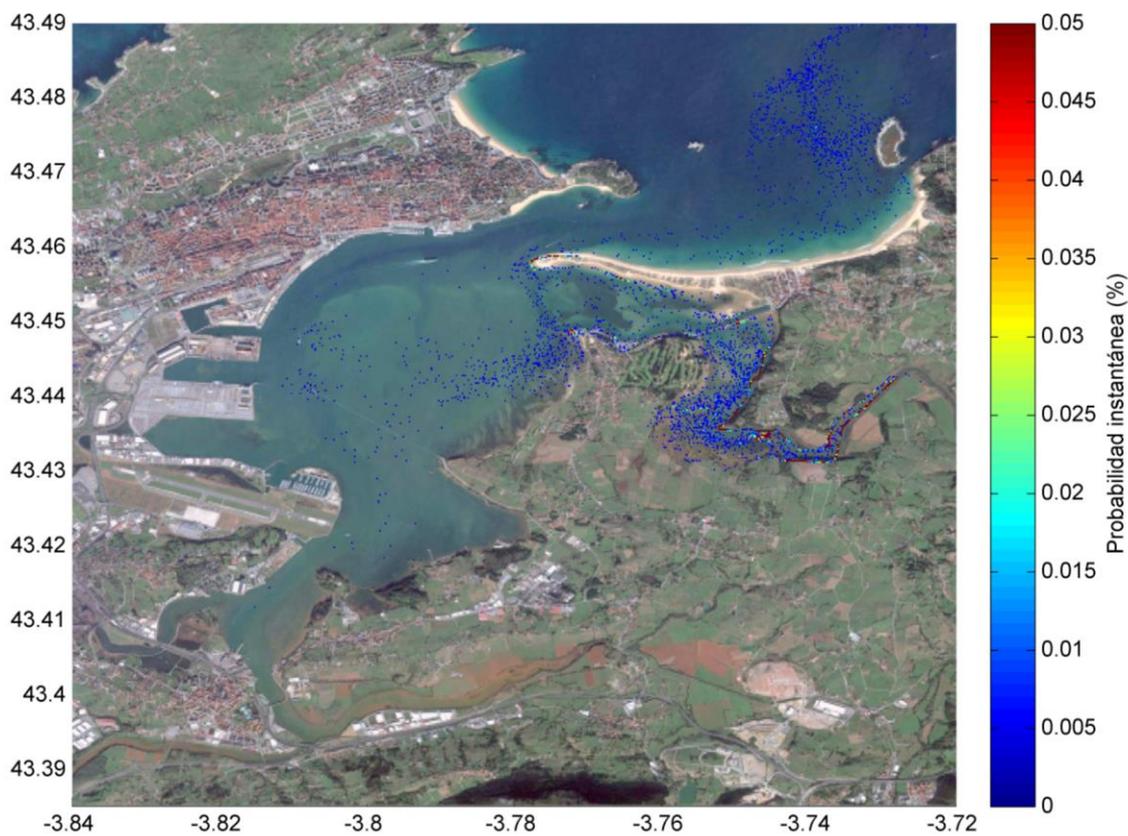


Figura 5.41 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 16, punto de vertido P1, 6 fases de marea

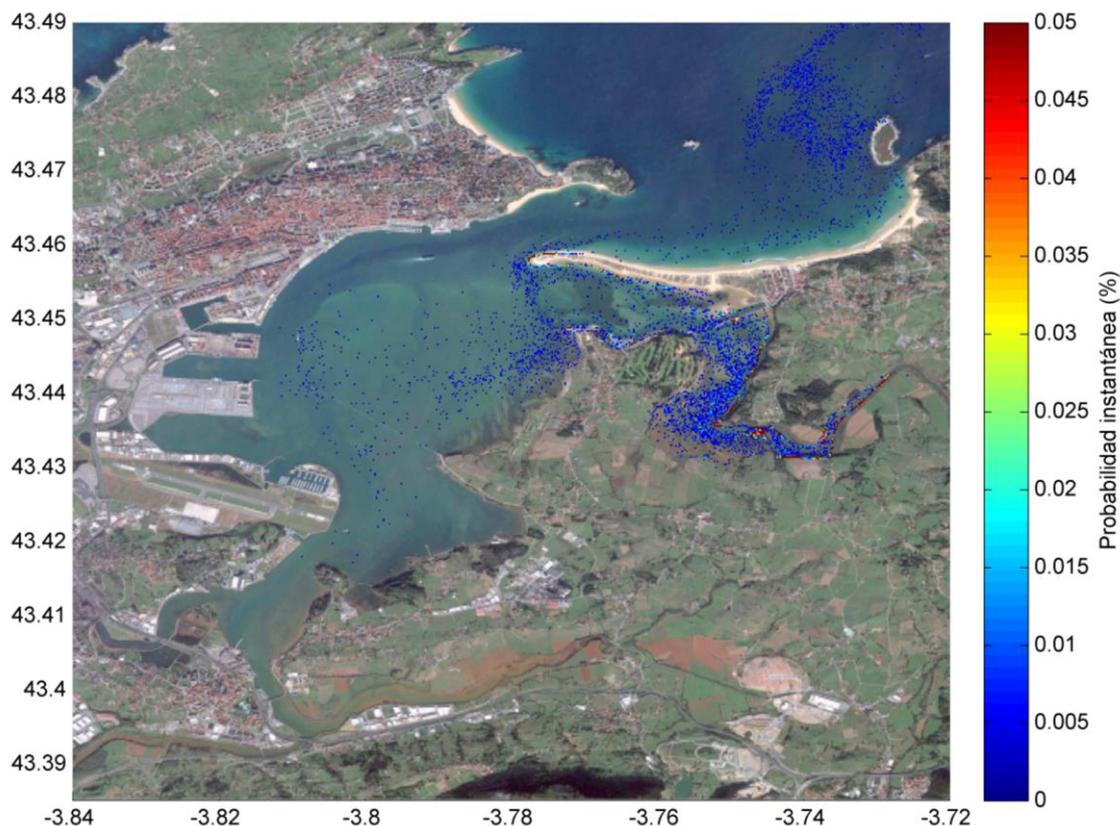


Figura 5.42 Probabilidad instantánea en $t = 24h$, escenario 16, punto de vertido P1, 8 fases de marea

5.6.1 Conclusiones

En $t = 1h$ las partículas no se han dispersado mucho. En el escenario 6 que corresponde al mayor caudal de avenida, los mapas correspondientes a las tres fases de mareas se asemejan bastante. Sin embargo, en el escenario 16, mayor frecuencia de ocurrencia, el caudal no es tan significativo y las partículas se disgregan de distinta forma para las tres fases de marea, de forma que, para este caso, el vertido se aproxima más al foco de contaminación cuanto mayor es el número de fases seleccionado.

Transcurridas 3h y 6h del momento del vertido, los mapas se parecen entre sí, pero encontramos que en los de 6 y 8 fases las zonas de mayor probabilidad de encontrar residuos son las mismas, mientras que en el de 4 fases estas probabilidades se encuentran en otros puntos.

Para $t = 12h$ y $t = 24h$, las basuras se han dispersado bastante y los mapas se parecen mucho. Además, las zonas de acumulación también coinciden.

Teniendo en cuenta que a mayor número de fases de marea seleccionadas mejor quedará representada la marea, los resultados obtenidos para 8 fases de marea son los que mejor reproducen la realidad. Por lo tanto, del análisis de sensibilidad realizado se concluye que 4 fases de marea son insuficientes para el estudio de dispersión de basuras, mientras que 6 y 8 fases proporcionan unos resultados similares, siendo más sólidos los obtenidos para 8 fases.

Capítulo 6 . IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN DE BASURAS MARINAS

En el presente capítulo se identifican las zonas de acumulación de basuras marinas en el entorno de la Bahía de Santander. Para llevar a cabo este estudio se ha utilizado la metodología descrita en el capítulo 3.

Como la metodología se ha aplicado en el capítulo anterior, a continuación se muestran los resultados obtenidos pasadas 24h del momento del vertido para los dos escenarios seleccionados y para los tres puntos de vertido que se han estudiado en el capítulo anterior (véase figura 5.2), con el fin de determinar las zonas de mayor acumulación de basuras marinas en el corto plazo (1 día).

6.1 Resultados

Seguidamente se exponen los mapas obtenidos para los 3 puntos de vertido en el escenario 6 (mayor caudal fluvial) y el escenario 16 (mayor frecuencia de ocurrencia), utilizando 8 fases de marea. Además, se señalan las zonas con mayor probabilidad de presencia de plásticos transcurridas 24h del vertido.

Escenario 6

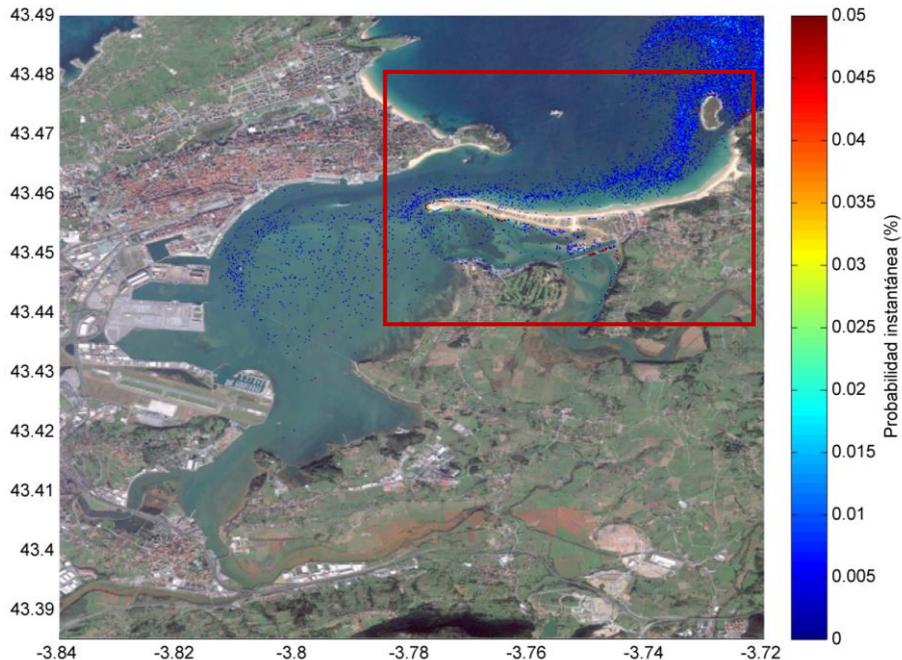


Figura 6.1 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P1, escenario 6

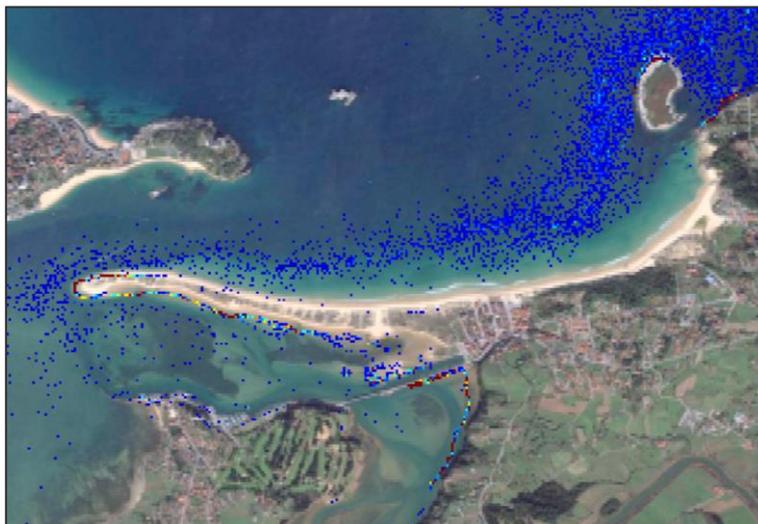


Figura 6.2 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P1, escenario 6

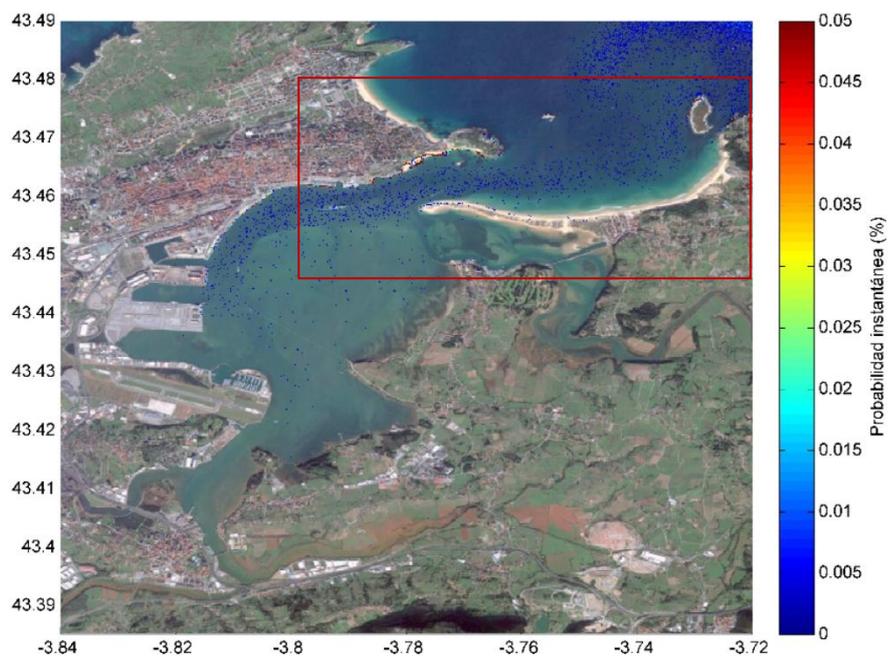


Figura 6.3 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P2, escenario 6



Figura 6.4 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P2, escenario 6

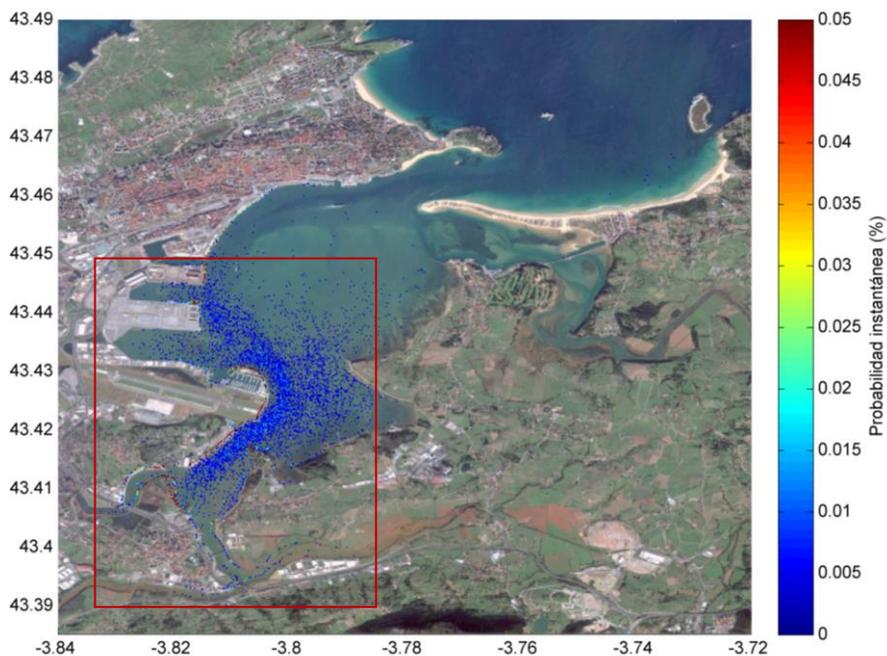


Figura 6.5 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P3, escenario 6

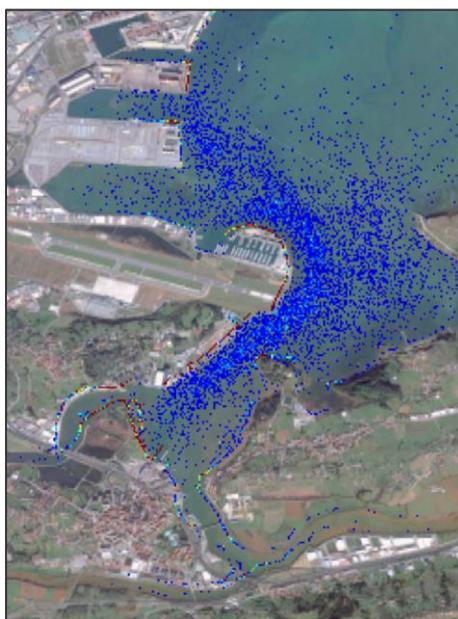


Figura 6.6 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P3, escenario 6

Para el escenario 6 (mayor caudal fluvial) se observa en las figuras anteriores la distribución de las basuras marinas en el entorno de la Bahía de Santander pasadas 24h desde el momento del vertido, así como las zonas con mayor presencia de partículas en ese instante. A continuación, se hace un breve análisis de las zonas de mayor probabilidad en cada uno de los casos.

En la figura 6.1 se señalan las zonas con mayor acumulación de basuras para el punto de vertido P1, situado en el cauce del río Miera. En la figura 6.2 se observa con más detalle la zona con más cantidad de residuos. Se pueden localizar basuras principalmente en tres zonas: el río Miera en la zona próxima al embarcadero, El Puntal y la costa Noroeste de la isla de Santa Marina.

El punto de vertido P2 se localiza próximo a la playa de La Magdalena y los sitios con mayor probabilidad de encontrar basuras pasadas 24h del vertido son las playas de Los Bikinis, La Magdalena y Los Peligros (véanse las figuras 6.3 y 6.4). También hay posibilidad de encontrar basuras en la zona de Puertochico y en la costa Noroeste de la isla de Santa Marina, aunque en estos lugares la probabilidad es menor.

El mapa obtenido para el punto de vertido P3 situado en la ría del Astillero (véanse las figuras 6.5 y 6.6) presenta como ubicación con mayor probabilidad de encontrar basuras, la zona de la ría del Astillero próxima a Maliaño, es decir, en los alrededores del punto de vertido. Las otras áreas de mayor probabilidad de presentación son la ría de Boo y el Puerto de Raos.

Escenario 16

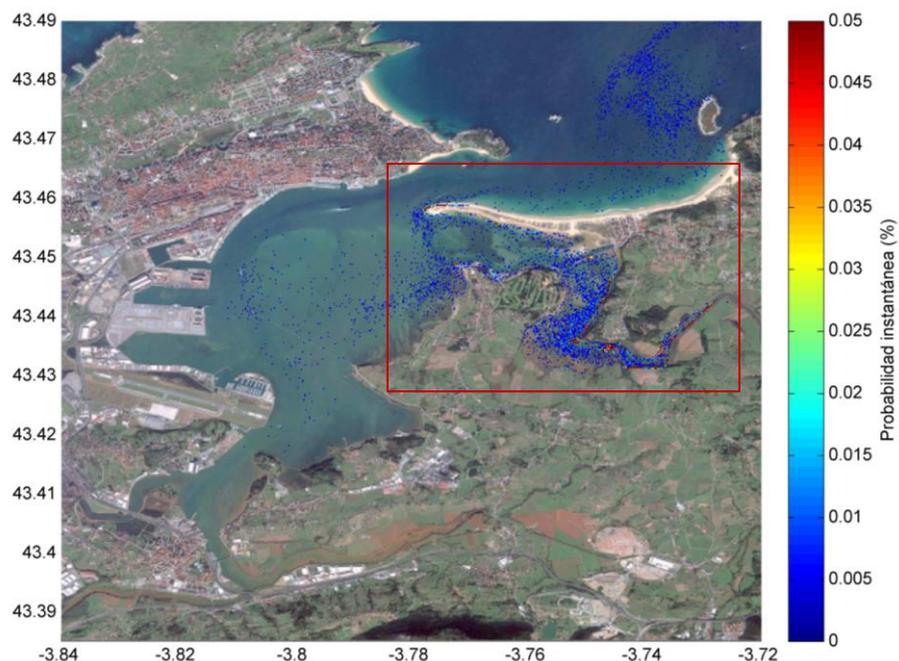


Figura 6.7 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P1, escenario 16



Figura 6.8 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P1, escenario 16

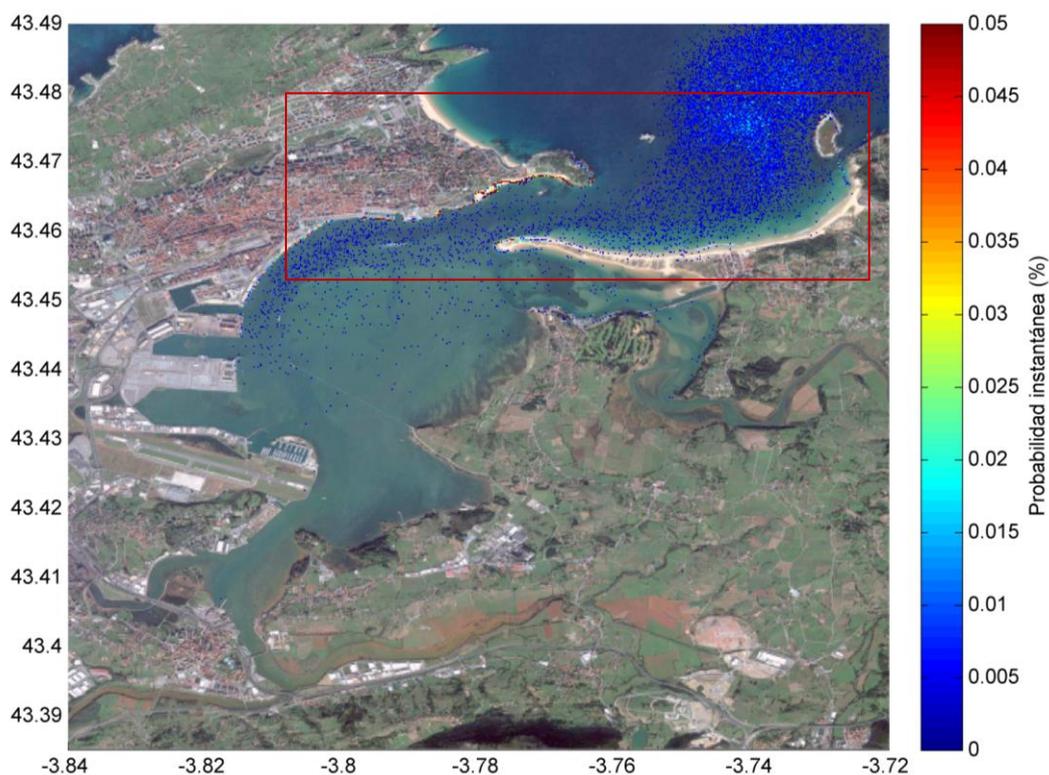


Figura 6.9 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P2, escenario 16

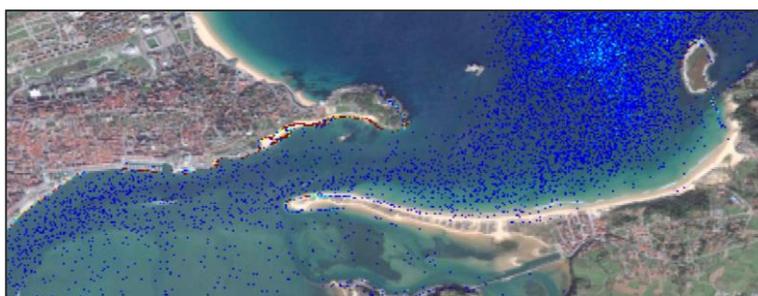


Figura 6.10 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P2, escenario 16

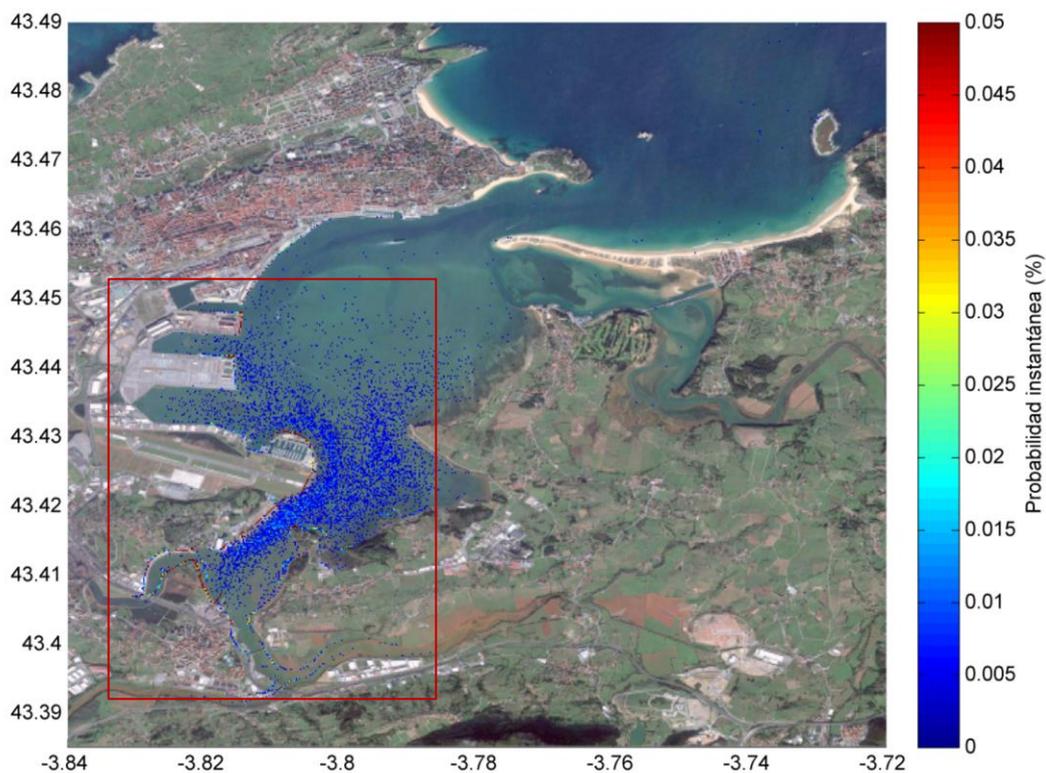


Figura 6.11 Identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas pasadas 24h del vertido en el P3, escenario 16

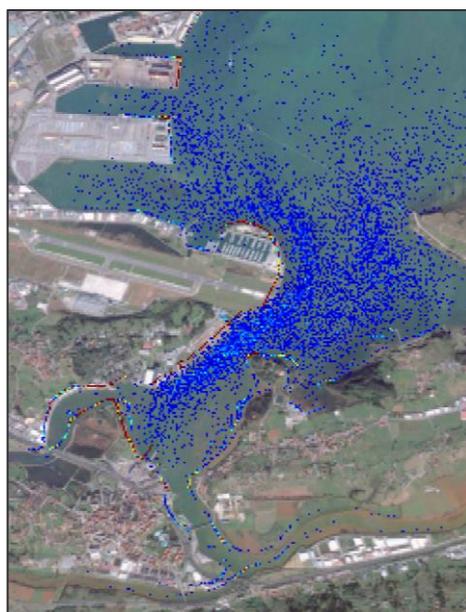


Figura 6.12 Zonas con mayor acumulación de basuras pasadas 24h del vertido en el P3, escenario 16

Para el escenario 16 (mayor frecuencia de ocurrencia) se presentan en las figuras anteriores la distribución de las basuras marinas transcurridas 24h desde el momento del vertido, así como las zonas con mayor presencia de partículas en ese instante.

En las figuras 6.7 y 6.8 se señalan las zonas con mayor acumulación de basuras para el punto de vertido P1, situado en el cauce del río Miera. Las mayores probabilidades se presentan en las márgenes del río, así como en El Puntal.

El punto de vertido P2 se localiza próximo a la playa de La Magdalena y los lugares con mayor probabilidad de encontrar basuras son las playas próximas, aunque también llegan a la marina de Puertochico y al frente marítimo de la ciudad. Algunas basuras salen de la bahía y se acumulan en la costa Noroeste de la isla de Santa Marina (véanse las figuras 6.9 y 6.10)

Para el punto de vertido P3 situado en la ría del Astillero (véanse las figuras 6.11 y 6.12), las mayores acumulaciones se dan en la zona de las márgenes de la propia ría, sobre todo en la margen izquierda. También se pueden encontrar en la ría de Boo, en el Puerto de Raos, y con una menor probabilidad en la unión de las rías de Solía y San Salvador.

6.2 Conclusiones

De la identificación de las basuras en el entorno de la Bahía de Santander transcurrido 1 día desde el momento del vertido, se concluye que las mayores acumulaciones de basuras se producen en zonas próximas al vertido e intermareales, como El Puntal, las márgenes del cauce del río Miera, las márgenes de la ría del Astillero, las playas de Bikinis, La Magdalena y Los Peligros y también en la costa Noroeste de la isla de Santa Marina.

Cabe destacar que los resultados obtenidos para el escenario 6 (mayor caudal fluvial) y para el escenario 16 (mayor frecuencia de ocurrencia) proporcionan unas áreas de acumulación similares para los puntos de vertido P2 y P3. Sin embargo, como es de esperar, dado que el punto P1 se sitúa en el cauce del río y el escenario 6 tiene un caudal fluvial mayor, hay menos cantidad de partículas en el cauce del río, la mayoría de ellas salen al exterior de la bahía e incluso llegan a depositarse en la costa Noroeste de la isla de Santa Marina.

Capítulo 7 . RESUMEN, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En el presente estudio se ha realizado un análisis de sensibilidad de las fases de marea para la identificación de las zonas de acumulación de basuras marinas. De dicho análisis se concluye que 4 fases de marea son insuficientes mientras que 6 y 8 fases de marea proporcionan unos resultados similares, aunque con algunas diferencias. Dado que a mayor número de fases de marea seleccionadas mejor quedará representada la marea, los resultados obtenidos para 8 fases de marea son los que mejor reproducen la realidad. Como futura línea de trabajo sería interesante realizar el análisis de sensibilidad utilizando más número de fases de marea, para encontrar el número de fases a partir del cual los resultados obtenidos para la dispersión de basuras son prácticamente iguales.

Además de las fases de marea, la carrera de marea es un aspecto que influye en el presente estudio, sobre todo en zonas donde el rango de marea es grande, como en el Cantábrico. Por ello, aunque en este estudio se han utilizado 4 carreras de marea equiprobables, sería interesante realizar un análisis de sensibilidad de las carreras de marea para identificar el número óptimo a emplear.

En cuanto a la identificación de basuras en el entorno de la bahía, las zonas de mayor acumulación se encuentran próximas a los puntos de vertido. Para el punto de vertido P1, se encuentran mayores acumulaciones en las márgenes del río Miera y en El Puntal. Para el foco de contaminación situado en la Playa de La Magdalena (P2) se encuentran acumulaciones en las playas próximas y en la zona de Puertochico. Finalmente, para el punto de vertido situado en la ría del Astillero (P3) las mayores acumulaciones son en la propia ría, en el Puerto de Raos y en la ría de Boo.

Como continuación del estudio de identificación de basuras marinas en la Bahía de Santander, se podría realizar el modelado de dispersión de residuos utilizando todos los posibles focos de contaminación que se identificaron, así como los 36 escenarios hidrodinámicos que representan las condiciones de viento, oleaje y caudal fluvial de la zona.

Además, al tratarse del modelado de partículas flotantes, el efecto del viento es importante y no ha sido incluido en el cálculo del transporte ya que no se tenían datos con suficiente resolución, por lo tanto, sería recomendable obtener una base de datos de viento con suficiente resolución.

Asimismo, se propone como futura línea de investigación la validación de la metodología mediante la realización de trabajo de campo consistente en verter partículas biodegradables en desde los focos de contaminación y observar sus trayectorias y zonas de acumulación más probables.

REFERENCIAS

- Abascal, A. J. *et al.* (2007) 'Teseo, An Operational System For Simulating Oil Spills Trajectories And Fate Processes'. International Society of Offshore and Polar Engineers. Available at: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-07-072> (Accessed: 19 September 2017).
- Abascal, A. J. *et al.* (2017) 'Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: A northwest European continental shelf case study', *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier, 119(1), pp. 336–350. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.04.010.
- Barnes, D. K. a *et al.* (2009) 'Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments.', *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364(1526), pp. 1985–1998. doi: 10.1098/rstb.2008.0205.
- Bergmann, M., Gutow, L. and Klages, M. (2015) 'Marine anthropogenic litter', in *Marine Anthropogenic Litter*, pp. 1–447. doi: 10.1007/978-3-319-16510-3.
- Booji, N., Ris, R. C. and Holthuijsen, L. H. (1999) 'A third-generation wave model for coastal regions: Model description and validation', *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7649–7666. doi: 10.1029/98JC02622.
- Castanedo, S. *et al.* (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*, 226, pp. 1474–1489. doi: 10.2112/04-0364.1.
- Camus, P. *et al.* (2011) 'Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate', *Coastal Engineering*, 58(6), pp. 453–462. doi: 10.1016/j.coastaleng.2011.02.003.
- Cid, A. *et al.* (2014) 'A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: the GOS dataset', *Climate Dynamics*, 43(7–8), pp. 2167–2184. doi: 10.1007/s00382-013-2041-0.
- Cole, M. *et al.* (2011) 'Microplastics as contaminants in the marine environment: A review', *Marine Pollution Bulletin*. Elsevier Ltd, 62(12), pp. 2588–2597. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- Cózar, A. *et al.* (2014) 'Plastic debris in the open ocean.', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. National Academy of Sciences, 111(28), pp. 10239–44. doi: 10.1073/pnas.1314705111.
- Deltares (2014a) *Delft3D-FLOW, User Manual*.
- Deltares (2014b) *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual*.
- Derraik, J. G. . (2002) 'The pollution of the marine environment by plastic debris: a review', *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), pp. 842–852. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.

Deudero, S. and Alomar, C. (2015) 'Mediterranean marine biodiversity under threat: Reviewing influence of marine litter on species', *Marine Pollution Bulletin*, 98(1–2), pp. 58–68. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.012.

Directiva 92/43/CCE (1992) *Directiva 92/43/CEE del Consejo relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres*, *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*.

Galgani, F., Souplet, A. and Cadiou, Y. (1996) 'Accumulation of debris on the deep sea floor off the French Mediterranean coast', *Marine Ecology-Progress Series*, 142(1–3), pp. 225–234. doi: 10.3354/meps142225.

Gall, S. C. and Thompson, R. C. (2015) 'The impact of debris on marine life', *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2), pp. 170–179. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.12.041.

Granado Domínguez, I. (2016) *Modelado hidrodinámico y de la calidad en la Bahía de Santander*.

Hidalgo-Ruz, V. *et al.* (2012) 'Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification', *Environmental Science & Technology*, 46(6), pp. 3060–3075. doi: 10.1021/es2031505.

Holthuijsen, L. H., Booij, N. and Herbers, T. H. C. (1989) 'A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents', *Coastal Engineering*, 13(1), pp. 23–54. doi: 10.1016/0378-3839(89)90031-8.

IHCantabria (2016) *TESEO, Manual de Usuario*.

Li, M., Zhong, L. and Boicourt, W. C. (2005) 'Simulations of Chesapeake Bay estuary: Sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations', *Journal of Geophysical Research*, 110(C12), p. C12004. doi: 10.1029/2004JC002585.

Maximenko, N., Hafner, J. and Niiler, P. (2012) 'Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters', *Marine Pollution Bulletin*. Pergamon, 65(1–3), pp. 51–62. doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2011.04.016.

Michalakes J *et al.* (2001) *Development of a next generation regional weather research and forecast model. In Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, Zwiefelhofer W, Kreitz N(eds). World Scientific.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970) 'River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles', *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Pawlowicz, R., Beardsley, B. and Lentz, S. (2002) 'Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE', *Computers & Geosciences*, 28(8), pp. 929–937. doi: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4.

Rech, S. *et al.* (2014) 'Rivers as a source of marine litter – A study from the SE Pacific', *Marine Pollution Bulletin*, 82(1–2), pp. 66–75. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.019.

- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H. and Booij, N. (1999) 'A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification', *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), pp. 7667–7681. doi: 10.1029/1998JC900123.
- Roelvink, J. A. and Banning, G. K. F. M. Van (1994) 'Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics', *Oceanographic Literature Review*. Pergamon Press, 11(42), p. 925. Available at: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-1ca19bb6-25b9-3bf5-bfe9-e96a7027c553> (Accessed: 13 October 2017).
- Thompson, R. C. (2006) 'Marine Nature Conservation in Europe 2006', *Marine Nature Conservation in Europe 2006*, (May 2006), pp. 107–116.
- UNEP (2009) *Marine Litter : A Global Challenge, United Nations Environmental Programme (UNEP)*.
- Usaquén Perilla, O. L. *et al.* (2012) 'Methodology to assess sustainable management of water resources in coastal lagoons with agricultural uses: An application to the Albufera lagoon of Valencia (Eastern Spain)', *Ecological Indicators*, 13(1), pp. 129–143. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.05.019.
- Warner, J. C., Geyer, W. R. and Lerczak, J. A. (2005) 'Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment', *Journal of Geophysical Research*, 110(C5), p. C05001. doi: 10.1029/2004JC002691.
- Willis, K. *et al.* (2017) 'Differentiating littering, urban runoff and marine transport as sources of marine debris in coastal and estuarine environments', *Scientific Reports*. Nature Publishing Group, 7(February), p. 44479. doi: 10.1038/srep44479.
- Willmott, C. J. (1981) 'On the validation of models', *Physical Geography*, 2(2), pp. 184–194. doi: 10.1080/02723646.1981.10642213.
- Zambianchi, E. *et al.* (2014) 'Marine litter in the Mediterranean Sea : an oceanographic perspective', (October 2016), pp. 31–41. doi: 10.13140/RG.2.1.2315.3760.
- Zambianchi, E., Trani, M. and Falco, P. (2017) 'Lagrangian Transport of Marine Litter in the Mediterranean Sea', *Frontiers in Environmental Science*, 5(February), pp. 1–15. doi: 10.3389/fenvs.2017.00005.

ANEJO I: MODELO DELFT3D

Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN

El Delft3D es un sistema de modelado numérico creado por Deltares Systems, de código abierto y capaz de resolver las dinámicas presentes en los ríos, estuarios, lagos-embalses y en las zonas costeras. Está formado por distintos módulos que se pueden ejecutar de forma independiente o acoplados. Estos módulos son:

- FLOW (+MOR): Modelo hidrodinámico tridimensional
- WAVE: Modelo de oleaje (SWAN)
- WAQ: Modelo de calidad de aguas

En el presente anejo se explicaran los módulos utilizados para la realización del presente estudio. Como se ha tratado de tener en cuenta el efecto de las ondas sobre las corrientes, se ha realizado un acoplamiento del módulo Delft3D-WAVE con el módulo Delft3D-FLOW, mediante el cual hay una interacción bidireccional onda-corriente.

Para obtener una información más detallada a cerca de la teoría y el cálculo que emplea el modelo Delft3D se puede consultar el Manual de usuario (Deltares, 2014a) (Deltares, 2014b).

Capítulo 2 . DELFT3D-FLOW

2.1 Introducción

Delft3D-FLOW es un programa de simulación hidrodinámica y de transporte multidimensional (2D o 3D) que calcula los fenómenos de flujo y transporte no estacionarios que resultan de los forzamientos de mareas y condiciones meteorológicas, en una malla que puede ser rectilínea o curvilínea.

El módulo Delft3D-FLOW es apropiado para predecir el flujo en aguas poco profundas, áreas costeras, estuarios, lagos y ríos. Su función principal es el modelado de los fenómenos de flujo en los cuales las escalas horizontales de longitud y tiempo son significativamente más grandes que las escalas verticales.

2.2 Ecuaciones que resuelve

Este módulo utiliza las ecuaciones no lineales para realizar los cálculos hidrodinámicos. Por lo tanto, las ecuaciones que resuelve son la ecuación del momento horizontal, la ecuación de continuidad, la ecuación de transporte y el modelo de cierre de la turbulencia. Debido a que las aceleraciones verticales en aguas someras se asumen pequeñas en comparación a la aceleración gravitacional éstas no se tienen en cuenta y la ecuación del momento vertical es aproximadamente igual a la relación de la presión hidrostática.

A continuación se explican brevemente las ecuaciones que utiliza el módulo Delft3D-FLOW.

2.2.1 Ecuación del momento horizontal

Las ecuaciones de momentos en las direcciones ξ y η son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} +$$

$$+ \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = - \underbrace{\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}}}_{\text{Gradiente de presión}} P_\xi + \underbrace{F_\xi}_{\text{Desequilibrio de las tensiones horizontales de Reynolds}} +$$

$$+ \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\underbrace{\nu_V}_{\text{Coeficiente Eddy Viscosity vertical}} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \underbrace{M_\xi}_{\text{Contribuciones debidas a las fuentes y sumideros de momentos}}$$

Ecuación A.1.1

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} +$$

$$- \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = - \underbrace{\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}}}_{\text{Gradiente de presión}} P_\eta + \underbrace{F_\eta}_{\text{Desequilibrio de las tensiones horizontales de Reynolds}} +$$

$$+ \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\underbrace{\nu_V}_{\text{Coeficiente Eddy Viscosity vertical}} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \underbrace{M_\eta}_{\text{Contribuciones debidas a las fuentes y sumideros de momentos}}$$

Ecuación A.1.2

2.2.2 Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[\underbrace{(d + \zeta)u}_{\text{Componente de la velocidad en } \xi} \sqrt{G_{\eta\eta}} \right]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left[\underbrace{(d + \zeta)v}_{\text{Componente de la velocidad en } \eta} \sqrt{G_{\xi\xi}} \right]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H \underbrace{(q_{in} - q_{out})}_{\text{Fuente y sumidero de agua por unidad de volumen}} + \underbrace{P + E}_{\text{Fuente de precipitación y evaporación}}$$

Ecuación A.1.3

2.2.3 Ecuación de transporte

El modelado del transporte de materia y calor se lleva a cabo mediante la ecuación de advección-difusión en las tres direcciones espaciales. Los términos fuente y sumidero están incluidos en la simulación de descarga y retirada. La ecuación de transporte se presenta formulada en forma conservativa en coordenadas curvilíneas ortogonales en la dirección horizontal y coordenadas σ en la dirección vertical:

$$\frac{\partial (d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial [\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial [\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} =$$

$$\frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_a (d+\zeta)c + S$$

↓ Coeficiente de difusión turbulenta horizontal
 ↓ Coeficiente de difusión turbulenta vertical
 ↓ Proceso de decaimiento de primer orden
 ↑ Fuente y sumidero de agua por unidad de área

Ecuación A.14

2.2.4 Modelo de cierre de turbulencia

El modelo Delft3D tiene implementados cuatro modelos de cierre turbulento para determinar la viscosidad turbulenta vertical :

- Modelo de los coeficientes constantes: se basa en atribuir un valor constante para la viscosidad turbulenta vertical y horizontal
- Modelo de cierre de viscosidad de remolino algebraico (AEM): es una combinación de dos esquemas de cierre de la turbulencia de orden cero, el modelo de cierre algebraico (ALG) y el modelo de longitud de mezcla de Prandtl (PML)
- Modelo de cierre turbulento k-L: esquema de una ecuación en el que la longitud de mezcla (L) se resuelve de forma analítica y la energía cinética turbulenta (k) se obtiene mediante la resolución de una ecuación de transporte para la misma
- Modelo de cierre turbulento K-ε: esquema de dos ecuaciones que resuelve una ecuación de transporte tanto para la energía cinética turbulenta (k) como para la disipación de energía (ε)

Capítulo 3 . DELFT3D-WAVE

3.1 Introducción

Para simular la evolución de las ondas generadas por el viento en las aguas costeras se puede utilizar el módulo Delft3D-WAVE. Este módulo de onda de Delft3D calcula la propagación de ondas, la generación de olas por viento, las interacciones no lineales de onda - onda y la

disipación, para una topografía de fondo dada, un campo de viento, un nivel de agua y un campo de corrientes.

Actualmente, en Delft3D se dispone de dos modelos de onda (ambos del tipo de promediado de fase). Estos son el modelo de onda HISWA de segunda generación (Holthuijsen, Booij and Herbers, 1989) y, su sucesor, el modelo de onda SWAN de tercera generación (Booij, Ris and Holthuijsen, 1999; Ris, Holthuijsen and Booij, 1999). El modelo de onda SWAN es actualmente la opción estándar dentro de Delft3D y es el que se ha utilizado en el presente estudio.

3.2 Modelo de oleaje SWAN

Para simular la evolución de ondas aleatorias, de cresta corta, generadas por el viento en estuarios, bahías, lagos, etc., se utiliza el modelo SWAN de tercera generación (SWAN es un acrónimo de Simulating WAVes Nearshore).

El modelo SWAN se basa en la ecuación de equilibrio de la acción de onda (action balance equation) y es totalmente espectral en todas las direcciones y frecuencias. Esto último implica que pueden modelarse campos de onda aleatorios de cresta corta que se propagan simultáneamente desde direcciones muy diferentes.

SWAN representa la propagación de las ondas teniendo en cuenta los procesos de refracción debido a las corrientes y a la profundidad, y representa los procesos de generación de olas por viento, interacción no lineal onda-onda y disipación de energía por whitecapping.

El modelo SWAN fue desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda) y ha sido validado y verificado con éxito en varios casos de laboratorio y de campo.

3.2.1 Ecuación de balance de acción de onda

El campo ondulatorio en el mar es irregular en el sentido de que es aproximado por una suma de ondas regulares de frecuencias diferentes. Todos estos campos de ondas regulares se propagan a diferentes velocidades de modo que el aspecto de la superficie del mar está cambiando constantemente.

Las ondas irregulares son descritas por el espectro de densidad de energía o acción. Esencialmente, la densidad de acción es la contribución de las ondas en una determinada dirección y con cierta frecuencia a la acción total de la ola. La densidad de la acción es una función del espacio y del tiempo (en una escala grande comparada con la longitud y el período de la onda) y de coordenadas espectrales (frecuencia y dirección de la onda).

Los modelos de ondas espectrales se basan en la ecuación de balance de acción, ya que la acción de la onda es una cantidad conservada en ausencia de generación de olas (por el viento) y disipación.

$$\begin{array}{c}
 \text{Cambio de la densidad de energía espectral en el tiempo} \\
 \frac{\partial E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \overbrace{\frac{\partial C_{g_x} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g_y} E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y}}^{\text{Propagación de la densidad espectral en el espacio xy (evalúa el asomeramiento del oleaje espectral)}} \\
 + \underbrace{\frac{\partial C_\theta E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta}}_{\text{Cambio de la dirección de energía espectral por efecto del fondo y corrientes (refracción y difracción)}} + \underbrace{\frac{\partial C_\sigma E(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma}}_{\text{Cambio de las frecuencias relativas de energía espectral por efecto del fondo y corrientes}} = \underbrace{\frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}}_{\text{Forzamiento espectral direccional (incluye los efectos no lineales onda-onda y la disipación)}}
 \end{array}$$

Ecuación A.1 5

ANEJO II: MODELO TESEO

Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN

El TESEO es un sistema de modelado numérico desarrollado por el IHCantabria que se utiliza para simular el transporte y la degradación de hidrocarburos, además de la deriva de objetos flotantes en el medio marino. El modelo está constituido a su vez por:

- Modelo de transporte: Modelo de transporte lagrangiano bidimensional
- Modelo de envejecimiento del hidrocarburo

Cabe destacar que el modelo TESEO ha sido validado y calibrado mediante la utilización de boyas de deriva lanzadas durante el accidente del *Prestige (2002)* y en diferentes ejercicios de lucha contra la contaminación realizados por Salvamento Marítimo en el Mar Mediterráneo y en el océano Atlántico (Abascal *et al.*, 2007, 2017).

En el presente anejo se explica el modelo de transporte ya que es el que se ha utilizado para la realización de este estudio.

Para obtener una información más detallada a cerca de la teoría y el cálculo que emplea el modelo TESEO se puede consultar el Manual de usuario (IHCantabria, 2016).

Capítulo 2 . MODELO DE TRANSPORTE

2.1 Introducción

El modelo de transporte es un modelo lagrangiano bidimensional (2D) que calcula el movimiento de hidrocarburos u objetos flotantes a la deriva. Este modelo está basado en el modelo PICH, desarrollado por la Universidad de Cantabria durante el accidente del *Prestige* (Castanedo *et al.*, 2006).

El modelo simula el transporte mediante la suma de partículas que se mueven de forma independiente por efecto del viento, oleaje, corrientes y difusión turbulenta.

2.2 Modelo de transporte lagrangiano bidimensional

La ecuación que resuelve el modelo lagrangiano bidimensional es la siguiente:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_a(x_i, t) + U_d(x_i, t)$$

↑
 Coordenadas (x,y)
 de la partícula i
 ↓ ↓
 Velocidad Velocidad
 advectiva de la difusiva
 partícula en esa

Ecuación A.II 1

La velocidad advectiva (U_a) se calcula como la combinación lineal de la acción del viento, del oleaje y de las corrientes, según la expresión:

$$U_a(t) = U_C + C_H U_H + C_D U_V$$

Coeficiente de arrastre del oleaje
↑

 ↓
Velocidad superficial de la corriente

 Coeficiente de arrastre del viento
↑

 ↓
Deriva de Stokes producida por el oleaje

 ↓
Velocidad del viento a 10m de la superficie

Ecuación A.II 2

La deriva de Stokes se calcula en base a la formulación propuesta por Dean y Dalrymple (1991):

$$U_H = \frac{gH}{8C}$$

Ecuación A.II 3

Donde:

- g : aceleración de la gravedad
- H : altura de ola significativa
- C : Celeridad del tren de ondas

La velocidad turbulenta se obtiene mediante un proceso de Monte Carlo en el que la velocidad de difusión varía en el intervalo $[-U_d, U_d]$ y se considera proporcional a los coeficientes de difusión. En cada paso de tiempo, el desplazamiento difusivo aleatorio de una partícula se define como:

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

Ecuación A.II 4

Donde:

- D : coeficiente de difusión, varía en el intervalo $1 - 100 \text{ m}^2/\text{s}$

ANEJO III: RESULTADOS DELFT3D

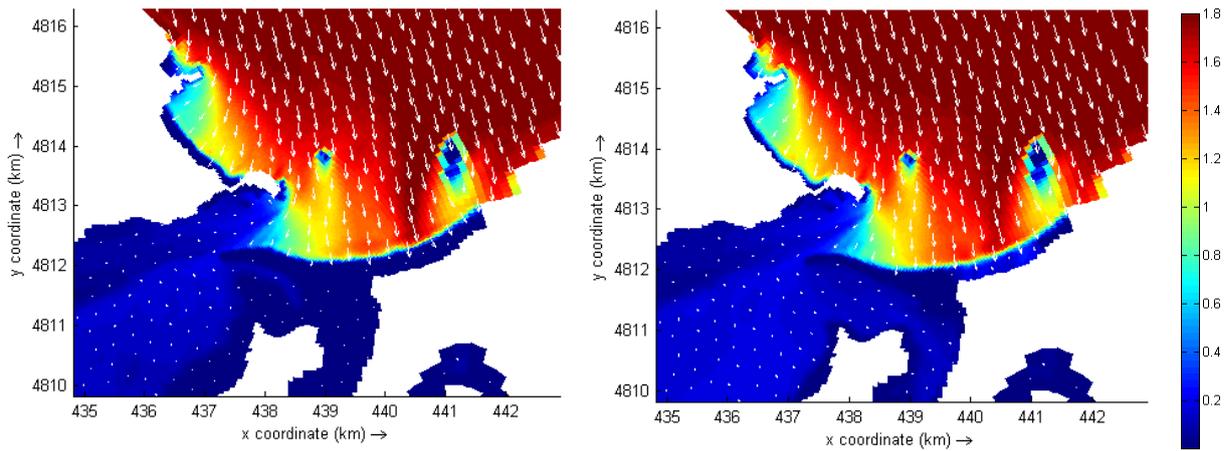


Figura A.III 1 Mapas de altura de ola significativa del E.6 CM1 en bajamar y pleamar

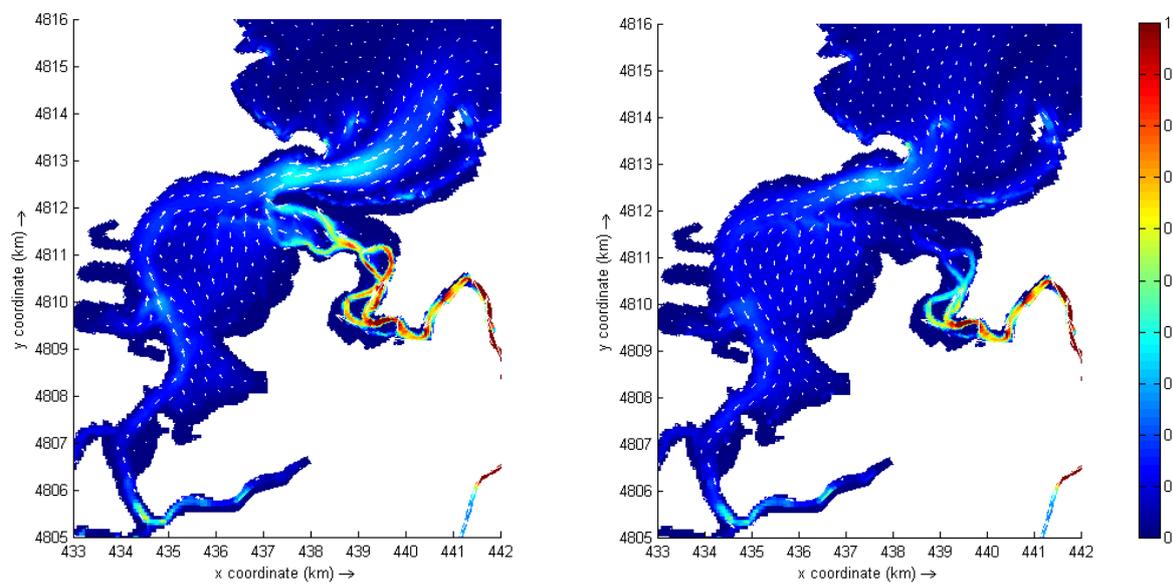


Figura A.III 2 Mapas de corrientes del E.6 CM1 en vaciente y llenante

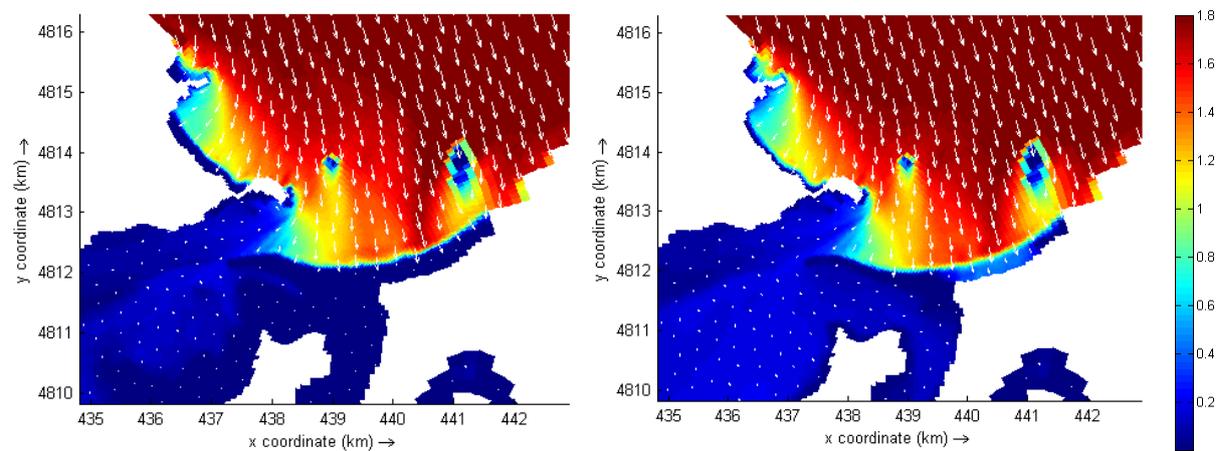


Figura A.III 3 Mapas de altura de ola significativa del E.6 CM2 en bajamar y pleamar

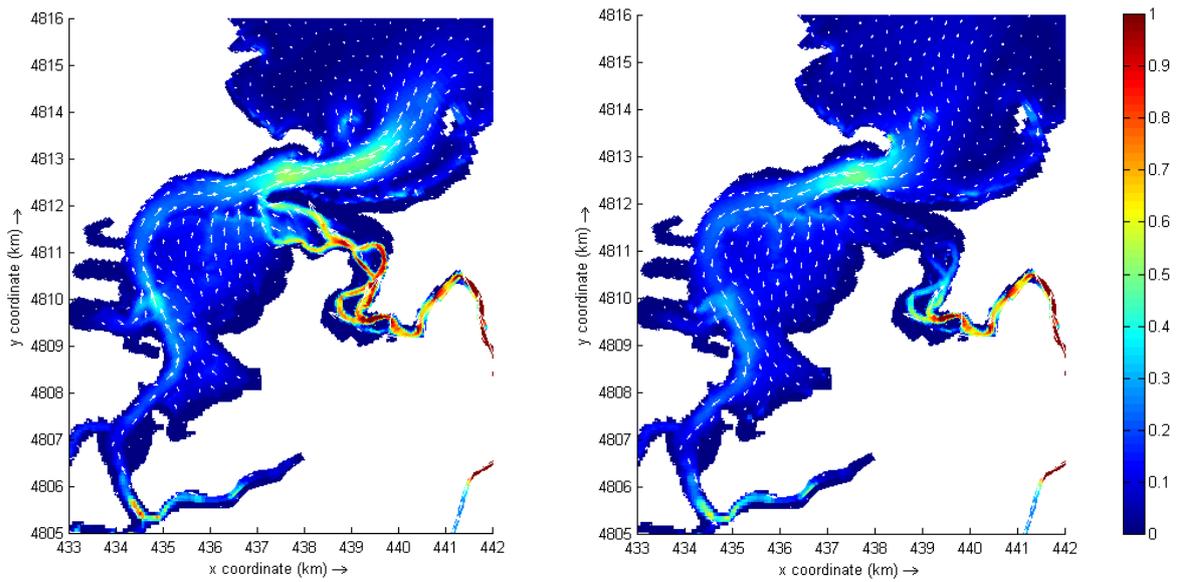


Figura A.III 4 Mapas de corrientes del E.6 CM2 en vaciante y llenante

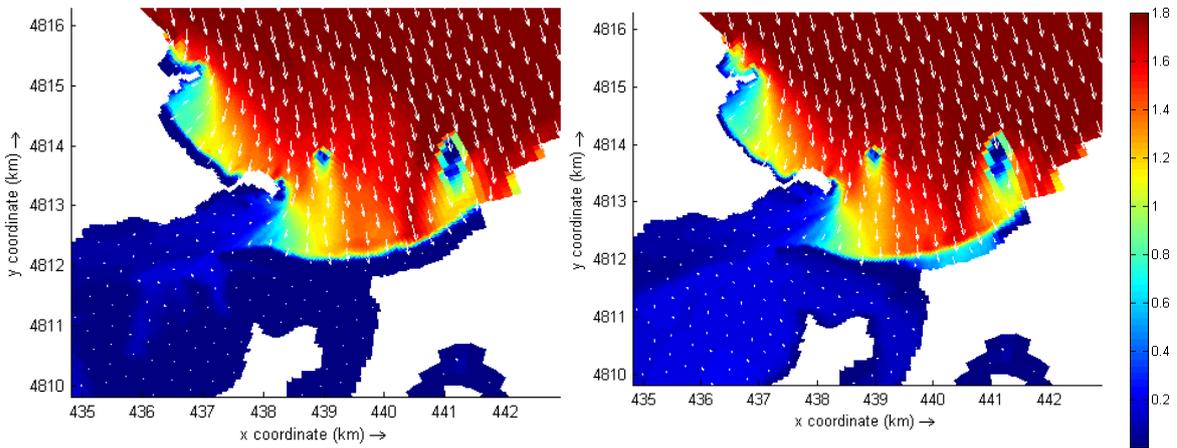


Figura A.III 5 Mapas de altura de ola significativa del E.6 CM3 en bajamar y pleamar

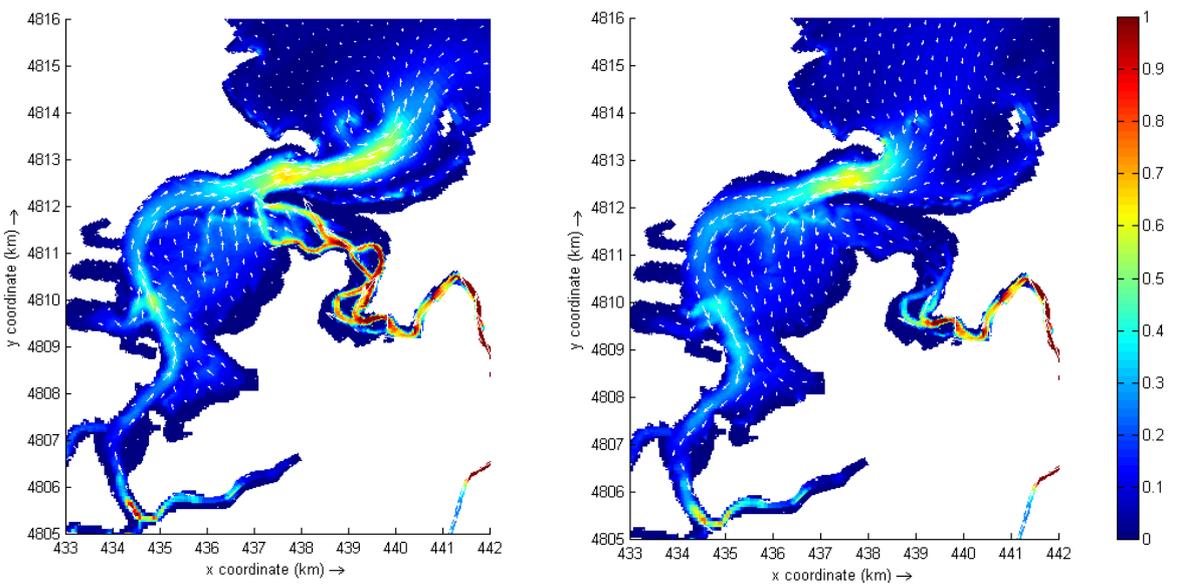


Figura A.III 6 Mapas de corrientes del E.6 CM3 en vaciante y llenante

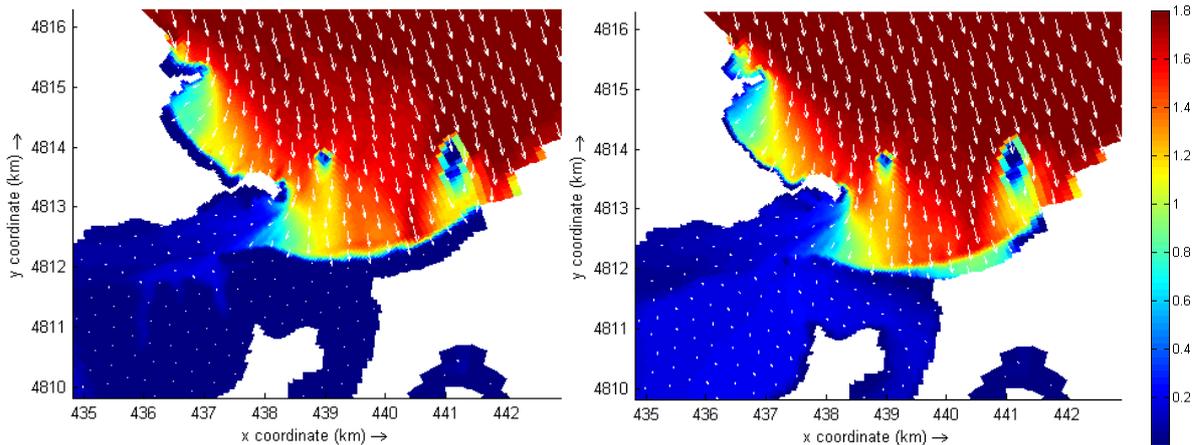


Figura A.III 7 Mapas de altura de ola significativa del E.6 CM4 en bajamar y pleamar

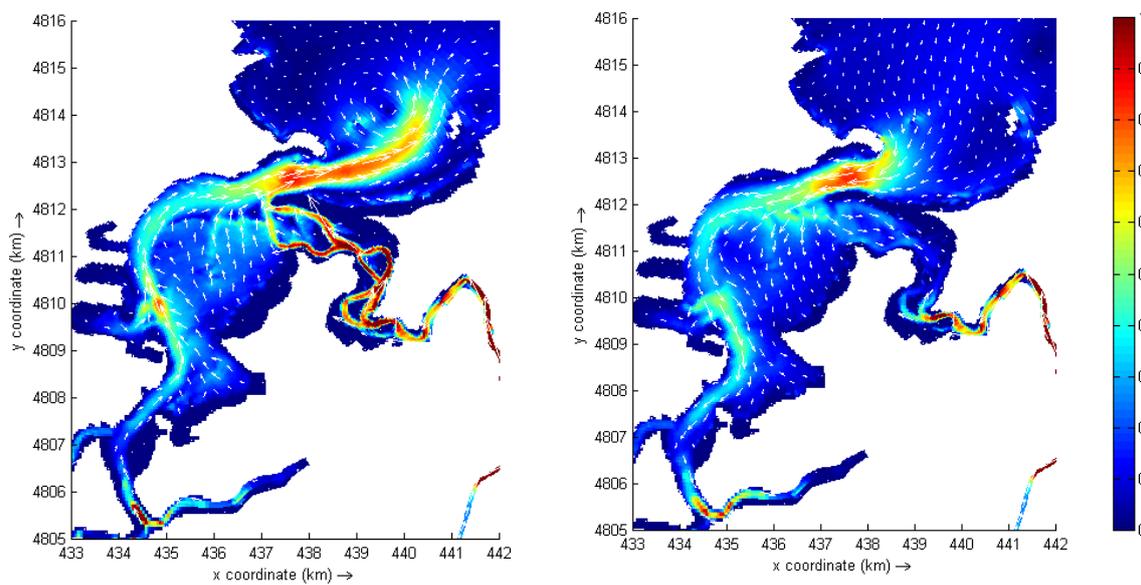


Figura A.III 8 Mapas de corrientes del E.6 CM4 en vaciante y llenante

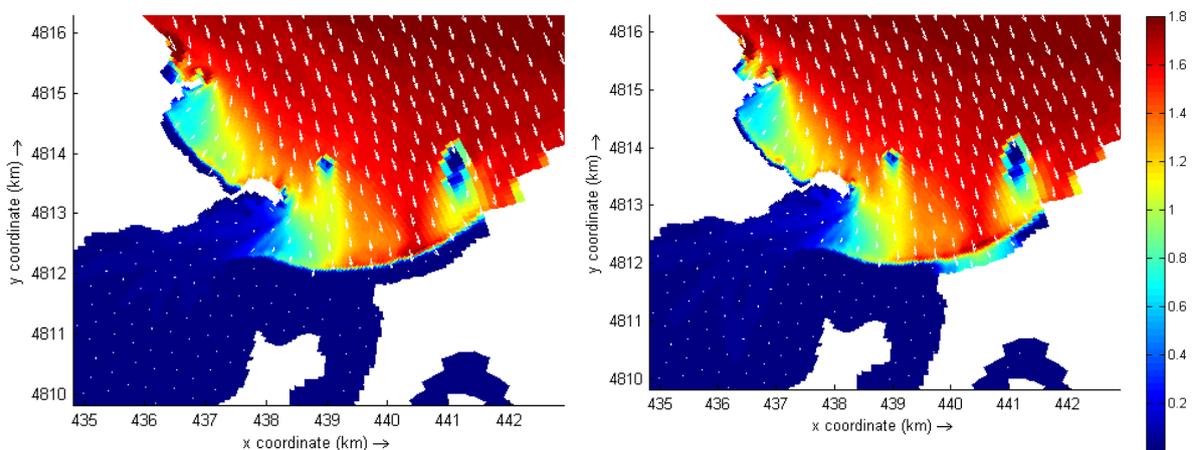


Figura A.III 9 Mapas de altura de ola significativa del E.16 CM1 en bajamar y pleamar

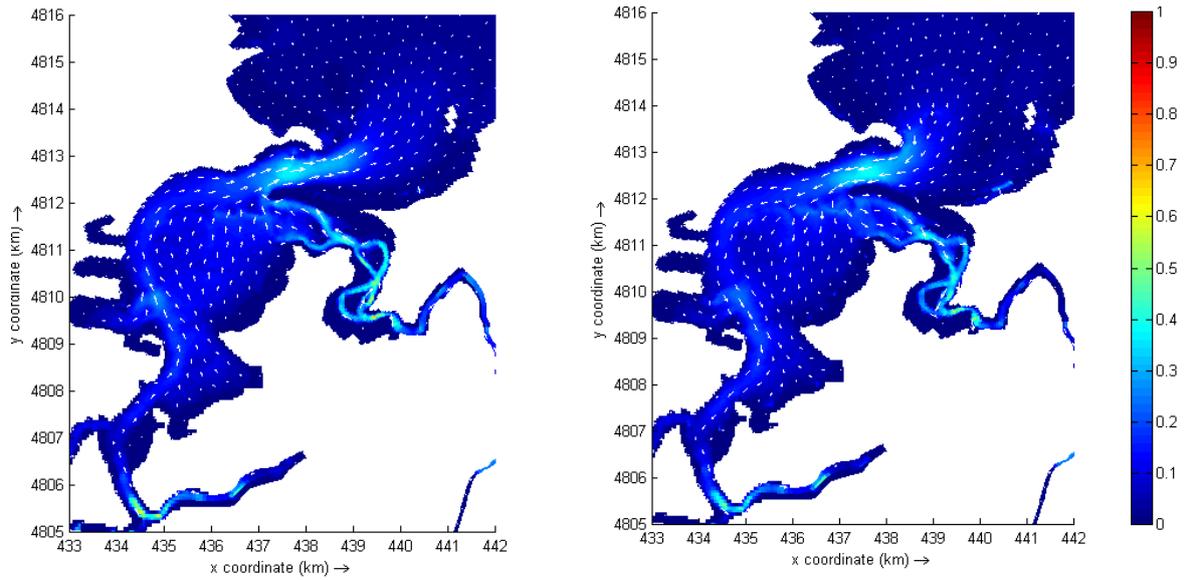


Figura A.III 10 Mapas de corrientes del E.16 CM1 en vaciante y llenante

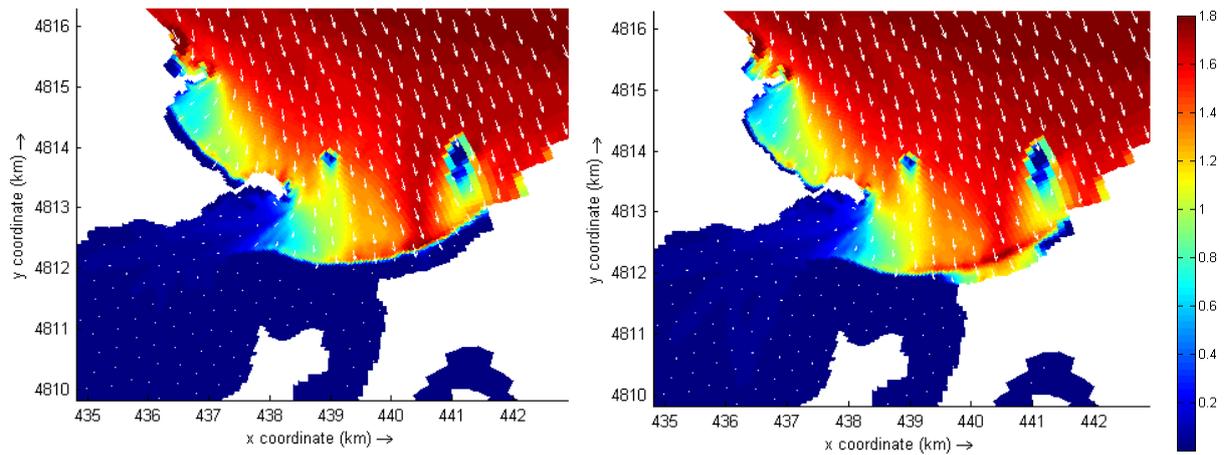


Figura A.III 11 Mapas de altura de ola significativa del E.16 CM2 en bajamar y pleamar

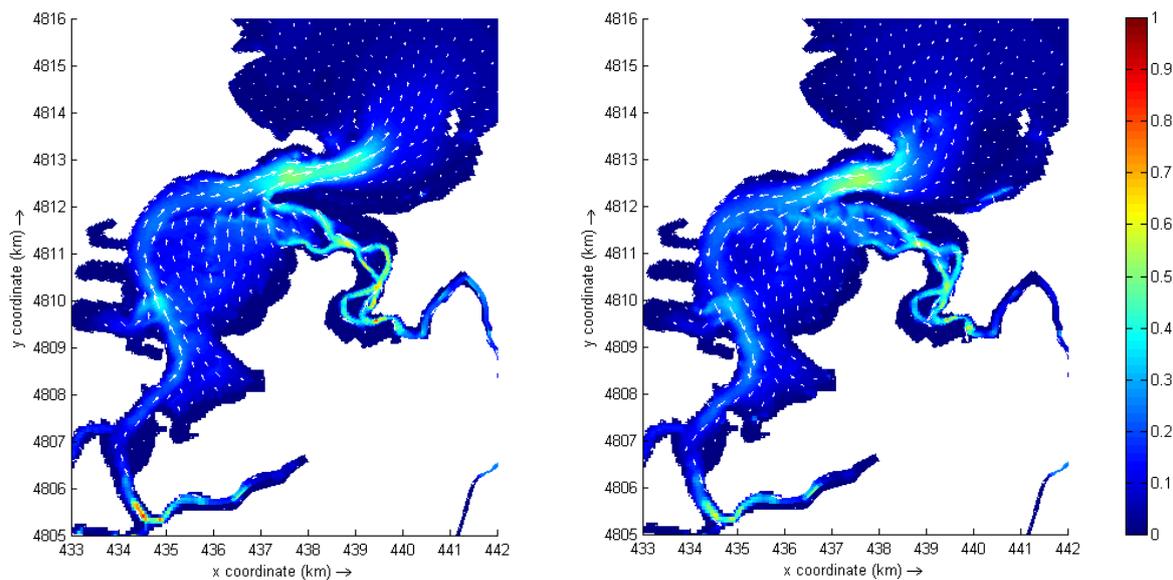


Figura A.III 12 Mapas de corrientes del E.16 CM2 en vaciante y llenante

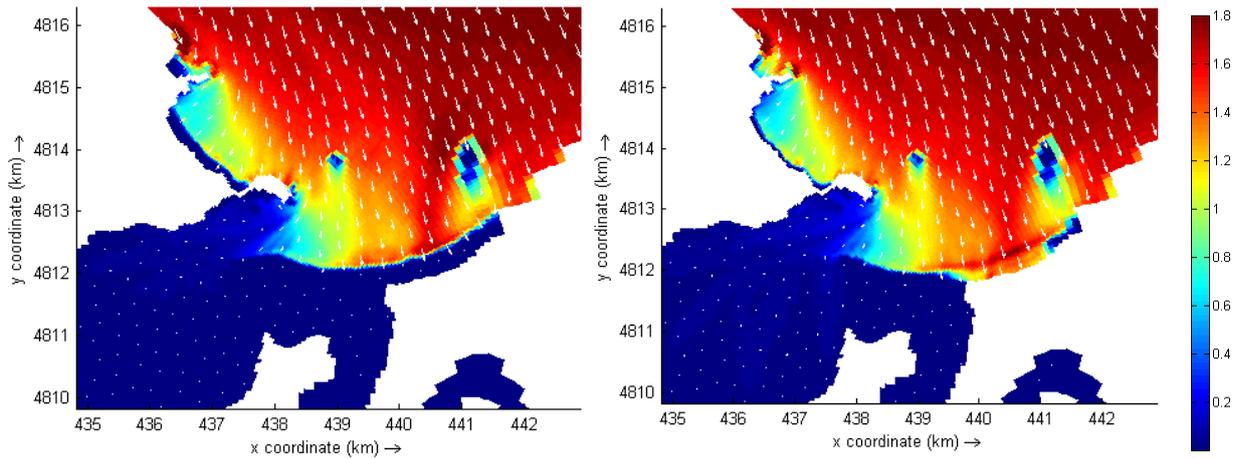


Figura A.III 13 Mapas de altura de ola significativa del E.16 CM3 en bajamar y pleamar

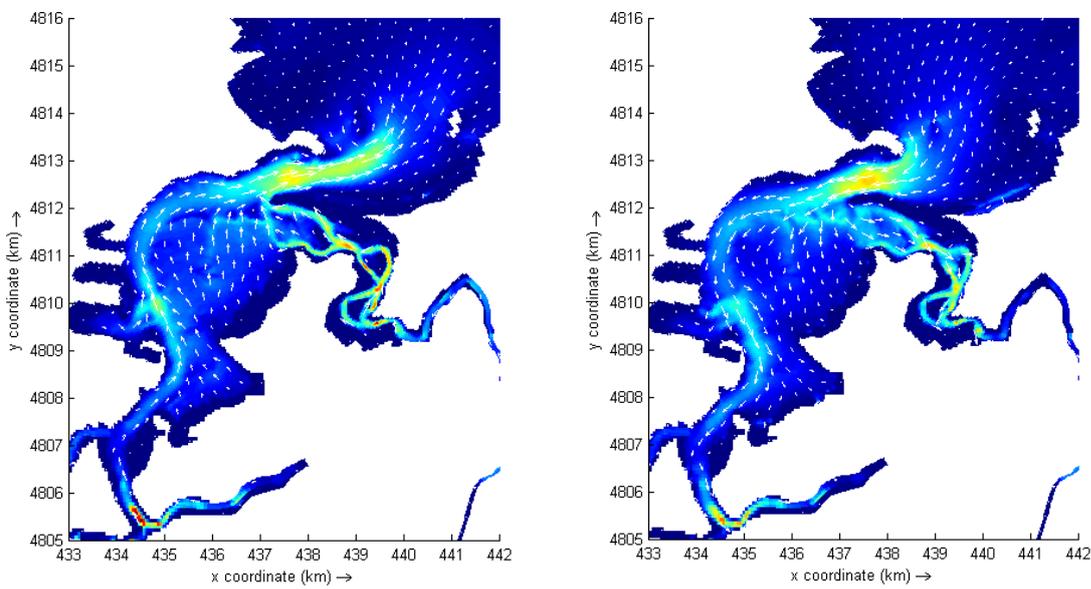


Figura A.III 14 Mapas de corrientes del E.16 CM3 en vaciante y llenante

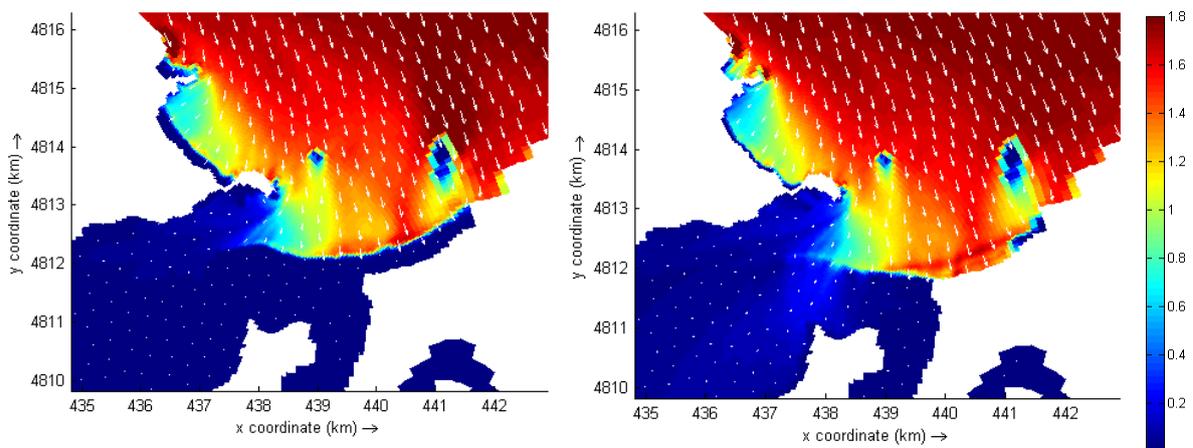


Figura A.III 15 Mapas de altura de ola significativa del E.16 CM4 en bajamar y pleamar

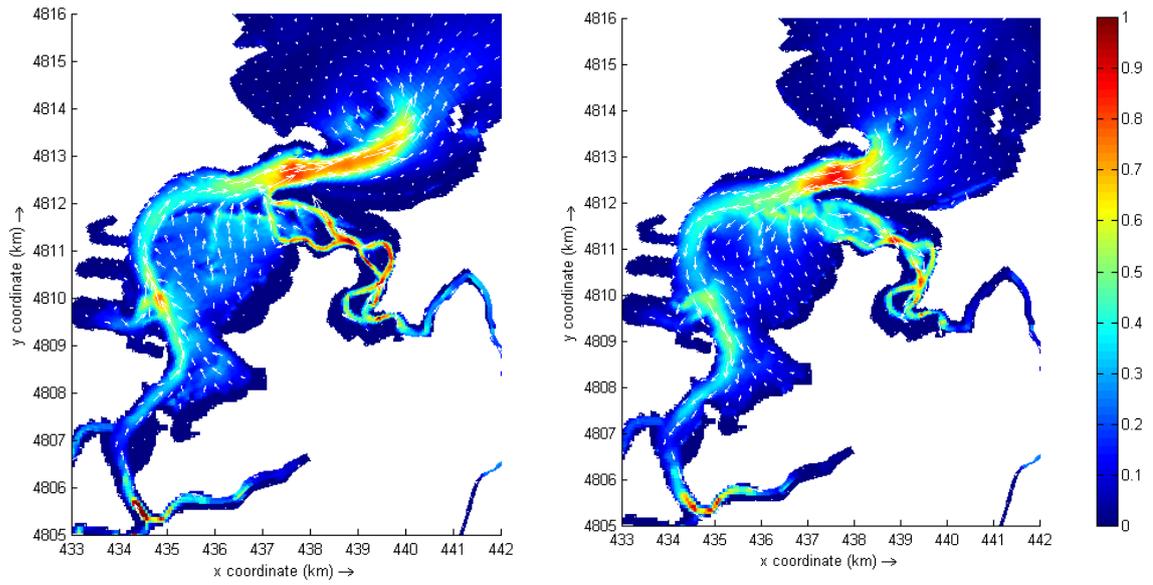
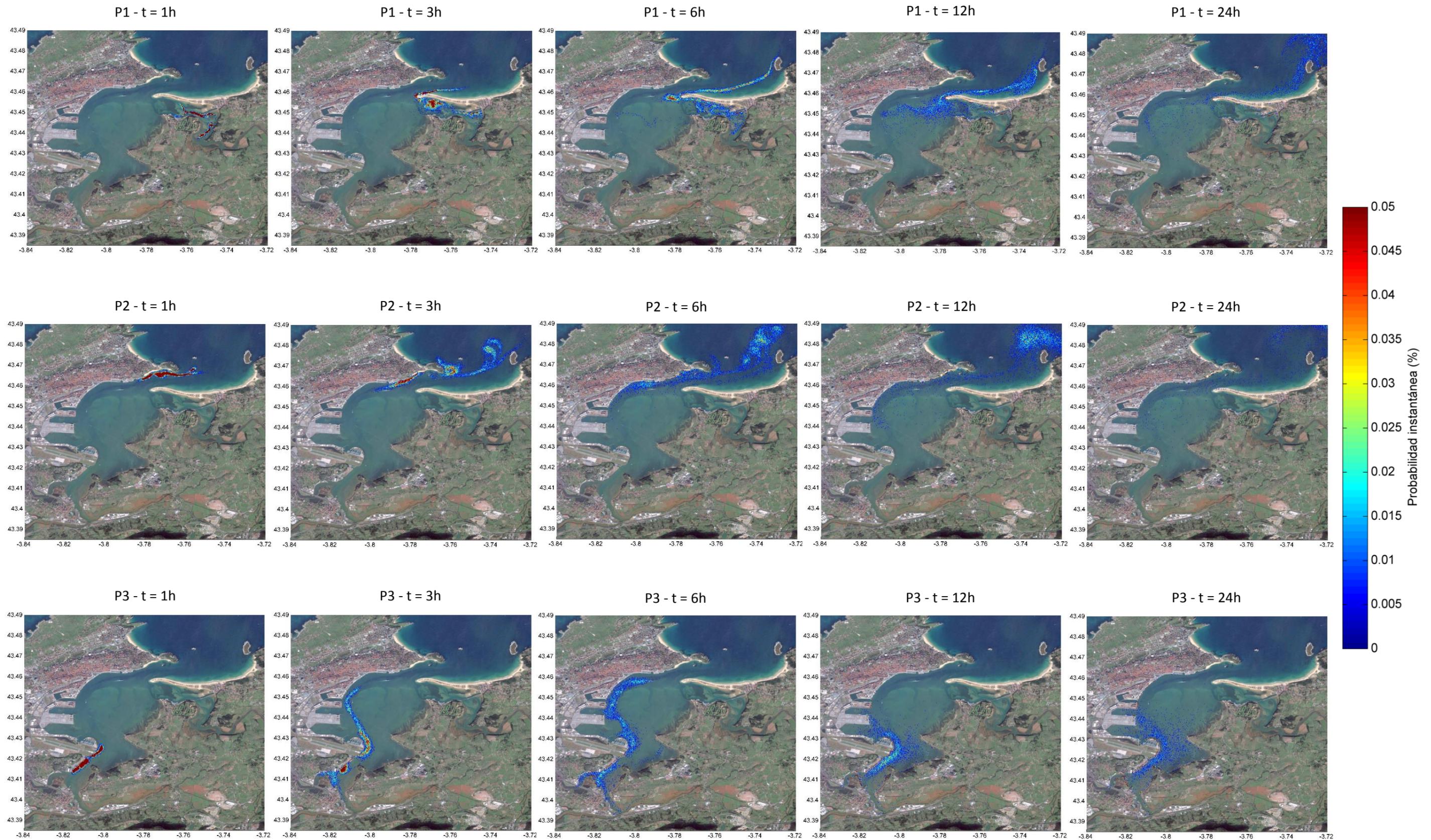


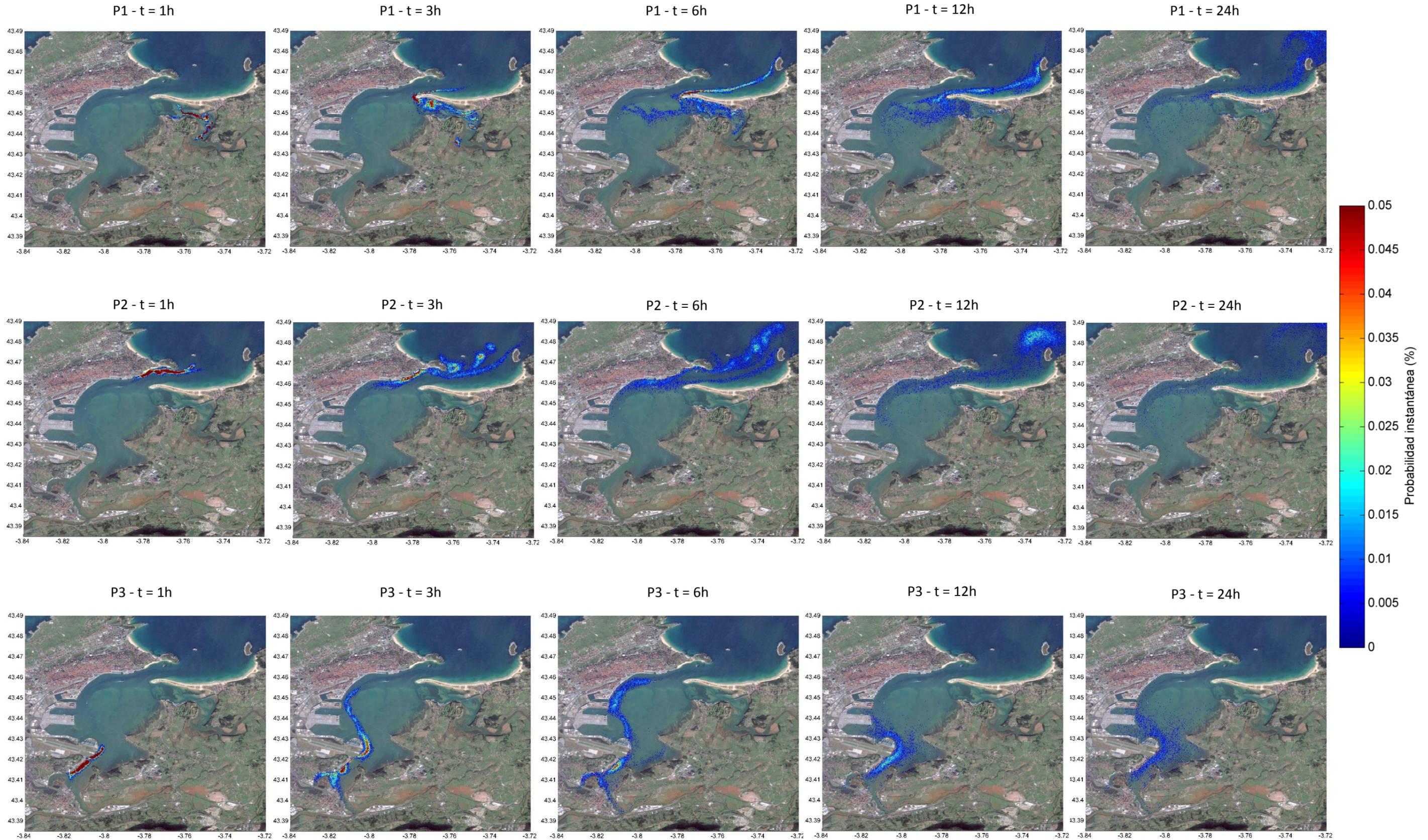
Figura A.III 16 Mapas de corrientes del E.16 CM4 en vaciante y llenante

ANEJO IV: RESULTADOS TESEO

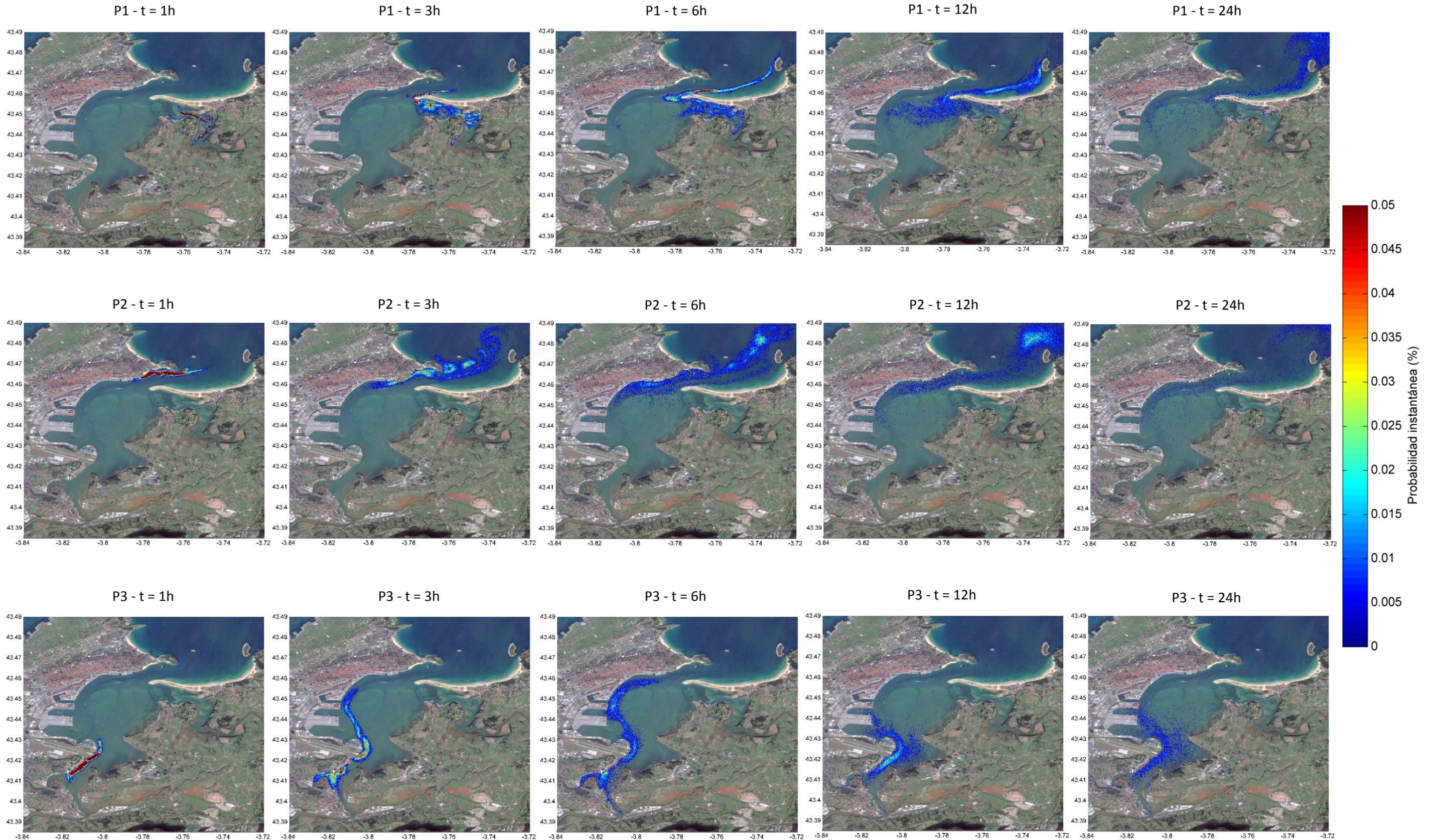
Escenario 6 – 4 fases de marea



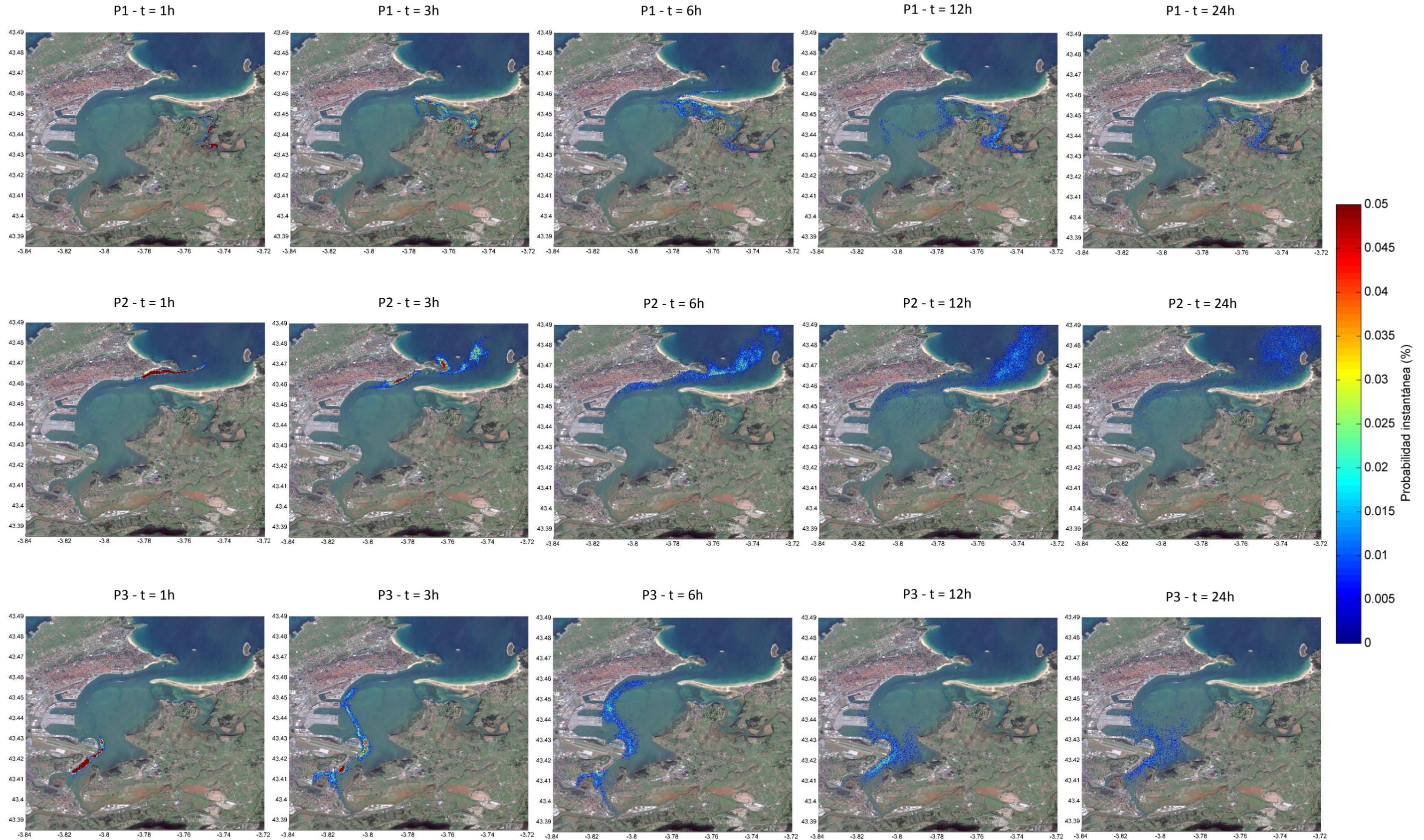
Escenario 6 – 6 fases de marea



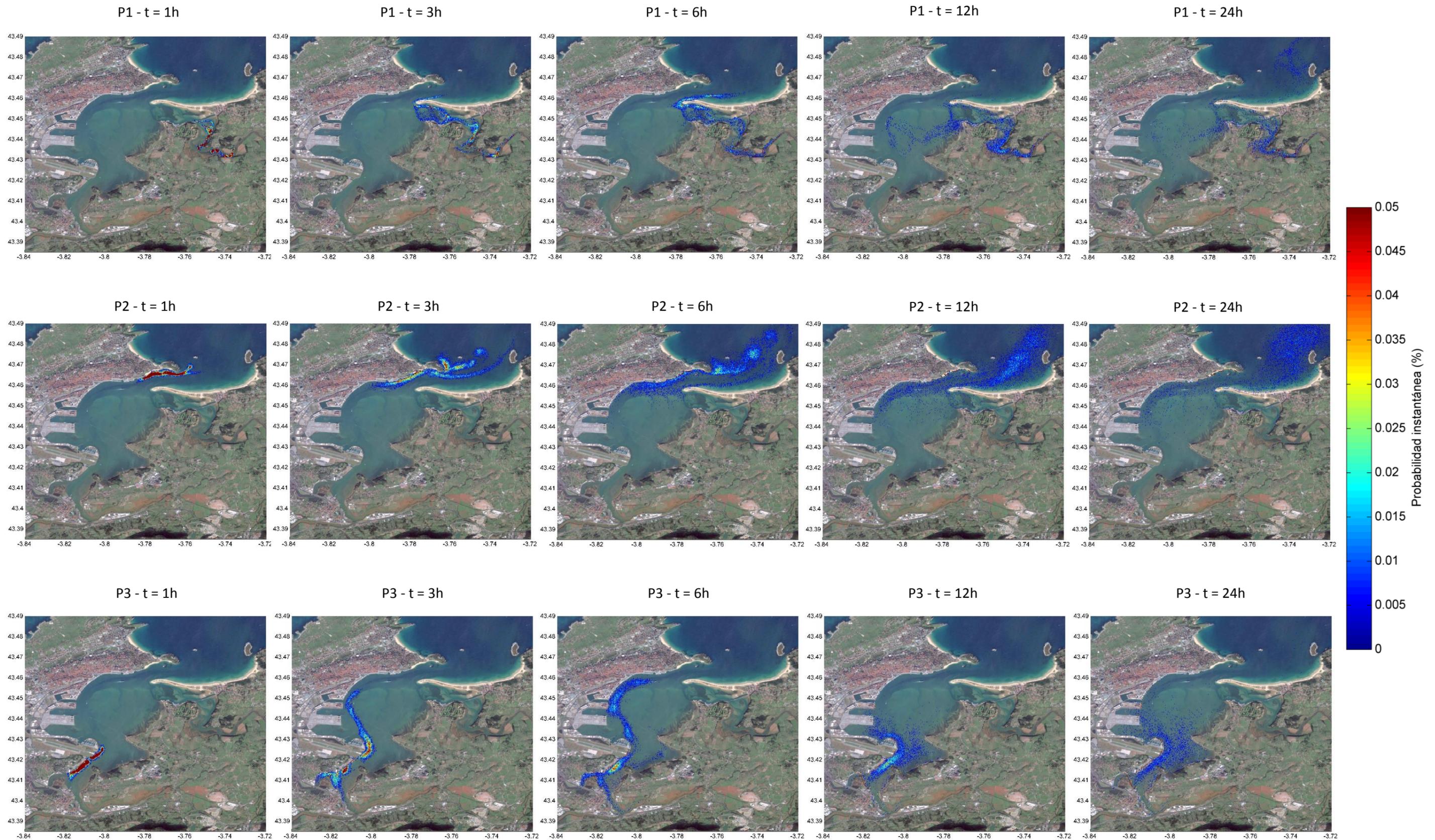
Escenario 6 – 8 fases de marea



Escenario 16 – 4 fases de marea



Escenario 16 – 6 fases de marea



Escenario 16 – 8 fases de marea

