

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

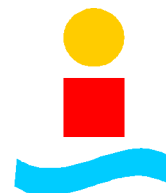
Análisis del efecto del oleaje en la evolución de la costa del Delta del Ebro

Autor: Pablo Monleón Cantalapiedra

Tutor: Carmen Zarzuelo Romero

**Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Análisis del efecto del oleaje en la evolución de la costa del Delta del Ebro

Autor:

Pablo Monleón Cantalapiedra

Tutor:

Carmen Zarzuelo Romero

Profesora Sustituta Interina

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Flúidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Grado: Análisis del efecto del oleaje en la evolución de la costa del Delta del Ebro

Autor: Pablo Monleón Cantalapiedra
Tutor: Carmen Zarzuelo Romero

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Resumen

El Delta del Ebro constituye una de las zonas naturales más biodiversas y ricas de la Península Ibérica. En dicha zona, el problema del nulo transporte de sedimentos debido a la construcción de presas, así como el ya avanzado cambio climático que afecta al planeta, están perjudicando a la naturaleza existente y a las actividades humanas que allí se desarrollan. Esta paulatina destrucción es, en menor medida, provocada por el oleaje y los temporales que inciden en su costa y la deterioran.

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como principal objetivo el estudio del clima marítimo en las aguas próximas al Delta del Ebro, en la Provincia de Tarragona. Para ello, se ha empleado el módulo *WAVE* del modelo hidrodinámico *Delft3D*, desarrollado por Deltares en colaboración con la Universidad de Delft (Países Bajos).

Dicho modelo permite estimar las características del oleaje incidente. Ha sido calibrado con los datos de puntos SIMAR provenientes de Puertos del Estado con coeficientes $R = 0.834$ y $S = 0.70$ para la altura de ola significativa y $R = 0.878$ y $S = 0.87$ para el período pico del oleaje.

Con el modelo calibrado se han definido cuatro escenarios, correspondientes a tres temporales registrados en los últimos años y a un período de calma. El análisis de los resultados de las simulaciones permite concluir con que la energía del oleaje aumenta en períodos de temporal, lo que afectaría a la dinámica litoral del Delta.

Por último, se han analizado las posibles actuaciones futuras para recuperar la estabilidad del Delta, así como las medidas necesarias para mantenerla.

Abstract

The Ebro Delta is one of the richest and most biodiverse natural areas in the Iberian Peninsula. In this area, the lack of sediment transport due to the construction of dams, as well as the increasing climate change affecting the planet, are damaging the existing nature and human activities that take place there. This gradual destruction is, to a lesser extent, caused by the waves and storms that affect its coast and degrade it.

The main objective of this End of Degree Project is to study the maritime climate in the waters close to the Ebro Delta, in the Province of Tarragona. For this purpose, the *WAVE* module of the *Delft3D* hydrodynamic model, developed by Deltares in collaboration with the University of Delft (The Netherlands), has been used.

This model estimates the characteristics of incident waves. It has been calibrated with SIMAR points data from *Puertos del Estado*, with coefficients of $R = 0.834$ and $S = 0.70$ for significant wave height and $R = 0.878$ and $S = 0.87$ for the peak wave period.

Once the model is calibrated, four scenarios have been set, corresponding to three extreme sea level events recorded in recent years and a calm period. The analysis of the results of the simulations allows us to conclude that the wave energy increases in periods of storm, which may affect the coastal dynamics of the Delta.

Finally, the possible future actions to recover the Delta's stability, as well as the necessary measures to maintain it, have been analysed.

Índice

<i>Resumen</i>	I
<i>Abstract</i>	III
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Zona de Estudio	2
1.2.1 Eustatismo	3
1.2.2 Evolución Histórica de la Zona	5
1.2.3 Hidrogeomorfología	7
1.2.4 Economía de la zona	7
1.2.5 Parque Natural del Delta del Ebro	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivos Generales	8
1.3.2 Objetivos Específicos	9
2 Metodología	11
2.1 Clima Marítimo	11
2.1.1 Análisis en Profundidades Indefinidas	11
2.1.2 Análisis en Régimen Medio	12
2.1.3 Análisis en Régimen Extremal	12
2.2 Escenarios	12
2.3 Modelo Numérico	12
2.3.1 Calibración del modelo	13
2.3.2 Validación del modelo	13
2.4 Análisis de Resultados	13
3 Estudio de Clima Marítimo	15
3.1 Descripción y estudio del oleaje	15
3.1.1 Estudio en Profundidades Indefinidas	15
Altura de Ola Significante	16
Período Pico	17
Dirección Media de Procedencia	18
3.1.2 Análisis en Régimen Medio	21
3.1.3 Análisis en Régimen Extremal	23
3.2 Estudio de Viento	26
Velocidad del Viento	26
Dirección Media de Procedencia del Viento	26
4 Modelo Numérico	29
4.1 Introducción: Módulo WAVE	29
4.2 Datos de Entrada	30

4.2.1	Batimetría	30
4.2.2	Línea de Costa	31
4.2.3	Malla	32
4.2.4	Condiciones de Contorno	32
4.2.5	Parámetros del Modelo	33
4.3	Calibración del Modelo	33
4.4	Validación del modelo	35
5	Análisis de Resultados	37
5.1	Escenario 1: Temporal 1	38
	Histogramas de Frecuencias (Escenario 1)	38
	Rosas de Oleaje (Escenario 1)	39
	Función de Densidad de Weibull (Escenario 1)	39
	Resultante Media Anual (Escenario 1)	40
5.2	Escenario 2: Temporal 2	43
	Histogramas de Frecuencias (Escenario 2)	43
	Rosas de Oleaje (Escenario 2)	44
	Función de Densidad de Weibull (Escenario 2)	44
	Resultante Media Anual (Escenario 2)	45
5.3	Escenario 3: Temporal 3	46
	Histogramas de Frecuencias (Escenario 3)	46
	Rosas de Oleaje (Escenario 3)	47
	Función de Densidad de Weibull (Escenario 3)	47
	Resultante Media Anual (Escenario 3)	48
5.4	Escenario 4: Semana sin temporales	49
	Histogramas de Frecuencias (Escenario 4)	49
	Rosas de Oleaje (Escenario 4)	49
	Función de Densidad de Weibull (Escenario 4)	50
	Resultante Media Anual (Escenario 4)	51
5.5	Comparativa de Resultados	51
6	Conclusiones	53
6.1	Clima Marítimo	53
6.2	Modelo Numérico	53
6.3	Análisis de Escenarios	54
6.4	Propuestas de Actuación	54
	Apéndices	56
	Apéndice A Red de Datos de Puertos del Estado	59
A.1	Red de Datos REDEXT	59
A.2	Red de Datos REDMAR	60
	Obtención de Datos	60
A.3	Red de datos SIMAR	61
	Subconjunto SIMAR-44	61
	Subconjunto WANA	61
	Apéndice B Módulo WAVE	63
B.1	Contexto físico: Ecuaciones WAVE/SWAN	63
B.1.1	Transferencia de energía al oleaje debida al viento	63
B.1.2	Interacciones no lineales entre olas	64
	Interacciones entres cuádrupletes	64
	Interacciones triádicas	65
B.1.3	Disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping	65
B.1.4	Disipación debida a la rotura por disminución de profundidad	66

B.1.5	Disipacion de energia por friccion con el fondo	67
B.2	Parámetros del Modelo	68
B.2.1	Description	68
B.2.2	Hydrodynamics	68
B.2.3	Grids	68
	Computational Grid	68
	Bathymetry	68
	Spectral resolution	68
	Nesting	68
	Hydrodynamics	68
B.2.4	Time Frame	68
B.2.5	Boundaries	69
B.2.6	Obstacles	69
B.2.7	Physical Parameters	69
	Constantes	69
	Processes	69
	Various	69
B.2.8	Numerical Parameters	70
B.2.9	Output Curves	70
B.2.10	Output Parameters	70
B.2.11	Additional Parameters	70
Apéndice C Códigos de MatLab empleados		71
<i>Índice de Figuras</i>		89
<i>Índice de Códigos</i>		91
<i>Bibliografía</i>		93

1 Introducción

En su tramo final, el río Ebro forma el segundo delta más grande del Mediterráneo occidental, con una superficie emergida de alrededor de 320 km², y altitudes que bordean el nivel del mar (Fundación Aequae, 2017). Generalmente hablando, el delta del Ebro tiene la forma de un triángulo, con una costa suave y plana, formada por arena fina y una red de drenaje definida por un solo canal principal. En cuanto a la sedimentología, el delta del Ebro, se considera que está condicionado por el movimiento de las olas. Sus características geológicas y geomorfológicas distintivas y la diversidad de procesos dinámicos lo convierte en un lugar único: es la segunda zona húmeda más grande del Mediterráneo occidental, así como el entorno natural con mayor relevancia de la costa catalana (Proyecto para la adaptación y la mitigación de los efectos del cambio climático en el Delta del Ebro, Oficina Catalana del cambio climático, 2018). Un claro ejemplo de la importancia de dicha zona húmeda es la existencia de una gran biodiversidad de flora y fauna, como puede observarse en la Figura 1.1.



Figura 1.1 Flamencos en las marismas del delta (Fotógrafo: Mariano Cebolla).

1.1 Motivación

El cambio climático, un efecto inevitable del calentamiento global, se ha convertido en una preocupación mundial debido a sus posibles consecuencias en diversos sistemas y sectores y debido a su amenaza para el bienestar humano (IPCC 2001). Comprender el cambio climático es crucial para la planificación adecuada de las medidas de adaptación para hacer frente a los riesgos futuros. Sin embargo, el calentamiento global es un proceso lento y requiere proyecciones climáticas futuras a largo plazo para detectar claramente los patrones de cambio climático venideros (IPCC 2007) y el impacto de estos en ciertos sectores dentro de un área específica.

En el ámbito de estudio del Delta del Ebro, los efectos son claros. Por un lado, la acción agresiva del oleaje con tendencia al desplazamiento mar adentro de las partículas, y por otro, la disminución de la sedimentación

proveniente del río por la construcción de numerosos embalses aguas arriba están reduciendo la superficie del delta año tras año. La cantidad de sedimento que llega al Delta del Ebro se ha reducido de manera drástica durante el último siglo, representando hoy menos de un 1% del caudal sólido previo a la construcción de los grandes embalses en la cuenca (Restauración del Delta del Ebro, Tesis de ICCP de Victor Molinet Coll en la UPC de Barcelona, 2006). El agua salada y los temporales destruyen aceleradamente la desembocadura, y esto está afectando a la biodiversidad allí existente, así como a la principal economía del delta: las plantaciones de arroz.

El 60% de la superficie del delta cuenta con una cota inferior a un metro de altura, y sólo un 10% supera los dos metros. Las poblaciones cercanas han tenido que actuar para redefinir las zonas con riesgo de inundación y elevar la cota de construcción existente actualmente (El cambio climático acabará disolviendo el delta del Ebro si no recibe una transfusión masiva de arena'- Artículo para El Diario. Autor: Raúl Rejón, 2018).

A lo largo de los años, se han desarrollado modelos para simular futuras proyecciones climáticas. Estos modelos se basan en leyes físicas representadas por ecuaciones matemáticas muy complejas, e imposibles de resolver de manera analítica. Es por esto, que se resuelven de manera aproximada mediante métodos numéricos. Sin embargo, estos modelos deben adecuarse a su zona de implementación: se necesitan proyecciones regionales de clima en alta resolución basadas en diversas técnicas para abordar los requisitos de escala en la evaluación del impacto del cambio climático (Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica, Revista de Cuaternario y Geomorfología. Autores: J.M. Gutiérrez M.R. Pons, 2006).

1.2 Zona de Estudio

El área de estudio se encuentra en la costa catalana, dentro de las comarcas de Montsià y Baix Ebre (Figura 1.2). En la provincia de Tarragona, a unos 58 kilómetros al sur de la capital de provincia, el Río Ebro desemboca en el Mar Mediterráneo, formando uno de los mayores deltas de Europa. Dicho río, de 910 kilómetros de longitud y $650 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal medio (Sistema de Aforos de la CH Ebro), es poseedor del título del más caudaloso a nivel medio anual de todo el país, así como uno de los afluentes más importantes del Mediterráneo occidental (Confederación Hidrográfica del Ebro).

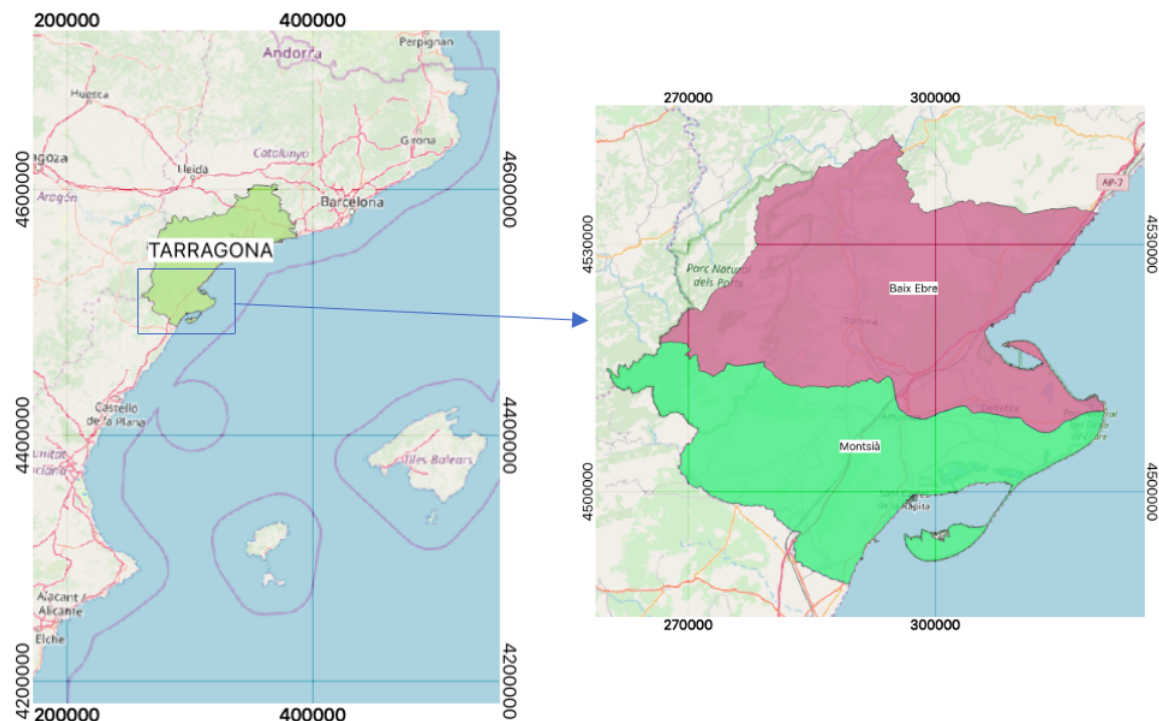


Figura 1.2 Localización de la zona de Estudio dentro de la costa levantina. Las coordenadas se encuentran representadas en el SRC UTM-HUSO 31. Figura creada en QGIS mediante el procesamiento de datos vectoriales del Instituto Cartográfico de Cataluña.

En la Figura 1.3 se pueden apreciar los municipios que conforman la región del Delta del Ebro: principalmente Deltebre, Sant Jaume d'Enveja, Amposta y Sant Carles de la Ràpita.

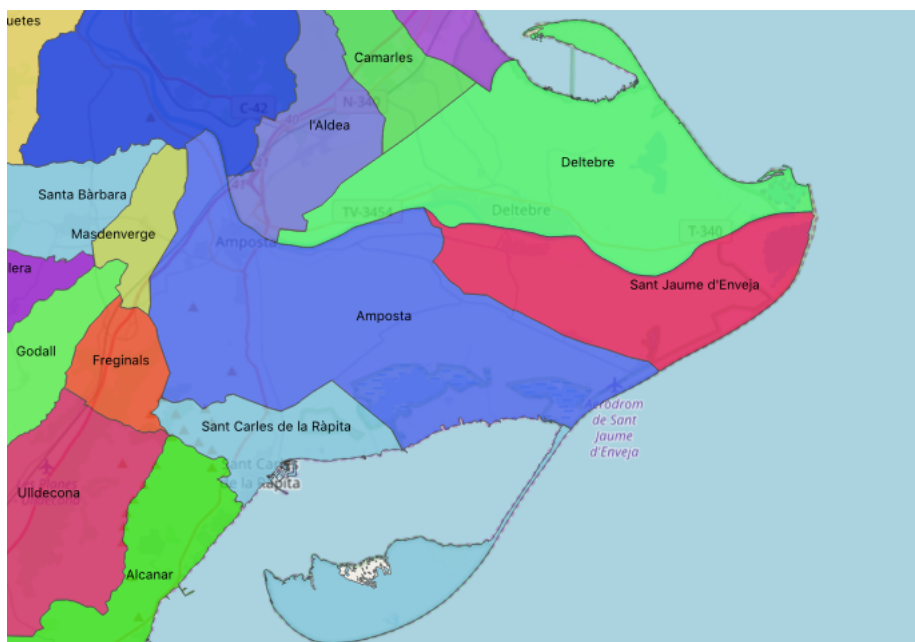


Figura 1.3 Municipios del sur de la provincia de Tarragona.

1.2.1 Eustatismo

La variación global en el nivel del mar respecto a los continentes, también llamado eustatismo, es impulsada por diferentes procesos que causan cambios en el volumen o la masa del océano y dan como resultado variaciones medias globales del nivel del mar.

Los cambios en la masa del océano se producen como consecuencia del derretimiento o la acumulación de capas de hielo continental a lo largo del tiempo y como consecuencia de la redistribución del agua entre diferentes depósitos hidrológicos (nieve, agua superficial y almacenamiento de agua subterránea) (Figura 1.4).

Los cambios en el volumen, en cambio, son causados por variaciones en la densidad del agua del océano como resultado del enfriamiento o calentamiento de las masas de agua (expansión térmica), o cambios en su salinidad (Eustatic and Relative Sea Level Changes, 2016).

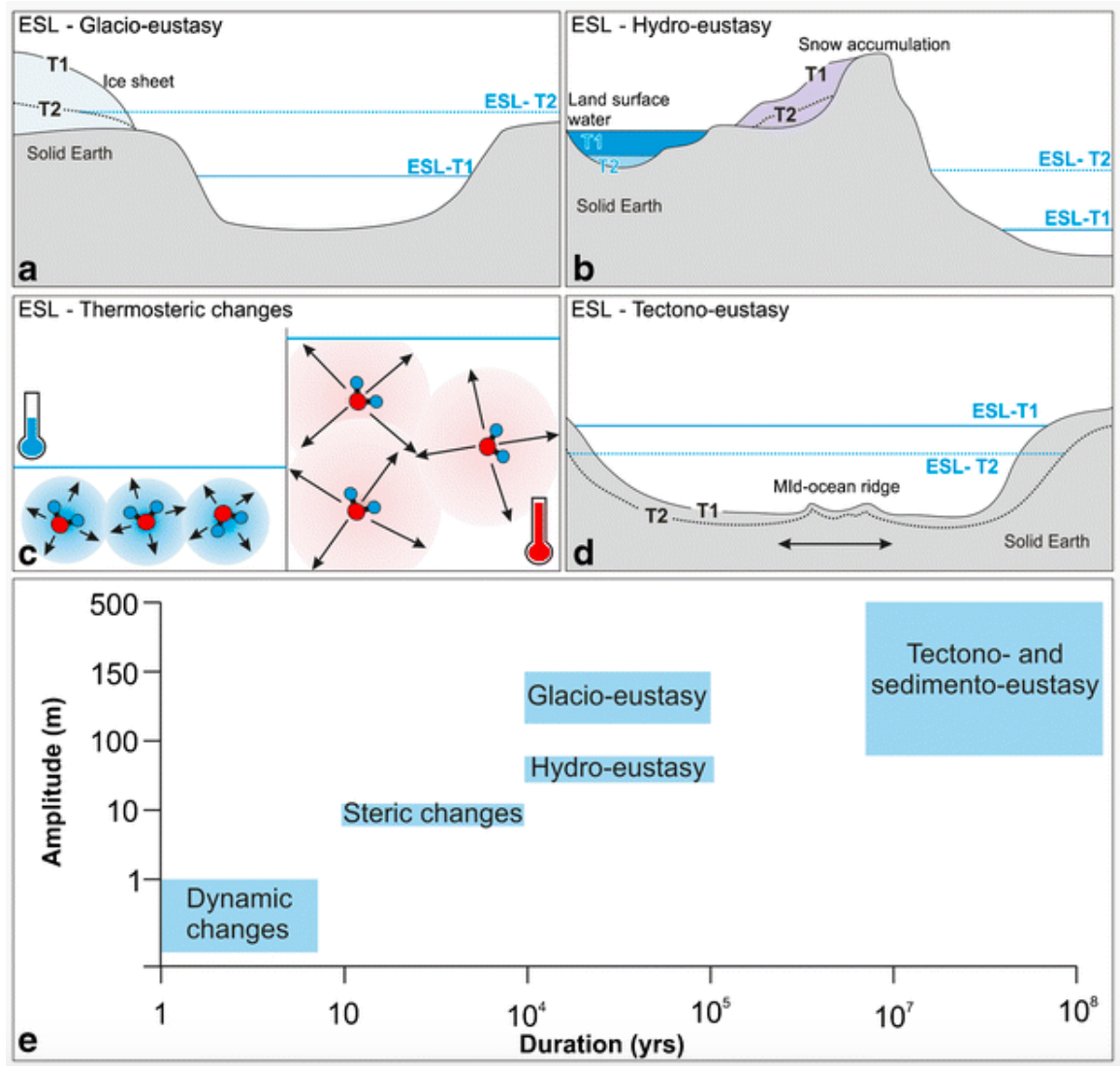


Figura 1.4 Factores que afectan al eustatismo.

- Deshielo de glaciares (Figura 1.4 a).
- Acumulación de la nieve y otras formas de agua superficial (Figura 1.4 b).
- Cambio de volumen asociado a la temperatura de la molécula de agua (Figura 1.4 c).
- Posibles movimientos de la corteza oceánica que hagan cambiar su forma, y por tanto, el volumen disponible de almacenamiento de agua (Figura 1.4 d).
- Comparativa de dichos procesos en cuanto a duración y amplitud de la variación del nivel del mar (Figura 1.4 e).

En la Figura 1.5 se puede observar la variación del nivel del mar en a partir de la última glaciación.

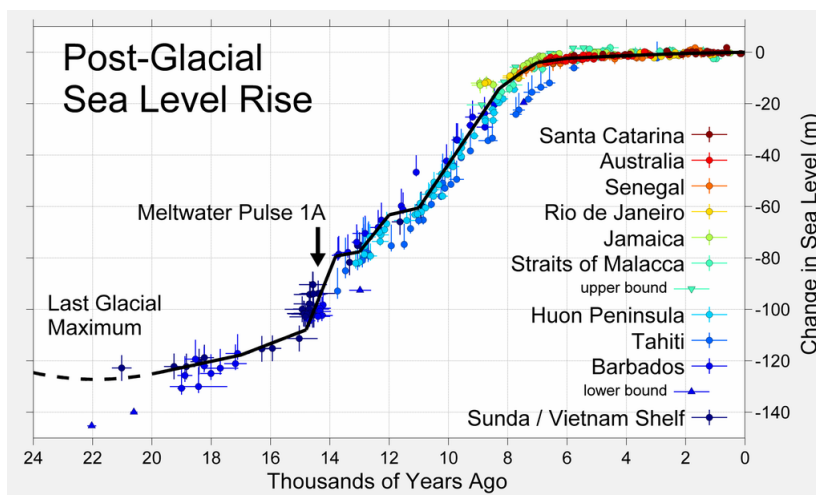


Figura 1.5 Cambios en el nivel del mar desde el fin del último episodio glaciar (Robert A. Rohde / Global Warming Art).

1.2.2 Evolución Histórica de la Zona

El origen del delta del Ebro se remonta hasta hace más de 4000 años, cuando se produjo el último ascenso eustático (Figura 1.6).

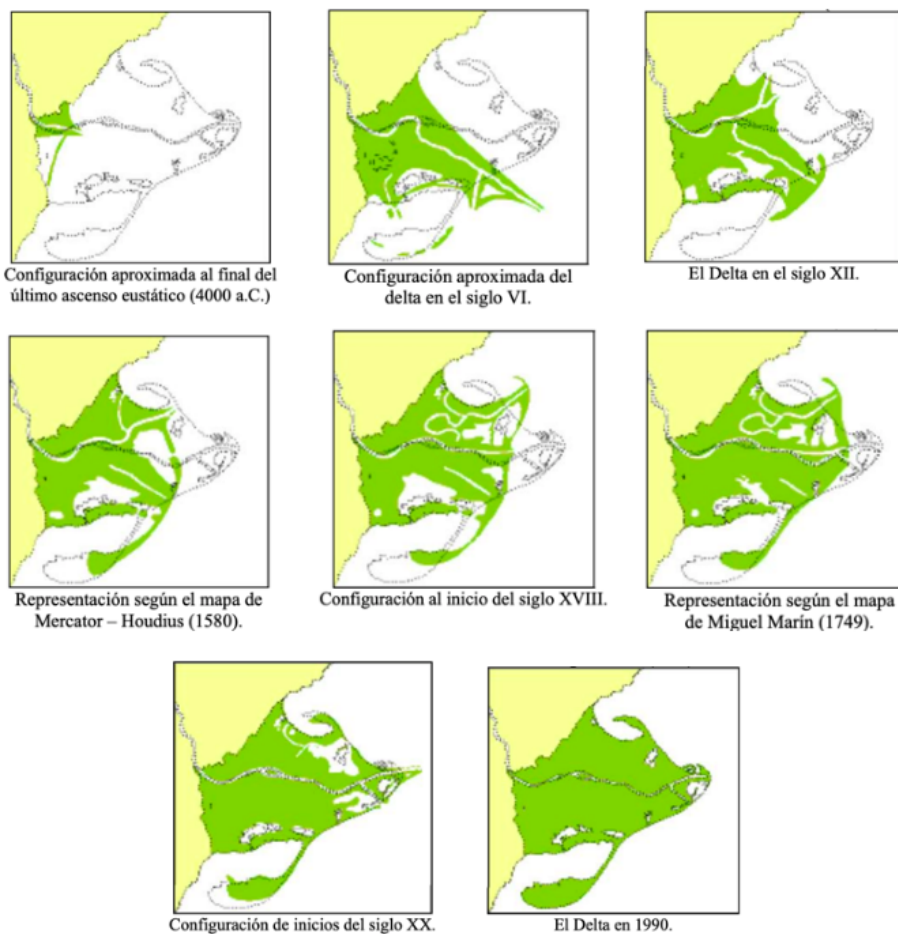


Figura 1.6 Evolución del delta del Ebro.(Dibujos adaptados de Canicio e Ibáñez, 1999).

La apertura de la cuenca terciaria del Ebro corresponde a una era hace unos 5,3 millones de años. Las primeras evidencias geológicas corresponden a la presencia de los primeros conglomerados poligénicos de origen fluvial en el tramo inferior del valle del Ebro y la finalización de la sedimentación evaporítica en la cuenca terciaria del Ebro. Los sedimentos correspondientes al plioceno medio y superior (aproximadamente de unos 3,5 millones de años) ponen de manifiesto una primera progresión costera ligada al río Ebro. El delta debía tener una extensión igual o superior a la actual, tal como muestran las secuencias estratigráficas obtenidas a partir de los sondeos cercanos a la costa del delta (información publicada por el Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Cataluña).

La hipótesis más aceptada para explicar el desarrollo de la actual delta durante el Holoceno superior partía de una situación inicial con una costa de tipo estuario, como producto de la inundación en el último ascenso eustático del mar.

A partir del último milenio, los datos cartográficos son más abundantes y permiten una reconstrucción mucho más cuidada. El primer mapa que cubre esta área se publicó en 1580 (Atlas de Mercator-Hondius) y muestra claramente el importante desarrollo del lóbulo septentrional (Arroyo de la Saida). El abandono del lóbulo meridional tuvo como consecuencia directa el retroceso de la línea litoral de este lóbulo, así como también la formación de la punta del Cuerno y la barra del Trabucador, proceso que se prolongó durante los siglos posteriores.

Hacia el año 1700, tuvo lugar un nuevo cambio de desembocadura cerca de la actual población de la Cava. Los mapas de los siglos XVIII-XIX muestran la rápida progresión del lóbulo central, la génesis de la punta del Fangar (producto del abandono y la erosión del lóbulo septentrional) y la remodelación de la punta del Cuerno.

Finalmente, durante los siglos XX - XXI se ha producido una relativa estabilización de la morfología deltaica, causada en buena parte por las modificaciones hidrológicas realizadas por el hombre en la cuenca. El desarrollo del delta del Ebro durante el último siglo está determinado por dos hechos: la apertura en 1937 de una nueva desembocadura (garganta de Sorrapa) y el incremento del número de embalses en la cuenca del Ebro. Durante el siglo XX se han construido unos 200 embalses en toda la cuenca del Ebro, lo que ha provocado la retención de aproximadamente el 99,9% de la descarga sólida que llevaba el río a finales del siglo XIX (Victor Molinet Coll, Tesina UPC 2006).

En la Figura 1.7 se puede observar una estimación acerca de la posición de la línea de costa de la zona de delta cercana a la desembocadura. Mediante estudios sedimentológicos se puede determinar la tendencia de movimiento de las partículas, y los posibles cambios en la línea de costa en unos 100 años vista. La curva C corresponde a una hipótesis que incluye el posible ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático.

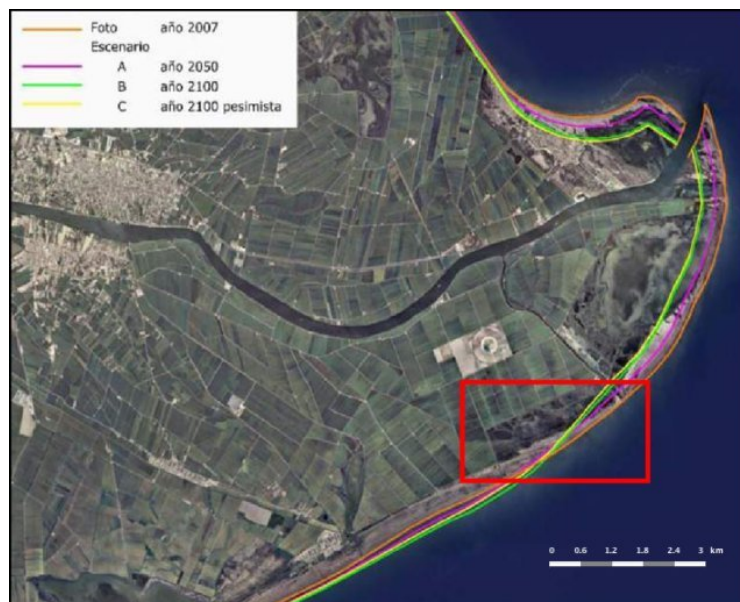


Figura 1.7 Evolución prevista de la línea de costa del delta del Ebro (DMAH, 2008).

1.2.3 Hidrogeomorfología

A lo largo de la historia, el Delta ha sufrido cambios geomorfológicos muy significativos. Hay una amplia variedad de evidencias geológicas, radiométricas, paleontológicas y sedimentológicas (Cearreta et al., 2016) que muestran la formación de la planicie deltaica del Ebro iniciada a principios de Holoceno, hace unos 8,000 años, como el resto de áreas deltaicas del planeta (Stanley y Warne, 1997).

Se distinguen tres unidades fisiográficas fundamentales en el Delta: la llanura deltaica, un ambiente de transición, y por último, el ambiente marino. La topografía es relativamente plana: aproximadamente el 10% de su superficie tiene una altitud de más de 2 m, el 30% tiene una altitud de entre 1 m y 2 m, y el 60% restante tiene una altitud inferior a 1 m (‘El cambio climático acabará disolviendo el delta del Ebro si no recibe una transfusión masiva de arena’ - Artículo para El Diario. Autor: Raúl Rejón, 2018).

El Delta del Ebro, como todas las áreas deltaicas del planeta, constituye un sistema geológico que está en permanente evolución, fruto de la actividad de los procesos de erosión, transporte y sedimentación de materiales en toda la cuenca de drenaje; corrientes costeras y marinas; variación del nivel del mar y dinámica de la litosfera.

Desde un punto de vista hidrogeológico, el Delta del Ebro, como todas las áreas deltaicas del planeta, constituye un sistema geológico que está en permanente evolución, fruto de la actividad de los procesos de erosión, transporte y sedimentación de materiales en toda la cuenca de drenaje. Está compuesto esencialmente de limo y arcilla del Cuaternario y Plioceno. El lecho se encuentra claramente afectado por accidentes tectónicos (fallas), responsables del relieve del macizo de Montsià y los puertos de montaña de Tortosa.

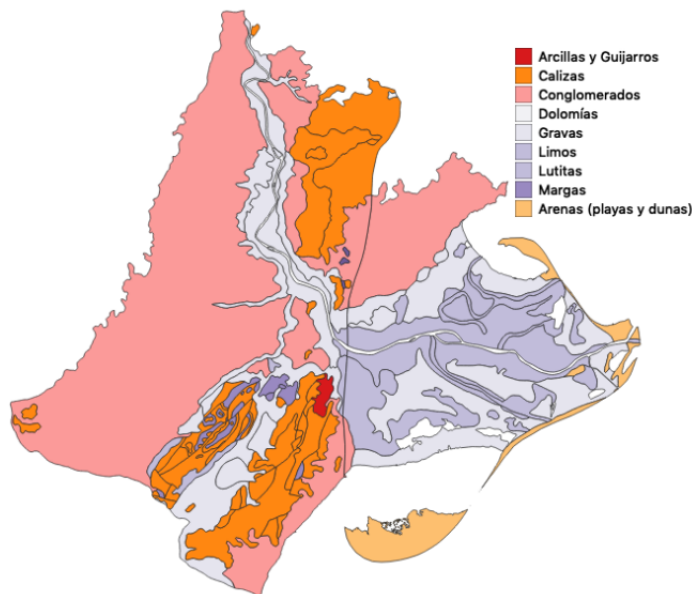


Figura 1.8 Mapa litológico del delta del Ebro. (Fuente: Figura creada en QGIS mediante el procesamiento de datos vectoriales del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña).

En general, los niveles más permeables se pueden identificar por algunas capas arenosas superficiales con un espesor máximo de 10 metros (acuífero superior) y otra capa de grava y arena con un grosor de entre 10 y 25 m (acuífero profundo) separado por una capa limosa que actúa parcialmente como un acuitardo, confinando esta última. La disposición de cada una de estas capas se encuentran representadas en la Figura 1.8. El desarrollo de estas formaciones está condicionado por el bajo gradiente hidráulico (dada la pendiente prácticamente inexistente), que conduce a una alta salinización en prácticamente toda el agua subterránea. En este sentido, el agua subterránea apenas se utiliza.

1.2.4 Economía de la zona

Gracias a los datos proporcionados por el SIGA (Sistema de Información Geográfica de datos Agrarios) del Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España, se ha elaborado la Tabla 1.1, que nos indica qué porcentaje de la superficie total de cada municipio es utilizado para plantaciones de arroz, la actividad

principal del Delta.

Tabla 1.1 Arrozales en los municipios del Delta del Ebro..

Municipio	Arrozal [Ha]	Superficie Total [Ha]	% Dedicado al arroz
Deltebre	7727.54	9955.47	77.62
Sant Jaume d'Enveja	4284.97	6088.38	70.38
Amposta	7588.73	13605.25	55.78
Sant Carles de la Ràpita	843.00	4836.27	17.43
L'Aldea	521.31	3027.99	17.22

1.2.5 Parque Natural del Delta del Ebro

En el Delta se desarrollan numerosas actividades económicas industriales y comerciales. Pero además, su categoría de gran humedal, así como su enorme biodiversidad y riqueza natural le otorgó el 4 de agosto de 1983 la categoría de Parque Natural (Figura 1.9) que aún conserva, formando parte de la Red Natura 2000.

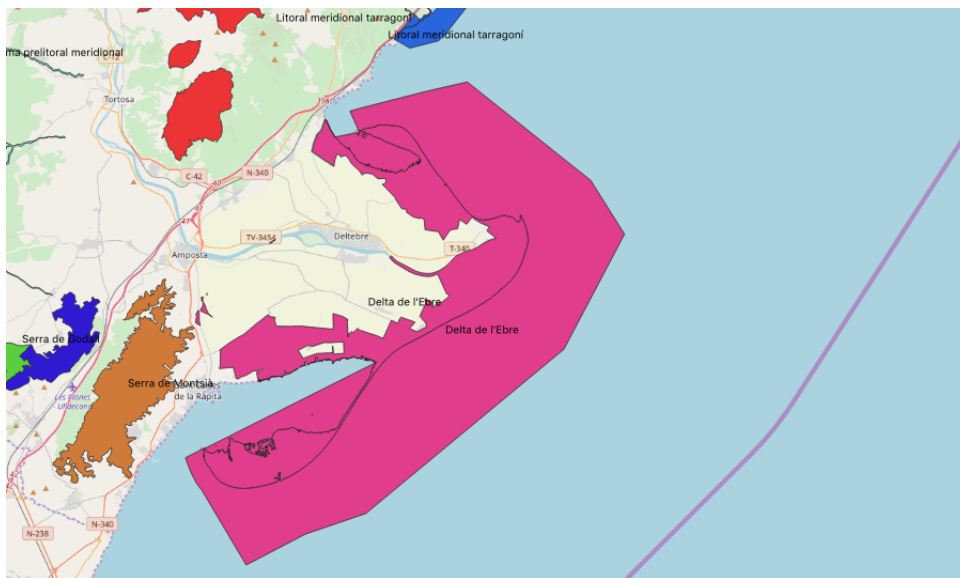


Figura 1.9 En Rosa, el Parque Natural del Delta del Ebro.

Los extensos arrozales dominan la fisonomía del Delta. En la zona litoral encontramos paisajes formados por grandes lagunas rodeadas por cañaverales y juncales. En la parte periférica, grandes extensiones de suelos salinos con salobrales y las largas y desiertas playas, con dunas coronadas de borrrón y otras plantas muy adaptadas al medio. En los dos extremos, dos flechas de arena fina: El Fangar y la punta de La Banya.

La biodiversidad es muy amplia: desde aves, mamíferos, invertebrados, y varias especies de flora endémicas de dicha zona. Una movilización popular que tuvo lugar en Deltebre hizo eco de la importancia de la conservación de este espacio natural, y una serie de intensas negociaciones entre el Ayuntamiento de Deltebre y la Generalitat de Catalunya desembocó en la proclamación de dicha zona como protegida en el Decreto 332/1986.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

El objetivo generales de este trabajo es el de estudiar la evolución morfodinámica del Delta del Ebro, así como la influencia del cambio climático en dicha evolución.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Análisis de la situación actual en el Delta del Ebro
- Estudio del clima marítimo
- Creación de un modelo hidrodinámico que describa la zona de estudio, con su correspondiente calibración y validación que evidencie la exactitud de dicho modelo.
- Estudio del régimen medio y de una serie de temporales obtenidos de mediciones históricas.
- Análisis de los resultados obtenidos al simular los distintos escenarios.
- Redacción de conclusiones y recomendaciones.

2 Metodología

2.1 Clima Marítimo

Los datos de partida han sido obtenidos de Puertos del Estado (www.puertos.es), ente público empresarial dependiente del Ministerio de Fomento de España. Su función principal es la de la organización portuaria, así como del cumplimiento de la legalidad vigente y el control de la eficiencia del sistema en cada uno de los 46 puertos de nuestro país.

Los datos utilizados son los siguientes:

1. Punto SIMAR 711015017
2. Punto SIMAR 2095129
3. Boya de Tarragona
4. Mareógrafo de Tarragona

Para el modelo se ha utilizado el conjunto de datos SIMAR, formado por series temporales de parámetros atmosféricos y oceanográficos procedentes de modelado numérico. Los parámetros disponibles son los siguientes, todos medidos con frecuencia horaria (Proyecto HIPOCAS, 2010):

- Viento: Los datos de viento se han obtenido mediante el modelo atmosférico regional REMO, que incluye velocidad y dirección media de procedencia.
- Nivel del mar: mediante el modelo HAMSOM se ha simulado la componente del nivel del mar debida a la acción de la presión y el viento. Esto se conoce como componente atmosférica del nivel del mar. Los puntos SIMAR cuentan únicamente con este dato.
- Oleaje: Se ha utilizado el modelo numérico WAM, un modelo espectral que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Aunque considera los fenómenos de asomeramiento y refracción, deben interpretarse siempre dichos datos como para aguas abiertas y profundidades indefinidas.

En el análisis del clima marítimo se estudian para el oleaje:

- Descripción general en profundidades indefinidas
- Régimen medio
- Régimen extremal

2.1.1 Análisis en Profundidades Indefinidas

Se han representado las series temporales de los datos de altura de ola significativa con respecto al tiempo desde la fecha en la que se empiezan a tener datos: 2012-2019.

Para el oleaje se han obtenido los histogramas de frecuencias altimétricas para la altura de ola significativa, el período pico y la dirección media de procedencia, así como sus respectivos gráficos de dispersión. Finalmente, se ha elaborado una rosa de oleaje.

Para el estudio de viento, se han obtenido datos de dirección de procedencia y velocidad y se han representado de la misma manera que para el oleaje.

Con esto se tendrá toda la información proporcionada por los datos de entrada disponibles de Puertos del Estado de manera gráfica e intuitiva.

2.1.2 Análisis en Régimen Medio

Se puede definir como régimen medio de una serie temporal al conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar.

Si representáramos los datos en forma de histograma no acumulado, el régimen medio vendría definido por aquella banda de datos en la que se contiene la masa de probabilidad que hay entorno al máximo del histograma.

El régimen medio se describe, habitualmente, mediante una distribución teórica que ajusta dicha zona media o central del histograma. Es decir, no todos los datos participan en el proceso de estimación de los parámetros de la distribución teórica, solo lo hacen aquellos datos cuyos valores de presentación caen en la zona media del histograma (Puertos del Estado, 2016).

El análisis del régimen medio incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad probabilística de tipo Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull

Con estas funciones se busca conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola y velocidad del viento, así como su probabilidad de no excedencia.

2.1.3 Análisis en Régimen Extremal

Un régimen extremal de oleaje es un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo.

Se entiende por temporal aquella situación durante la cual la altura de oleaje supera un cierto umbral, se ha fijado en 3 metros en este caso, ya que es el valor que se da en menos de un 1 por ciento del tiempo.

Para el análisis en régimen extremal, es necesario extraer los datos de la boya que correspondan a períodos de tormenta mediante el método del POT (Peak Over Threshold). Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se supondrá que debe existir un mínimo de 48 horas entre dos temporales consecutivos.

Se han seleccionado los tres mayores temporales de los seis que cumplían con la premisa anterior, para los cuales se ajustarán los datos a una función de densidad probabilística de tipo Gumbel, así como a una función de distribución de Gumbel.

2.2 Escenarios

Se analizarán los escenarios correspondiente a cada temporal, y uno adicional en un período de calma para comparar ambos resultados.

2.3 Modelo Numérico

EL modelo numérico empleado es Delft3D creado por Deltares en colaboración con la TU Delft. Se trata de una framework que integra varios modelos para la simulación de flujo de agua, transporte de sedimentos, oleaje, calidad del agua, morfología y ecología aplicable al análisis de costas, ríos, lagos y estuarios (Delft3D Open Source Community, 2015). Desde 2011 se trata de un software libre de código abierto, razón de peso por la cual se ha utilizado para este trabajo.

Delft3D ha sido desarrollado de manera modular con múltiples escenarios de aplicación, pero que comparten interfaz común además de permitir que compartan información entre ellos. El módulo que se utilizará en este proyecto es WAVE: simulador de propagación del oleaje mediante una descripción espectral.

Una primera fase de calibración y validación del modelo, seguido de una segunda de simulación de los distintos escenarios son las que compondrán el estudio.

2.3.1 Calibración del modelo

Se utilizará el Coeficiente de Collins como parámetro a calibrar. Este coeficiente evalúa la fricción en el fondo, y partiendo de un orden de magnitud de 1/1000 aproximadamente, se buscará la calibración del modelo mediante el método iterativo que consta de los siguientes pasos:

- Realización de una primera simulación del escenario sin temporales partiendo de los datos proporcionados por la boyá. En este caso se obtienen los datos de altura significativa de ola, período pico y dirección del oleaje en todos los puntos del dominio
- Se escogen los resultados correspondientes a la posición en la que se encuentra el punto SIMAR que se ha estudiado.
- Comparando ambos valores mediante los coeficientes de correlación R y Skill se decidirán si los resultados son aceptables o no.
- Si la simulación mejora respecto a la anterior, se vuelve a modificar el parámetro para ajustarlo más.
- Cuando deje de mejorar, significa que se ha llegado al valor correcto

La ecuación utilizada para obtener el coeficiente de correlación R dadas dos series de valores X (valor obtenido en la simulación) e Y (valor obtenido en el SIMAR de referencia) es la siguiente:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_i - \bar{X}_i) (Y_i - \bar{Y}_i)}{\sigma_Y \sigma_X} \quad (2.1)$$

Este coeficiente refleja la similitud de la tendencia de ambas gráficas de altura de ola, es decir, que ambas poseen un crecimiento similar. El término σ_i indica la desviación típica de los datos. El valor de R puede variar de -1 a 1, siendo mejor el ajuste cuanto más próximo se encuentre R a dichos valores extremos.

El coeficiente de Skill refleja si la gráfica de altura de ola obtenida a raíz de la simulación es consistente con aquella obtenida con los datos de Puertos del Estado. Si los picos se alcanzan correctamente, el valor del coeficiente Skill será bueno: más próximo a 1. Si no se alcanza, estará próximo a 0. La ecuación utilizada es la propuesta por Wilmott (Statistics for the Evaluation and Comparison of Models, 1985):

$$S = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |Y_i - X_i|^2}{\sum_{n=1}^N (|Y_i - \bar{X}_i|^2 + |X_i - \bar{X}_i|^2)} \quad (2.2)$$

2.3.2 Validación del modelo

Se simulará un período de temporal y se comprobará que efectivamente se llega a un buen ajuste con el coeficiente de Collins obtenido en el proceso anterior.

2.4 Análisis de Resultados

Habiendo definido los distintos escenarios anteriormente, se calculará para cada uno de ellos en cada uno de los puntos de estudio que rodean el delta:

- Los histogramas de frecuencias altimétricas de altura de ola.
- Las rosas de oleaje.
- Las funciones de densidad de Weibull
- La resultante media anual

Para el análisis de temporales, se obtendrán los coeficientes de propagación en cada punto. Se analizará su variación a lo largo de cada temporal.

3 Estudio de Clima Marítimo

El Delta del Ebro cuenta con multitud de fuentes de información, las cuales nos dan datos de clima marítimo como pueden ser oleaje y viento. Los cálculos necesarios para el estudio de clima marítimo se han obtenido gracias al fichero *MatLab* representado en el apéndice *Código C.2 - Clima Marítimo*. Los siguientes datos, pertenecientes a Puertos del Estado, han sido los utilizados en dicho estudio:

- Punto WANA SIMAR 711015017: 41° 4' 12" N, 1° 11' 31.2" E. Profundidad Indefinida.
- Punto WANA SIMAR 2095129: 40.75° N, 0.92° E. Profundidad Indefinida.
- Boya de Tarragona: situada en la posición 40° 41' 11.82" N, 1° 27' 57.06"E.
- Mareógrafo de Tarragona: que se encuentra en la latitud 41° 04' 44.29"N y la longitud 1° 12' 47.70"E

En la Figura 3.1 aparecen representadas las localizaciones de estos puntos en referencia a la zona de estudio:



Figura 3.1 Localización de los puntos SIMAR, la Boya y el Mareógrafo de Tarragona.

3.1 Descripción y estudio del oleaje

3.1.1 Estudio en Profundidades Indefinidas

La consideración del oleaje en profundidades indefinidas como un proceso estocástico, y su descripción estadística se utiliza principalmente para estudios de predicción del oleaje. La predicción del oleaje requiere el conocimiento de las funciones de distribución de probabilidad de las variables consideradas, así como del ajuste de los parámetros de dichas funciones.

Los datos disponibles comprenden series temporales de oleaje desde 2012 hasta 2019. En la Figura 3.2 se encuentra representada la altura significativa de la ola en todo el intervalo temporal conocido por el punto SIMAR 711015017:

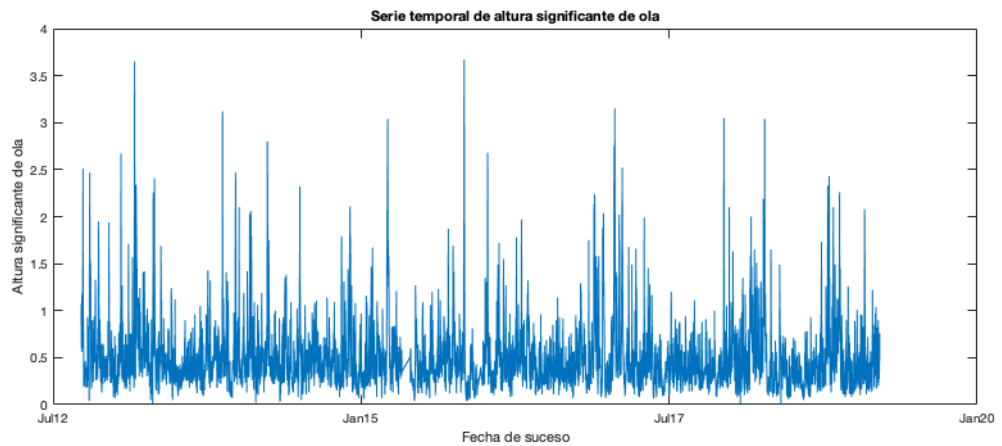


Figura 3.2 Serie temporal.

Altura de Ola Significante

La altura significativa de ola (H_s), es uno de los parámetros más representativos del oleaje. La altura significativa representa la altura de las olas que un observador experimentado apreciaría a simple vista en el punto de medida (no desde la costa), que equivale aproximadamente la altura media del tercio de olas más altas (Puertos del Estado, 2014).

Se ha elaborado un histograma de frecuencias de alturas de ola en el período de estudio y se ha representado gráficamente en la Figura 3.3, así como numéricamente en la Tabla 3.1. El rango de alturas de ola en este estudio es de 0 a 4 metros, y las situadas en el intervalo de 0 a 0.6 como las más frecuentes.

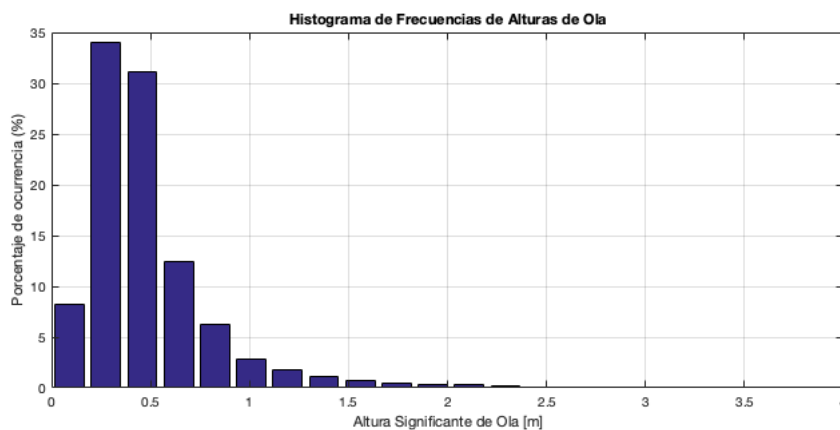


Figura 3.3 Histograma de Frecuencias de la Altura Significante de Ola.

Tabla 3.1 Frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa, en el intervalo de altura que comprende el de estudio y el anterior.

Hs [m]	0.092	0.275	0.459	0.642	0.826	1.009	1.193	1.376	1.560	1.743
Frecuencia [%]	8.238	34.031	31.057	12.369	6.218	2.827	1.775	1.088	0.737	0.461
Hs [m]	1.927	2.110	2.294	2.477	2.661	2.844	3.028	3.211	3.395	3.578
Frecuencia [%]	0.387	0.268	0.198	0.114	0.097	0.072	0.029	0.009	0.007	0.018

Además, en la Figura 3.4 se representa un gráfico de dispersión que relaciona dos variables de estudio: la altura significativa de ola y el período pico.

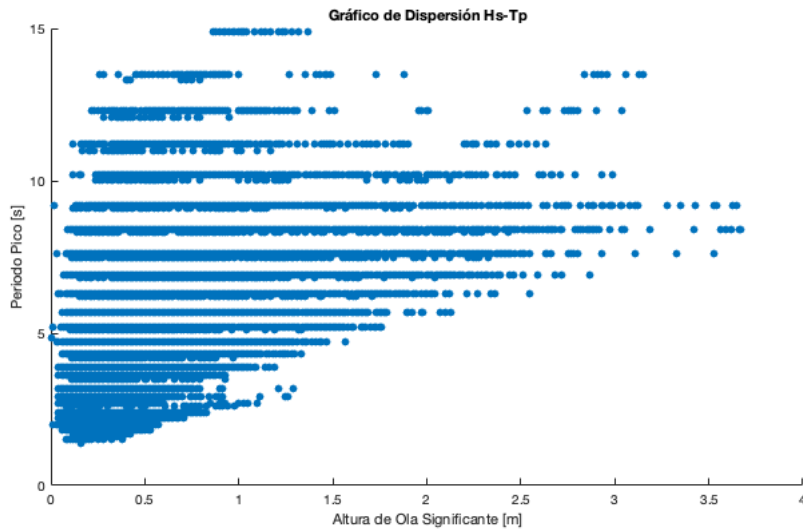


Figura 3.4 Gráfico de Dispersión entre la Altura Significante de Ola y el Período Pico.

Período Pico

Se trata del periodo del grupo de ondas con más energía, y se denota T_p . Cuanto más regular es el oleaje más se parece T_p a T_m (Período medio de todas las ondas que constituyen el oleaje), aunque normalmente T_p es mayor que T_m (Puertos del Estado, 2014).

En este caso, se ha representado el histograma de frecuencias del período pico del oleaje en la Figura 3.5, así como sus respectivos valores numéricos en la Tabla 3.2. A la vista de los resultados aquí representados, se obtienen unos períodos entre 0 y 15 segundos, con sus valores más frecuentes entre 2 y 6 segundos.

Por último, se incluye un gráfico de dispersión en la Figura 3.6 que relaciona las siguientes variables: período pico y dirección media de procedencia. En este caso, no se encuentra ninguna correlación entre ambas variables. El patrón de líneas verticales que siguen los puntos del gráfico es fruto de la única posición decimal con la que cuenta el período en su medida. Una variable discreta representada en un sistema cartesiano continuo propicia dicha disposición.

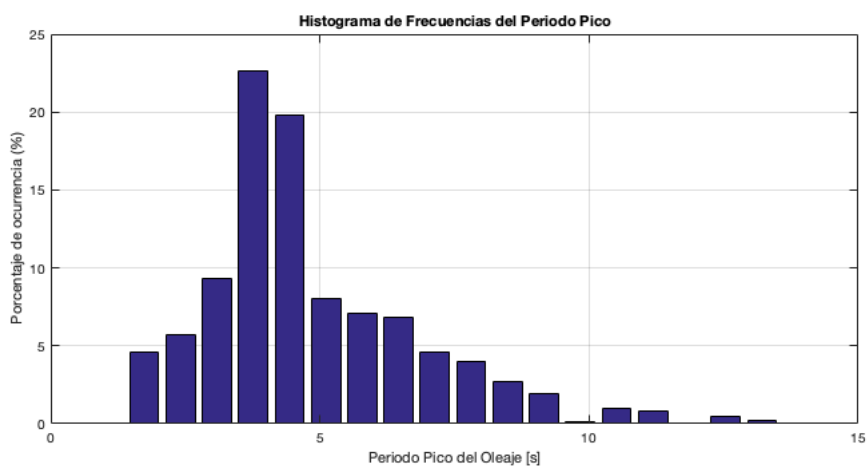
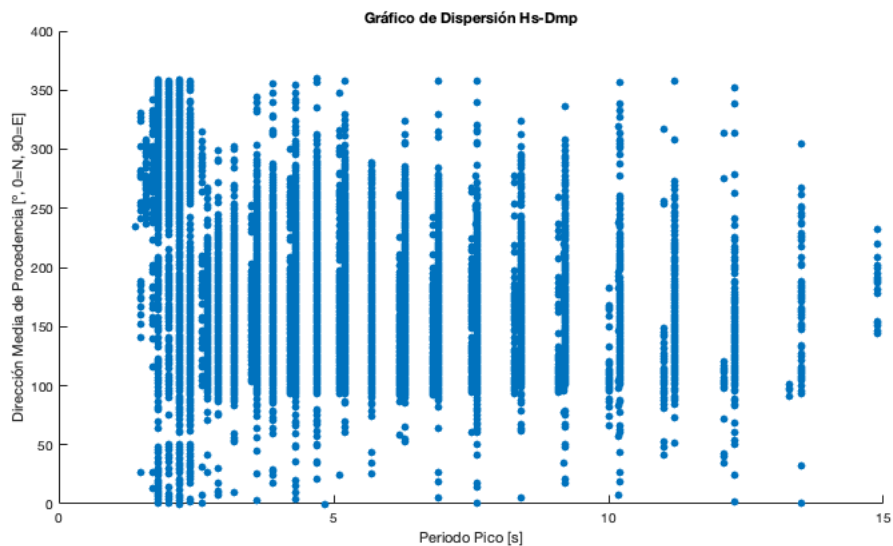


Figura 3.5 Histograma de Frecuencias del Período Pico.

Tabla 3.2 Frecuencias de ocurrencia del período pico, en el intervalo de duración que comprende el de estudio y el anterior.

Tp [s]	1.738	2.413	3.088	3.763	4.438	5.113	5.788	6.463	7.138	7.813
Frecuencia [%]	4.564	5.751	9.328	22.671	19.826	8.039	7.063	6.809	4.620	4.021
Tp [s]	8.488	9.163	9.838	10.513	11.188	11.863	12.538	13.213	13.888	14.563
Frecuencia [%]	2.721	1.906	0.135	0.995	0.809	0.047	0.474	0.178	0.000	0.043

**Figura 3.6** Gráfico de Dispersión entre el Período Pico y la Dirección Media de Procedencia.**Dirección Media de Procedencia**

Se trata de la dirección desde la cual las olas llegan al punto de medida.

La Figura 3.7 incluye el histograma de frecuencias de la dirección media de procedencia, así como sus respectivos valores numéricos en la Tabla 3.3. El oleaje procede de todas las direcciones, aunque los valores más frecuentes son los procedentes del cuarto de rosa que va del sureste al sur.

En la Figura 3.8 aparece un gráfico de dispersión que relaciona la altura significativa de ola y la dirección media de procedencia de las mismas. Es remarcable el hecho de que las mayores alturas de ola provienen de la dirección sureste y sur, las predominantes en la zona.

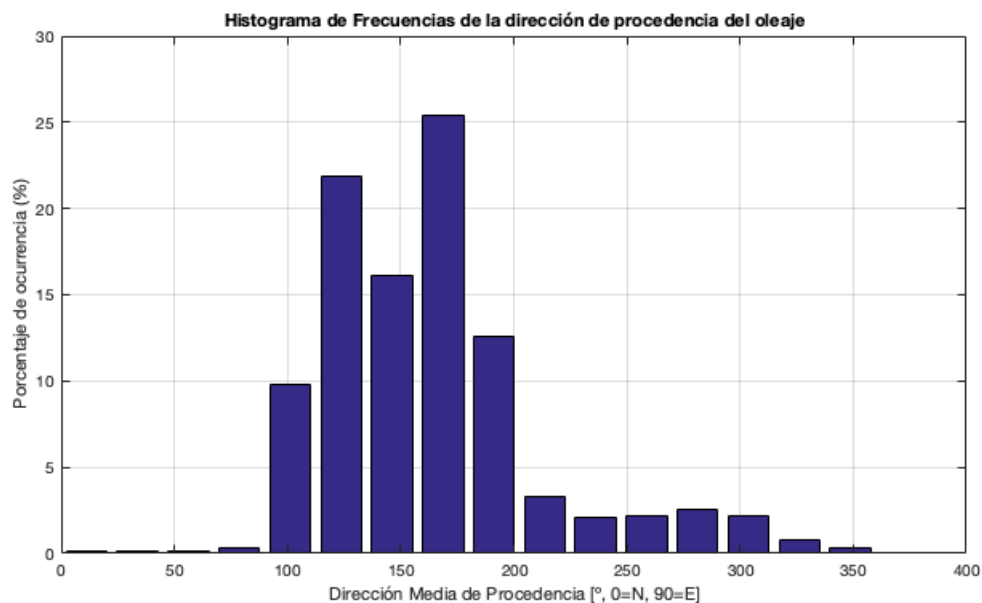


Figura 3.7 Histograma de Frecuencias de la Dirección Media de Procedencia.

Tabla 3.3 Frecuencias de ocurrencia de Direcciones Medias de Procedencia del Oleaje.

Procedencia	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
Frecuencia [%]	0.142	0.142	0.137	0.312	9.805	21.846	16.158	25.404
Procedencia	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Frecuencia [%]	12.589	3.337	2.090	2.198	2.567	2.189	0.780	0.303

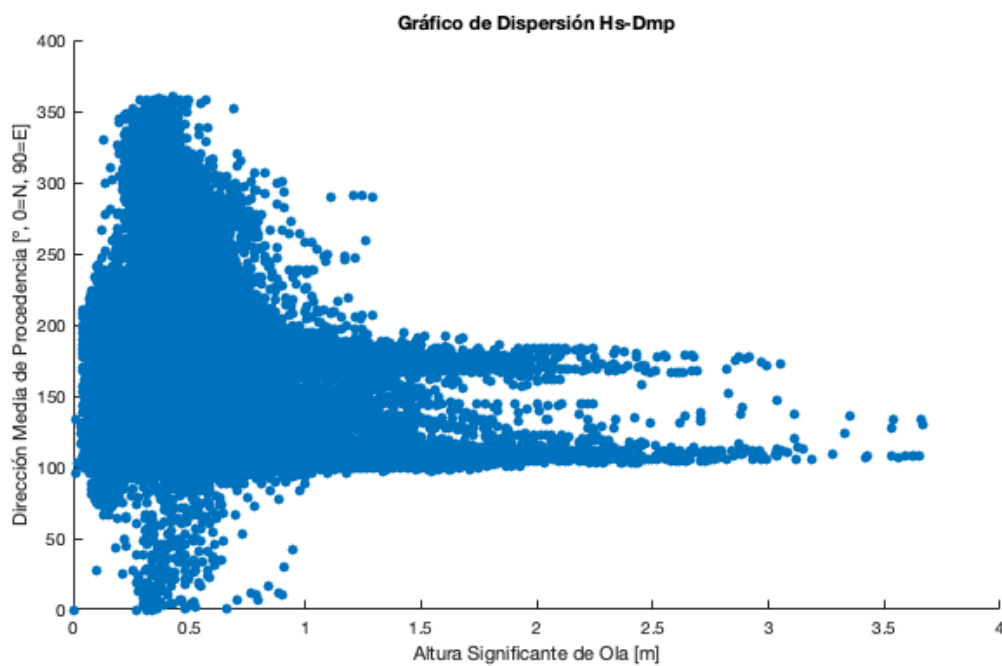


Figura 3.8 Gráfico de Dispersión de la Altura Significante de Ola y la Dirección Media de Procedencia.

Por último, se ha representado la rosa del oleaje. Se trata de un diagrama que muestra, para la posición del SIMAR de estudio, la frecuencia relativa de las distintas direcciones de procedencia del oleaje, así como su altura de ola significativa.

En la leyenda de colores adjunta a la rosa se muestra la altura de ola significativa, medida en metros. Los círculos concéntricos indican la frecuencia de ocurrencia, y las barras radiales la dirección de procedencia.

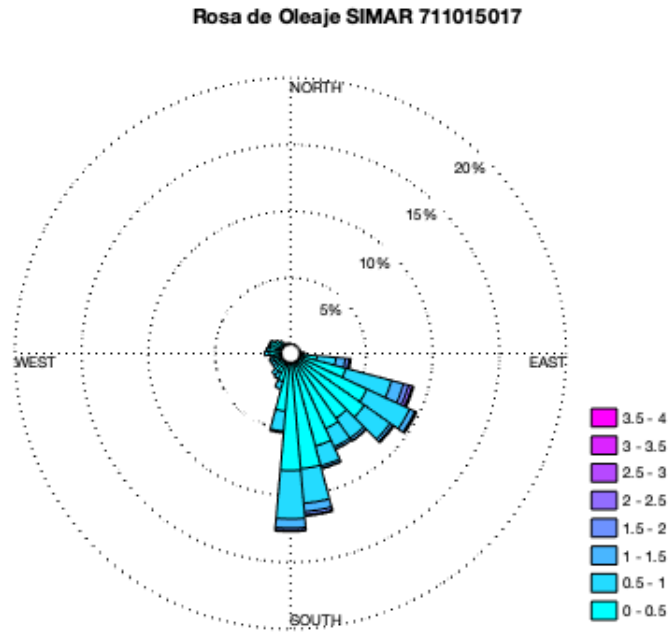


Figura 3.9 Rosa de Oleaje del punto SIMAR 711015017.

3.1.2 Análisis en Régimen Medio

Se puede definir como régimen medio de una serie temporal al conjunto de estados de oleaje que más probablemente nos podemos encontrar (Puertos del Estado, 2014). El régimen medio se describe mediante una distribución teórica que ajusta los valores centrales del histograma.

La distribución elegida para describir el régimen medio de las series de oleaje es Weibull, cuya función de densidad viene definida por la expresión 3.1:

$$f(x|a, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-(x/a)^b} \tag{3.1}$$

Donde *a* es el parámetro de escala y *b* el parámetro de forma:

- Parámetro de Escala *a*: determina la dispersión de una distribución probabilística. Si *a* es grande, la distribución será más amplia; si *a* es pequeño, entonces la distribución estará más concentrada.
- Parámetro de Forma *b*: como su nombre indica, determina la forma o perfil de la distribución, la cual es función del valor de éste.

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros de ajuste del régimen medio de altura de ola obtenidos según la distribución de Weibull.

Tabla 3.4 Parámetros de Weibull.

	a	b
Parámetro	0.546599	1.60174

A continuación se representa en la Figura 3.10 el histograma de frecuencias de alturas de ola con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull, así como el de frecuencias acumuladas con la función de distribución en la Figura 3.11. Esto permitirá conocer tanto la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola en todo el rango estudiado como la probabilidad de no excedencia de dicha altura.

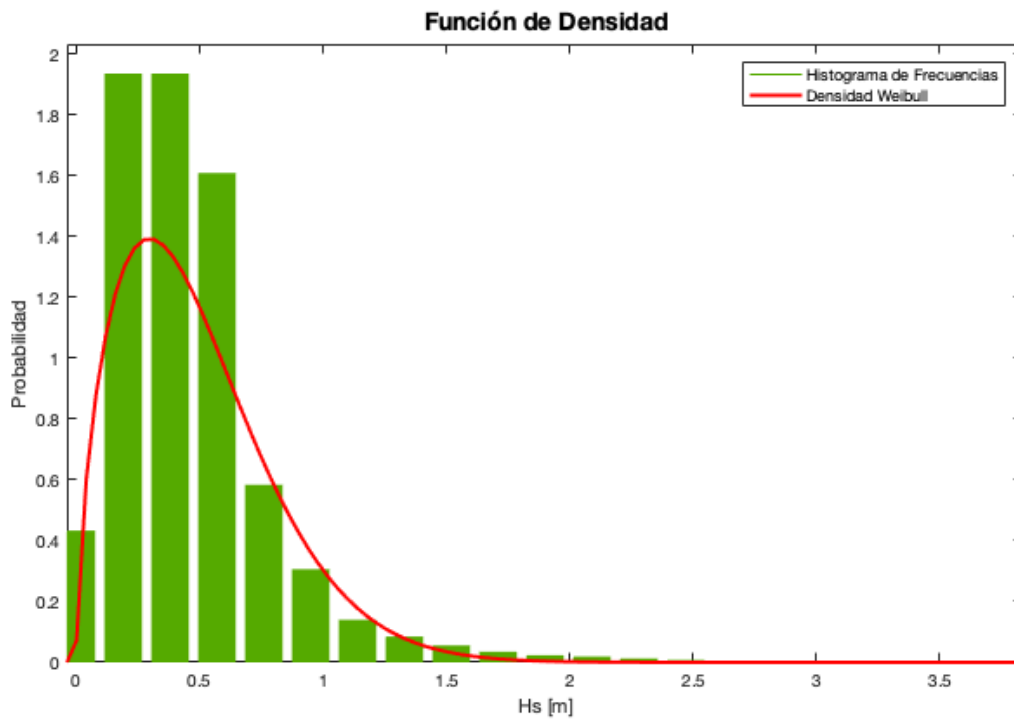


Figura 3.10 Función de Densidad de Weibull de la Altura de Ola Significante.

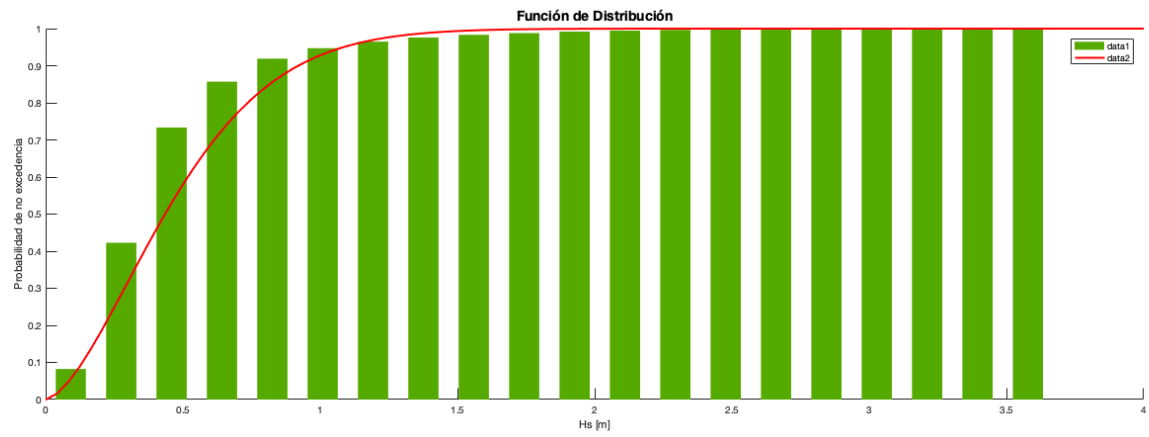


Figura 3.11 Función de Distribución de Weibull de la Altura de Ola Significante.

3.1.3 Análisis en Régimen Extremal

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold), fijando el umbral en 3 m, valor que es superado en menos del 1% de los instantes estudiados en el apartado 3.1.1. Esto se encuentra representado en la Figura 3.12, con el umbral en azul, la serie temporal en negro y los temporales en rojo. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales sea de 48 horas.

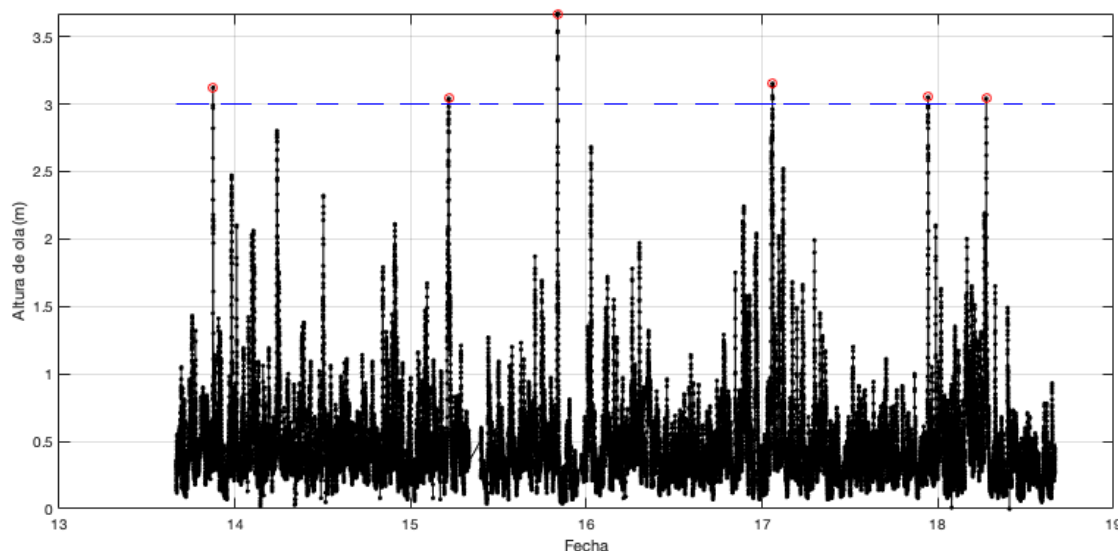


Figura 3.12 Picos de Altura de Ola sobre Umbral con $H_{umb} = 3m$.

Se han encontrado seis temporales en la gráfica anterior, cuyas principales características se encuentran resumidas en la tabla representada en la Figura 3.13:

TEMPORAL	Hmax [m]	Tp [s]	Dir [°]	Duración [h]	Intervalo [h]	Fechas
1	3.12	9.2	106	5.17	34681.6	16/11/13
2	3.04	9.2	108	5.90	14412.7	21/3/15
3	3.67	8.4	130	23.81	31475.8	2/11/15
4	3.15	13.5	113	11.66	23265.3	22/1/17
5	3.05	8.4	173	4.38	8663.9	11/12/17
6	3.04	8.4	147	1.37	15716.4	11/4/18

Figura 3.13 Temporales identificados gracias a la herramienta POT.

Para el estudio se han elegido, de los seis temporales obtenidos en la Figura 3.12 y caracterizados en la 3.13, los tres que alcanzan una mayor altura de ola. Estos corresponden con el 1, el 2 y el 4 según la numeración de la Figura 3.13.

- Temporal 1: En 2013, del 16 de noviembre a las 00:00 al 18 de noviembre a las 00:00.
- Temporal 2: En 2015, del 31 de octubre a las 20:00 al 4 de noviembre a las 23:00.
- Temporal 3: En 2017, del 16 de enero a las 19:00 al 24 de enero a las 18:00.
- Semana sin temporales: del 1 al 7 de marzo de 2019.

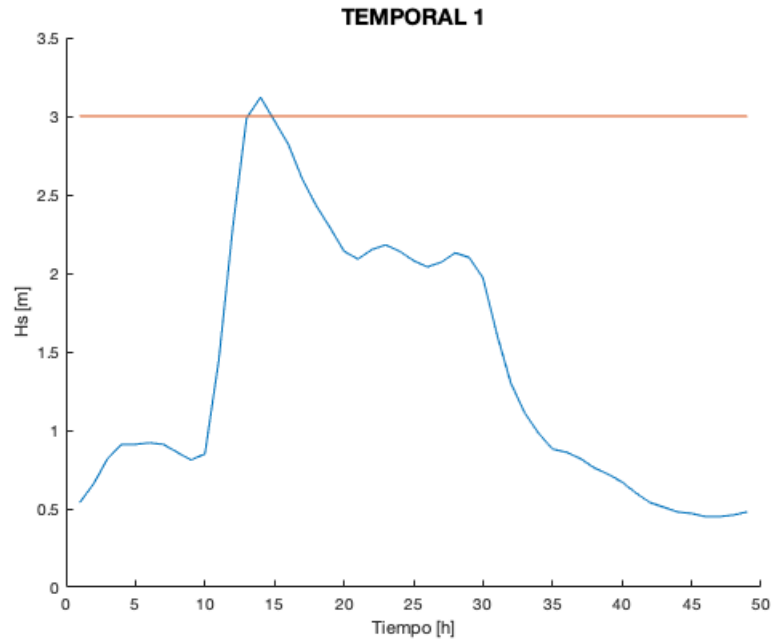


Figura 3.14 Temporal 1: se representa en azul la altura de ola significativa durante las 50 horas de duración del estudio, así como el umbral de 3 metros marcado en rojo..

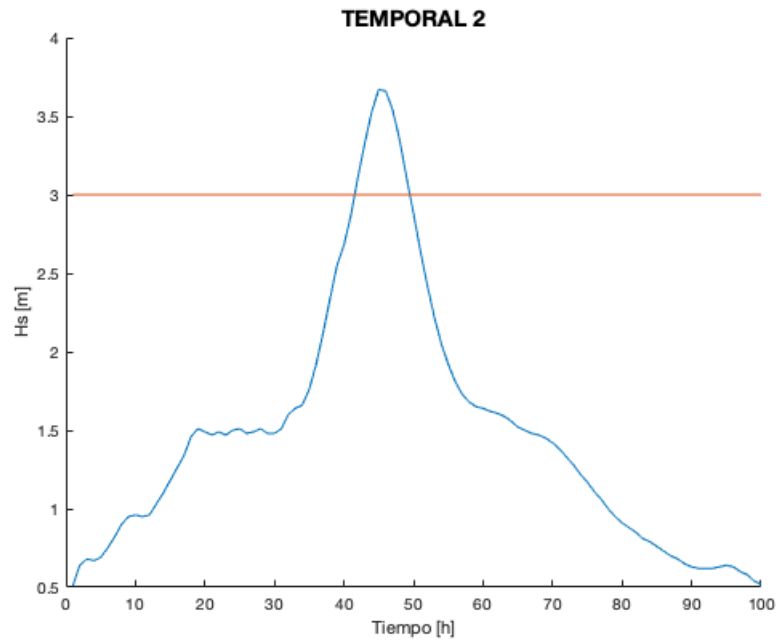


Figura 3.15 Temporal 2: de manera análoga, se representa en azul la altura de ola significativa durante el temporal y en rojo el umbral de 3 metros. Para el Temporal 2, el pico sobre el umbral tiene una mayor duración que el anterior..

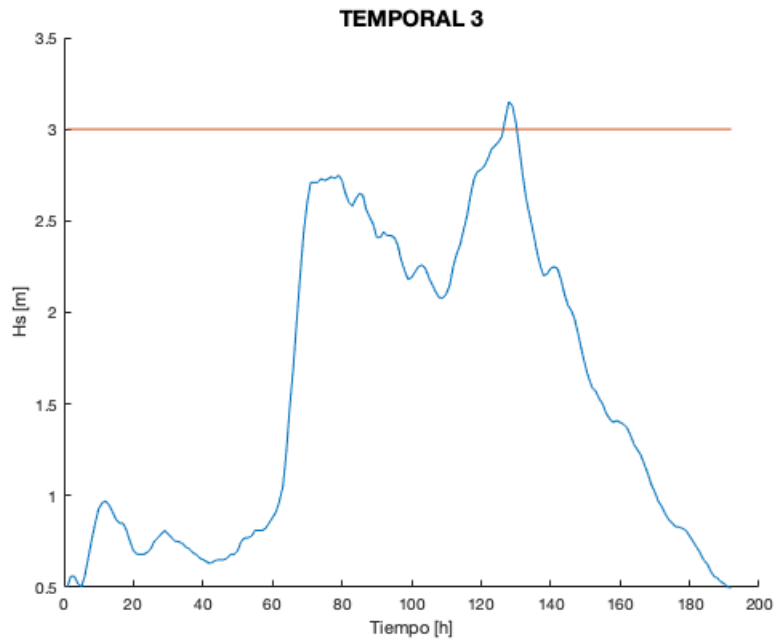


Figura 3.16 Temporal 3: altura de ola significativa para el tercer temporal..

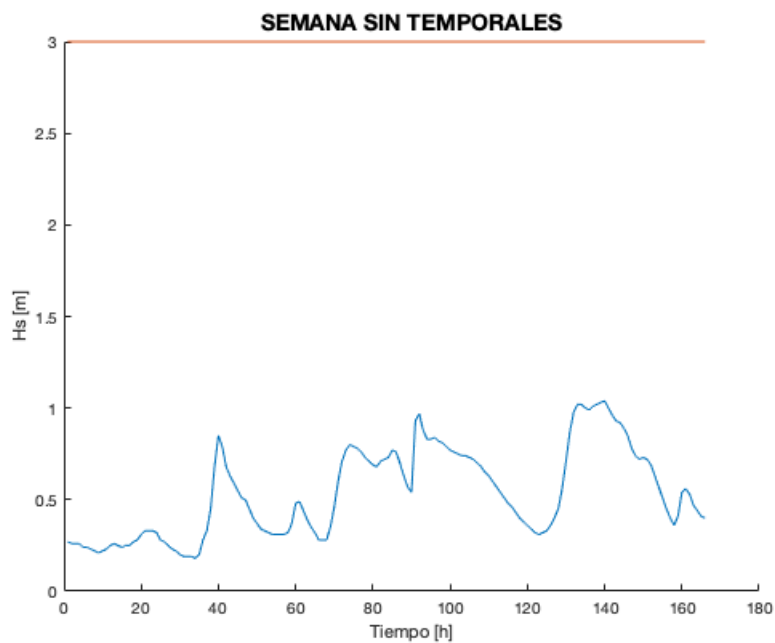


Figura 3.17 Semana sin temporales: Se eligió una semana consecutiva en la que no se superase el valor umbral de altura de ola en ninguna ocasión. Se representa la altura de ola significativa durante este periodo en azul, y en rojo el umbral de 3 metros..

3.2 Estudio de Viento

Siguiendo el mismo procedimiento de estudio realizado para el oleaje, se obtendrá el histograma de frecuencias tanto de la velocidad como de la dirección media de procedencia del viento, así como el gráfico de dispersión que relacione estas dos variables.

Velocidad del Viento

Se ha representado en la Figura 3.18 el histograma de frecuencias de las velocidades del viento obtenidas del SIMAR. Además, en la Tabla 3.5 aparecen los datos de frecuencias de manera numérica.

El rango de velocidades que aparece es de 0 a 20 m/s, aunque las más frecuentes van de 0 a 7 m/s.

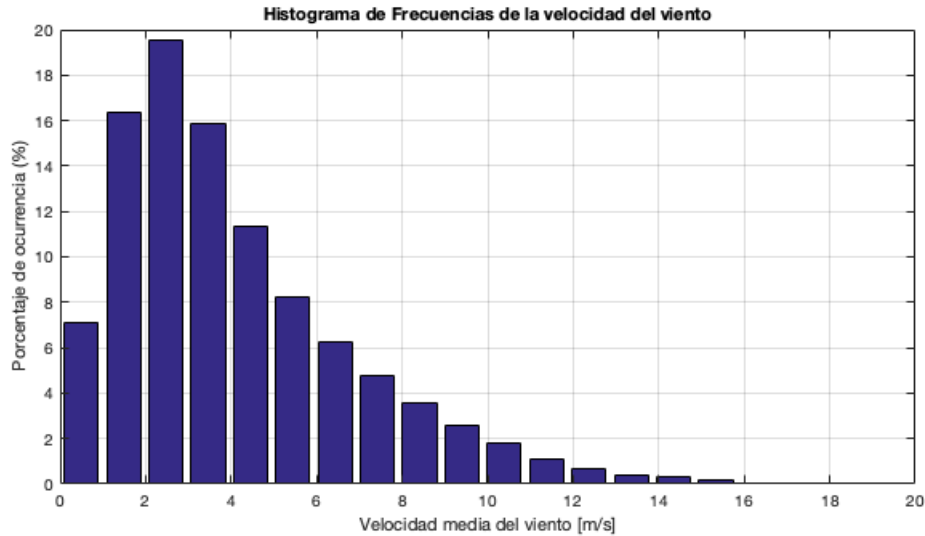


Figura 3.18 Histograma de frecuencias de la velocidad del viento.

Tabla 3.5 Frecuencias de velocidades del viento, en el intervalo de altura que comprende el de estudio y el anterior.

Velocidad [m/s]	0.495	1.484	2.474	3.463	4.453	5.442	6.432	7.421	8.411	9.400
Frecuencia [%]	7.133	16.329	19.506	15.857	11.333	8.205	6.229	4.776	3.542	2.591
Velocidad [m/s]	10.390	11.379	12.369	13.358	14.348	15.337	16.327	17.316	18.306	19.295
Frecuencia [%]	1.795	1.114	0.643	0.398	0.285	0.142	0.065	0.036	0.013	0.009

Dirección Media de Procedencia del Viento

Para la dirección de procedencia del viento, se ha representado el histograma de frecuencias en la Figura 3.19 y numéricamente en la Tabla 3.6. El viento viene de casi cualquier dirección, aunque la sureste es la predominante, además de la que trae los vientos de mayor velocidad como puede observarse en la Figura 3.20: diagrama de dispersión que relaciona la velocidad del viento y su dirección de procedencia.

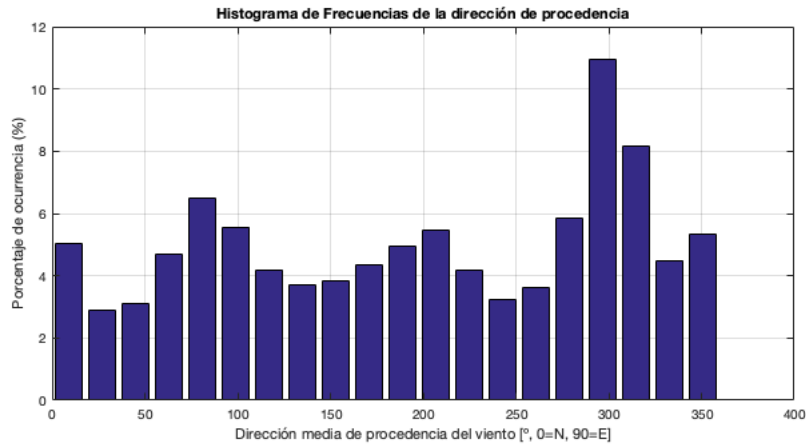


Figura 3.19 Histograma de frecuencias de la dirección media de procedencia del viento.

Tabla 3.6 Frecuencias de la dirección de procedencia del viento en cada una de las orientaciones indicadas.

Dirección	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
Frecuencia [%]	5.69	3.63	4.87	7.99	6.58	5.01	4.54	5.49
Dirección	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
Frecuencia [%]	6.18	6.42	4.40	4.42	7.69	14.20	6.26	6.62

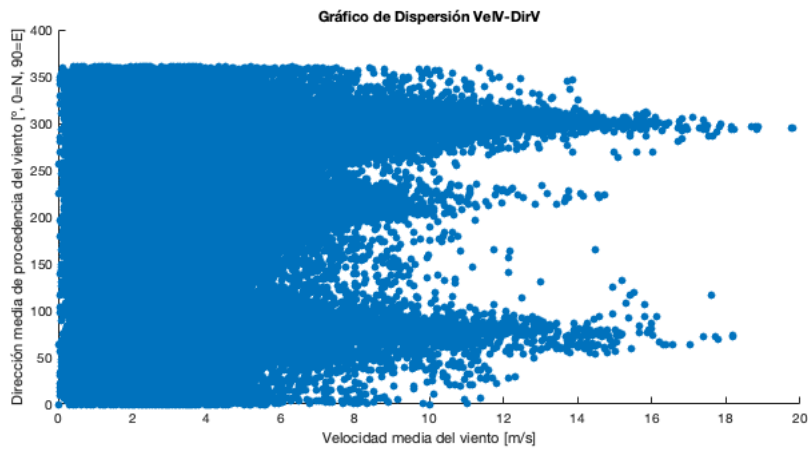


Figura 3.20 Gráfico de dispersión que relaciona la velocidad media del viento con la dirección media de procedencia..

Por último, se ha representado una rosa de viento en la figura 3.21, una manera muy visual de representar las dos variables descritas anteriormente. Da información sobre la frecuencia de ocurrencia y la velocidad del viento en cada una de las direcciones de procedencia existentes.

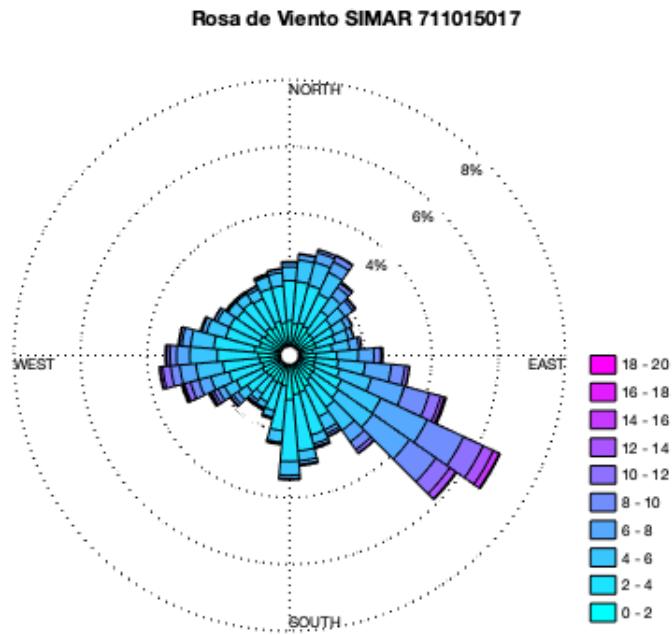


Figura 3.21 Rosa de Viento del punto SIMAR 711015017.

4 Modelo Numérico

El modelo empleado es *Delft3D*, desarrollado por Deltares (Delft University of Technology). Se trata de un programa de simulación hidrodinámico multidimensional (2D o 3D), capaz de trabajar con fenómenos de flujo y transporte no estacionarios provocados por fuerzas de marea y meteorológicas en una cuadrícula ajustada al contorno.

4.1 Introducción: Módulo WAVE

SWAN permite la generación del oleaje espectral por efecto de la acción del viento y la propagación del mismo oleaje hacia la costa. En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de la acción de onda $N(\sigma, \theta)$, en lugar de utilizar el espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ ya que en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974). Las variables independientes son la frecuencia relativa σ y la dirección de onda θ (la dirección normal a la cresta de la onda de cada componente espectral). La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$. En SWAN, este espectro puede variar en el tiempo y el espacio. La evolución del espectro del oleaje es descrita mediante la ecuación de balance de acción espectral, que en coordenadas cartesianas es (Hasselmann et al, 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (4.1)$$

El primer término en el lado izquierdo de esta ecuación representa la variación de la densidad de la acción en el tiempo; el segundo y tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico. El cuarto término representa el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a variaciones en las profundidades y corrientes (con velocidad de propagación $c\sigma$ en el espacio σ). El quinto término representa la refracción inducida por la profundidad y la corriente (con velocidad de propagación $c\theta$ en el espacio θ). Las expresiones para estas velocidades de propagación se toman de la teoría de ondas lineales (Whitham, 1974; Mei, 1983; Dingemans, 1997). El término $S(= S(\sigma, \theta))$ en el lado derecho de la ecuación de equilibrio de acción es el término fuente en términos de densidad de energía que representa los efectos de la generación, disipación e interacciones onda-onda no lineales. Su expresión es la siguiente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (4.2)$$

- S_{in} : Transferencia de energía al oleaje debido al viento.
- S_{nl} : Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$: Disipación de energía en aguas profundas debidas al White-capping.
- $S_{ds,br}$: Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$: Disipación de energía por fricción con el fondo.

Esta formulación se encuentra desarrollada en el *Apéndice B - Módulo WAVE*.

4.2 Datos de Entrada

4.2.1 Batimetría

Para la obtención de la batimetría de la zona de estudio se han empleado dos fuentes:

- Para el fondo marino, se ha empleado un archivo NetCDF en formato de 64 bits creado por Pablo Cerralbo, doctor perteneciente al Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña en junio de 2017. Este archivo cuenta con información en coordenadas geográficas en huso 31 de batimetría en metros para cada punto. Cuenta con una resolución de 20x20 metros.
- Para la zona emergida, se ha obtenido la batimetría de curvas de nivel cada 10 metros, disponibles en la web del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. Mediante el software *QGIS* se han unido todos los puntos en una sola capa que cuenta con información en coordenadas geográficas en huso 31 y así como altitud del terreno en metros.

Por último, se han unido estas dos fuentes para obtener un único archivo que contiene toda la información necesaria, y se ha exportado en formato *xyz* para su posterior utilización en *Delft3D*. La resolución de la batimetría es de 300 metros.

Este procedimiento se ha realizado con la ayuda del Código de *Matlab* representado en el apéndice: *Código C.1 - Lectura de Datos Batimétricos*.

En la Figura 4.1 aparece la batimetría representada en 3 dimensiones, mientras que en la Figura 4.2 aparecen representadas las curvas de nivel de la zona.

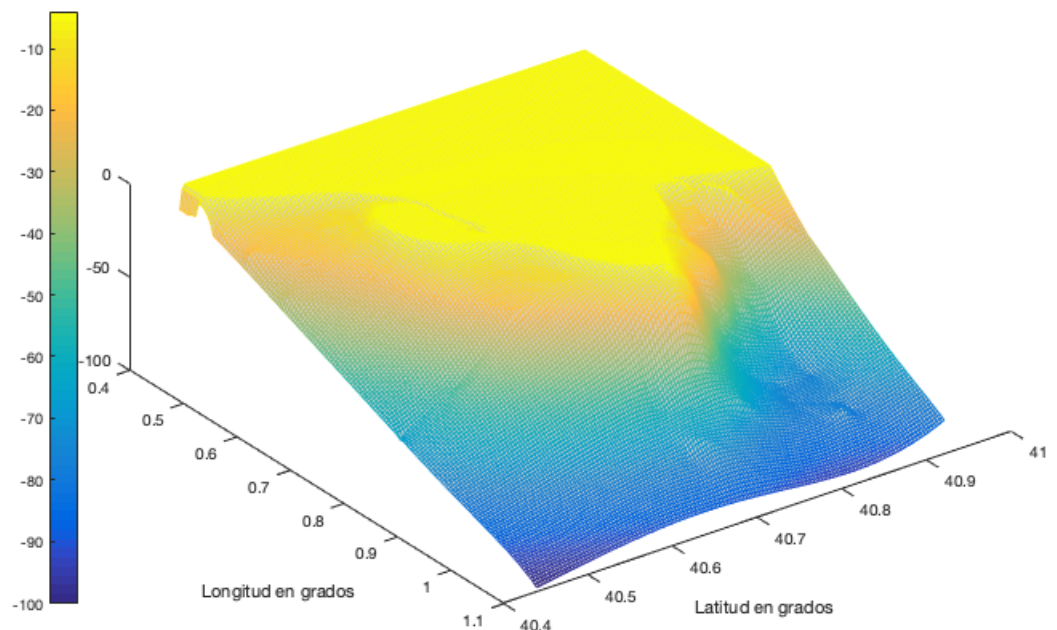


Figura 4.1 Batimetría del Delta del Ebro.

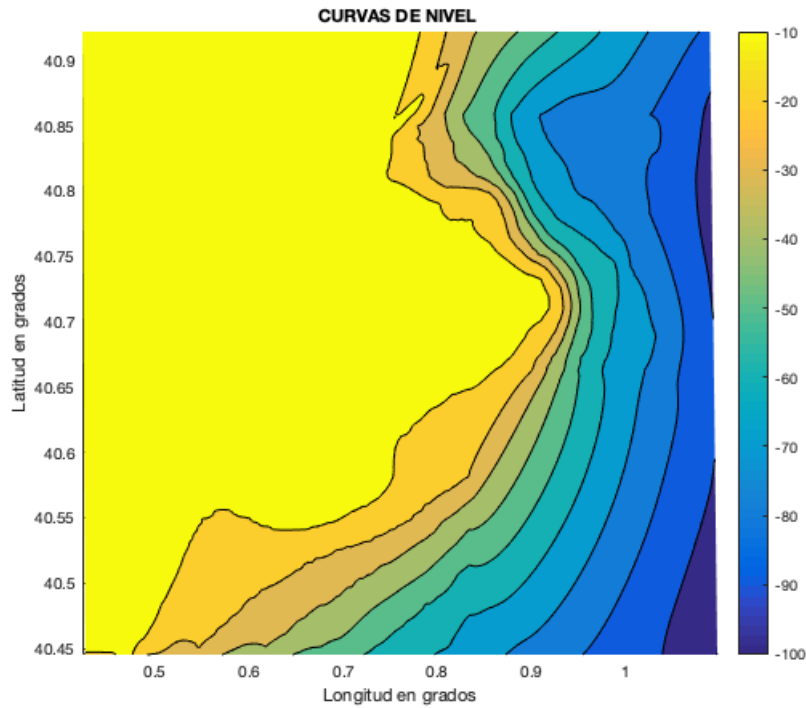


Figura 4.2 Curvas de nivel obtenidas a raíz de la batimetría del Delta del Ebro.

4.2.2 Línea de Costa

La línea de costa es la línea en la superficie de la Tierra que define el límite entre el mar y la tierra firme. Se caracteriza por poseer una altura sobre el nivel del mar de 0 metros.

Para su obtención, partiendo de un recurso online gratuito que define la línea de costa a nivel mundial, se ha recortado en *QGis* ula zona de interés y se ha completado y detallado a una escala menor gracias a un mapa web de base. Se ha exportado en formato *shape file* y más tarde, gracias a la herramienta *QuickPlot* de *Delft3D* se ha exportado en formato '.lbd' (landboundary format). La línea de costa utilizada se encuentra representada en la Figura 4.2:

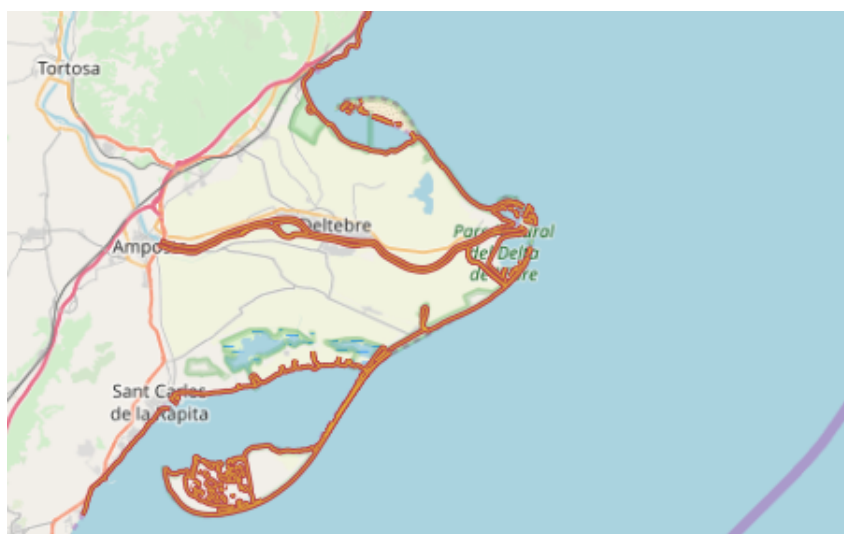


Figura 4.3 Línea de costa.

4.2.3 Malla

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error. Se siguieron las siguientes consideraciones:

- La forma utilizada estará compuesta por tres líneas rectas y una curva que contenga la zona de estudio.
- La malla debe estar orientada de manera que abarque el oleaje predominante.
- Se deben evitar zonas que pudiesen impedir la correcta propagación del oleaje, como zonas angulosas o zonas sin datos. La malla debe estar contenida en su totalidad dentro de la batimetría descrita anteriormente.

La malla definida es la que aparece en la Figura 4.3:

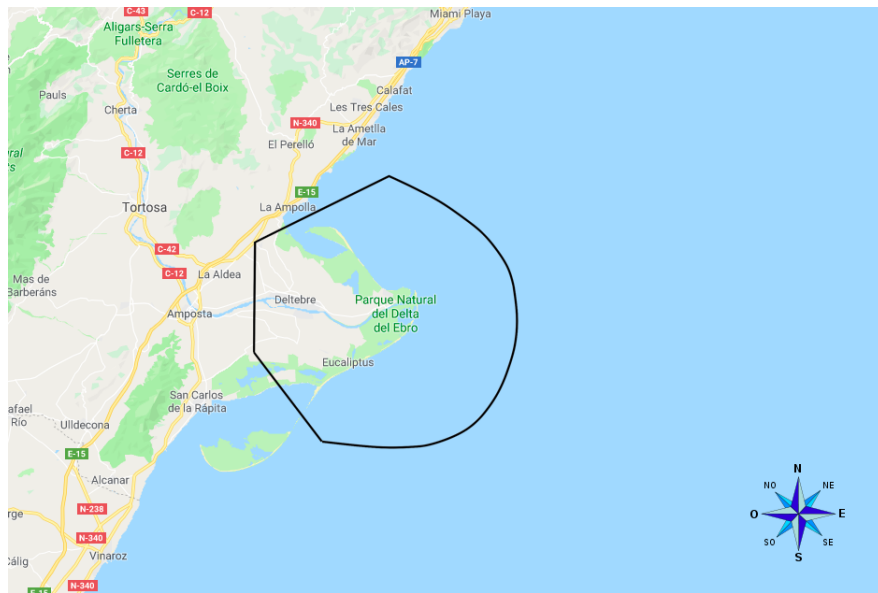


Figura 4.4 Malla utilizada en la simulación.

Cuenta con una resolución de $M244 \times N244$ celdas, dando un total de 59.536 celdas. El tamaño máximo de celda es de $146 \text{ m} \times 82 \text{ m}$ en la zona oceánica más profunda, mientras que el mínimo se encuentra en tierra, entre las localidades de La Aldea y La Ampolla, con un tamaño de $30 \text{ m} \times 45 \text{ m}$.

4.2.4 Condiciones de Contorno

Se encuentran recogidas en un archivo llamado *wavecon*, que contiene la siguiente información:

- La extensión es el nombre del mdw, en este caso: *wavecon.modelo*
- Primera línea: los encabezados de cada una de las columnas:
 - Tiempo [min]
 - Altura significativa de ola H_S [m]
 - Período pico T_p [s]
 - Dirección media de procedencia del oleaje θ [°]
 - Dispersión ms
 - Nivel de la superficie libre wl [m]
 - Velocidad del viento V_v [m/s]
 - Dirección de procedencia del viento θ_v [°]

- Segunda línea: el nombre de la condición de contorno
- Tercera línea: número de filas espacio número de columnas.
- Los datos que aparecen son los correspondientes a las columnas antes descritas para todo el período de simulación, separados entre ellos con tabulador.
- Si no se conoce la información, se pone un 0.

Estos archivos han sido creados mediante el *Código C.3 - Creación del archivo Wavecon para las condiciones de contorno*, plasmado en el Apéndice C.

4.2.5 Parámetros del Modelo

Los parámetros a introducir se encuentran definidos en el *Apéndice B - Módulo WAVE*. Se expone un breve resumen en la tabla representada en la Figura 4.5:

Apartado		Parámetro	Valor
Grid	Resolución espectral	Número de direcciones	72
		Frecuencia más baja	0.03
		Frecuencia más alta	1
		Número de divisiones de frecuencia	24
Physical parameters	B&J Model	Alpha	1
		Gamma	1.2
	LTA	Alpha	0.1
		Beta	9
	Fricción del fondo	Modelo	Collins
Difracción	Coefficiente de fricción	CALIBRAR	
	Coefficiente suavizado	0.9	
Whitecapping	Paso de suavizado	900	
	Tipo	Van der Westhuysen	
Numerical parameters	Accuracy Criteria	Porcentaje celdas húmedas	98%
		Número máximo iteraciones	30

Figura 4.5 Parámetros a modificar en el modelo.

4.3 Calibración del Modelo

La calibración es un proceso de ajuste de una serie de parámetros del modelo para que los resultados reproduzcan las mediciones en terreno.

Para la calibración del modelo se han utilizado los datos provenientes del punto SIMAR 2095129, representado en la Figura 3.1. Conociendo sus coordenadas geográficas (40.75°N; 0.92°E), podemos comparar los datos obtenidos de la simulación con los datos reflejados en la medición de dicho punto SIMAR. Mediante la variación del coeficiente de Collins se obtendrán diferentes resultados que serán comparados para elegir el valor de dicho coeficiente que haga que la altura de ola, período pico y dirección media de procedencia se reproduzcan con mayor fidelidad.

El período temporal que se analizará es la semana del 1 al 7 de enero de 2014, con una duración total de 168 horas. En la Figura 4.5 se puede apreciar la variación de la altura de ola significativa obtenida en función del coeficiente de Collins escogido en cada simulación, en comparación con el valor del SIMAR de referencia.

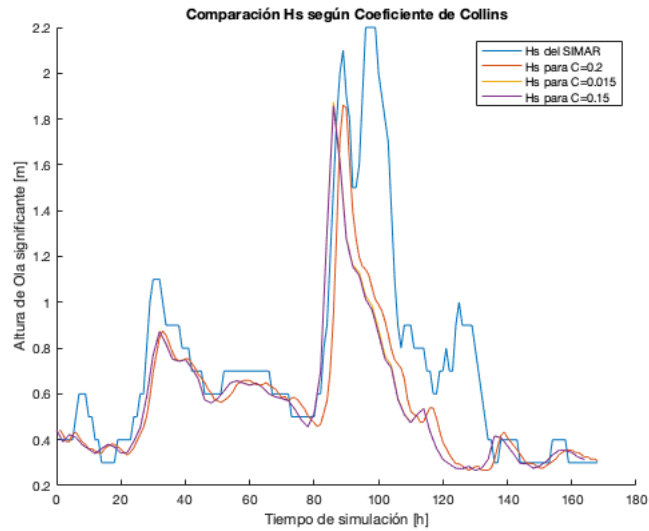


Figura 4.6 Altura de Ola Significante en función del Coeficiente de Collins.

En la Tabla 4.1 aparecen reflejados los coeficientes de correlación S y $Skill$ en cada uno de estos casos:

Tabla 4.1 Tabla comparadora de ajuste para H_s .

Collins	R	Skill
0.2	0.834	0.70
0.015	0.797	0.66
0.15	0.802	0.67

En la figura 4.6 aparece la misma comparativa realizada anteriormente pero para el caso del Período Pico del oleaje, y sus coeficientes de correlación correspondientes están reflejados en la Tabla 4.2:

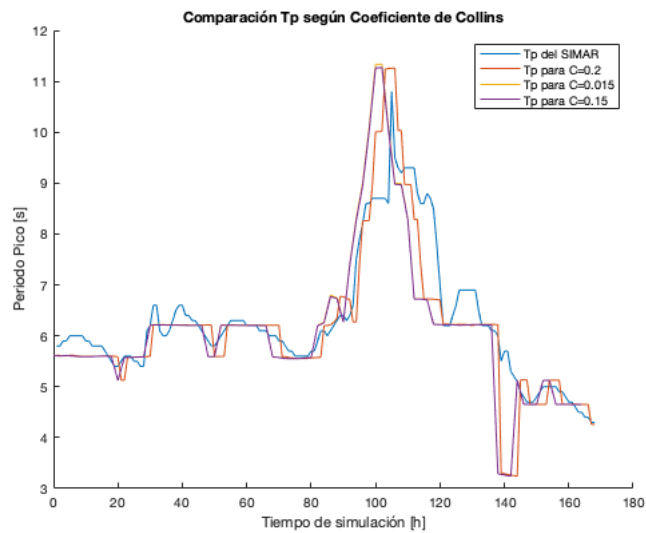


Figura 4.7 Período Pico del oleaje en función del Coeficiente de Collins.

Tabla 4.2 Tabla comparadora de ajuste para Tp..

Collins	R	Skill
0.2	0.878	0.87
0.015	0.838	0.83
0.15	0.837	0.83

Finalmente, se concluye con que el valor de **0.2** es el que más se ajusta al modelo.

La rutina de *MatLab* utilizada para la calibración se encuentra en el *Código C.5 - Calibración del modelo*.

4.4 Validación del modelo

La validación es la fase en la que se utilizan los valores de los parámetros determinados en la calibración y se compara el modelo con otro set de datos, usualmente en otra ventana de tiempo o espacio.

En el *Capítulo 5 - Análisis de Resultados* se han modelado una serie de escenarios utilizando el coeficiente de Collins ajustado en este capítulo. Comprobando el resultado obtenido en estos instantes temporales en las coordenadas del SIMAR de referencia, con los valores con los que dicho punto cuenta, el modelo quedaría validado.

5 Análisis de Resultados

Se ha analizado el régimen medio en los 4 puntos de control representados en la Figura 5.1. Sus coordenadas se encuentran plasmadas en la Tabla 5.1:

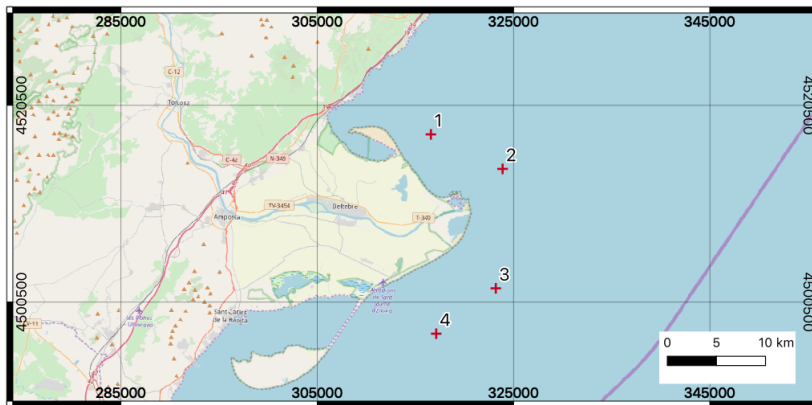


Figura 5.1 Posición de los puntos de observación definidos. La cuadrícula corresponde con las coordenadas en el sistema ETRS89 (UTM Huso 31N)..

Tabla 5.1 Coordenadas UTM (Huso 31) y coordenada local de la malla de los cuatro puntos de observación..

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada M	Coordenada N
1	316561.7	4517547	24	162
2	323865.6	4514040.2	57	190
3	323175.4	4501902.9	147	168
4	317104.3	4497288.7	197	170

El procedimiento a seguir en cada escenario es similar. Consiste en realizar la simulación en *Delft3D* para el intervalo temporal estudiado, y con las condiciones de contorno correspondientes. De ahí, gracias a la herramienta *QuickPlot* se obtienen los histogramas de frecuencias de altura de ola significativa en cada uno de los puntos de observación. Tras una breve comparativa y análisis de resultados, y la representación de las rosas de oleaje en cada punto, se lleva a cabo un estudio probabilístico en el que se obtendrán las funciones de densidad de probabilidad de Weibull. Finalmente, se ha obtenido la Resultante Media Anual (RMA), vector que representa el flujo medio de energía de oleaje. El módulo indica en qué zonas el oleaje está aportando más energía y en cuales menos. Si al comparar el módulo de la RMA de un escenario a otro, éste aumenta, querrá decir que el oleaje pasa a aportar más energía en dicho punto. Estos resultados deberían obtenerse a partir de una simulación de un año de duración, pero debido al enorme trabajo computacional para el modelo que esto conllevaría, se ha obtenido para los distintos escenarios como primera aproximación.

Los cálculos realizados en este capítulo se encuentran reflejados en el *Código C.4 - Estudio de los diferentes escenarios mediante los datos obtenidos de la simulación realizada en Delft3D*.

5.1 Escenario 1: Temporal 1

Se comienza estudiando el Escenario 1, que abarca del 16 de noviembre de 2013 a las 00:00 al 18 de noviembre de 2013 a las 00:00, 49 horas de duración. La representación de la serie temporal correspondiente se encuentra en la Figura 3.14 (*Capítulo 3.1.3 - Análisis en Régimen Extremal*).

En la Figura 5.2 se muestran los gráficos correspondientes a la altura de ola significativa en cada punto de observación a lo largo de todo el escenario estudiado:

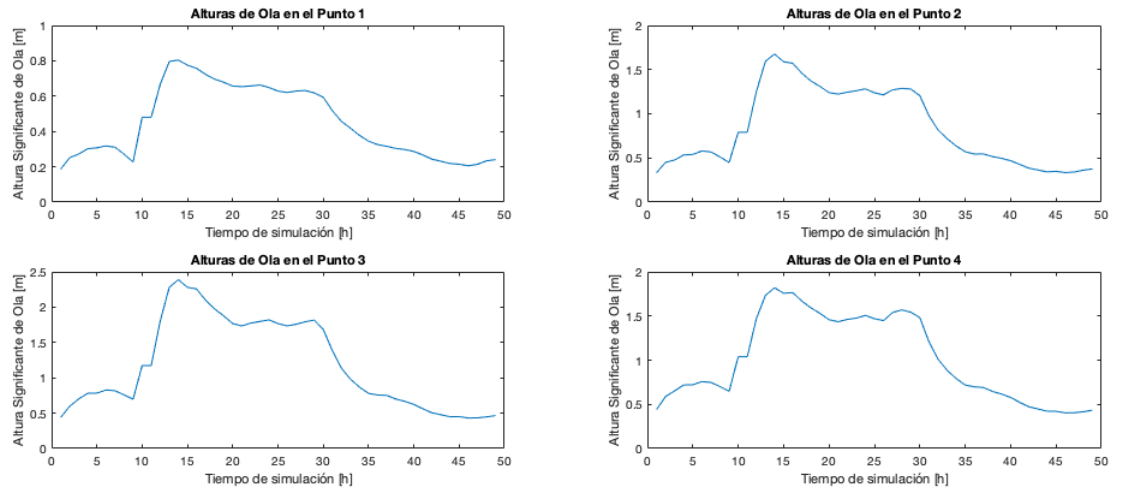


Figura 5.2 Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 1..

Histogramas de Frecuencias (Escenario 1)

Aparecen representados los histogramas de frecuencias de la altura de ola significativa de los cuatro puntos de observación en el Temporal 1 en la Figura 5.3:

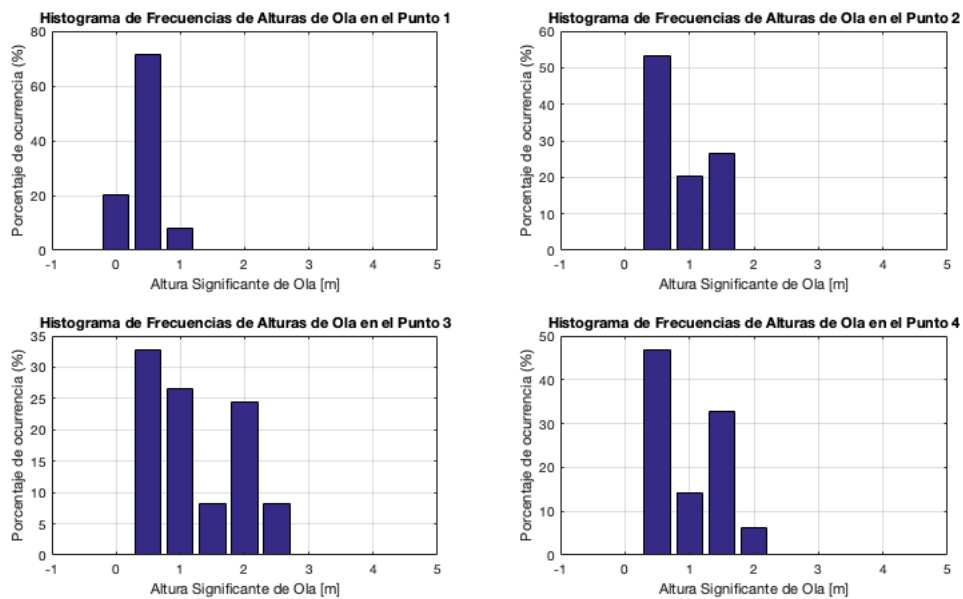


Figura 5.3 Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 1, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo..

Las alturas de olas dominantes en el caso del primer temporal estudiado son muy variadas: mientras que en el Punto 1 se da que más del 91% del oleaje cuenta con una altura inferior a 0.5 metros, en el Punto 3 dicho porcentaje se alcanza para alturas de ola de 2 metros.

Tanto al norte como al sur del delta, conforme se va acercando a la línea de costa desde la desembocadura del Ebro (puntos 2 al 1 y 3 al 4), se produce un descenso en la frecuencia de grandes alturas de ola.

Rosas de Oleaje (Escenario 1)

Las rosas de oleaje de los cuatro puntos de observación indican la relación entre la altura de ola y la dirección de procedencia de dichas olas. Corresponden con la representación de la Figura 5.4:

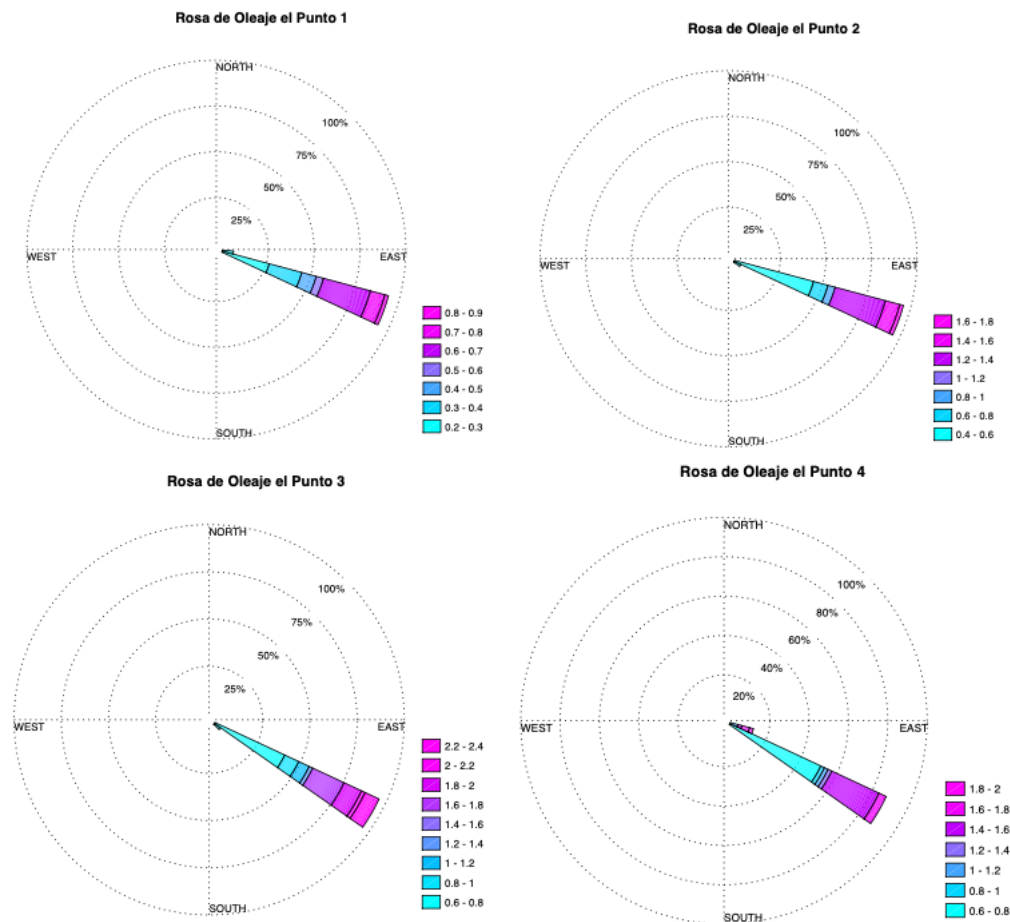


Figura 5.4 Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 1..

Se aprecia que en cada uno de los puntos la dirección es prácticamente uniforme, de valor alrededor de 100 grados desde el norte.

Función de Densidad de Weibull (Escenario 1)

Para la obtención de la Función de Densidad de Weibull se ha empleado la aplicación integrada en *MatLab* llamada *Distribution Fitting*. Los resultados aparecen reflejados en la Figura 5.5:

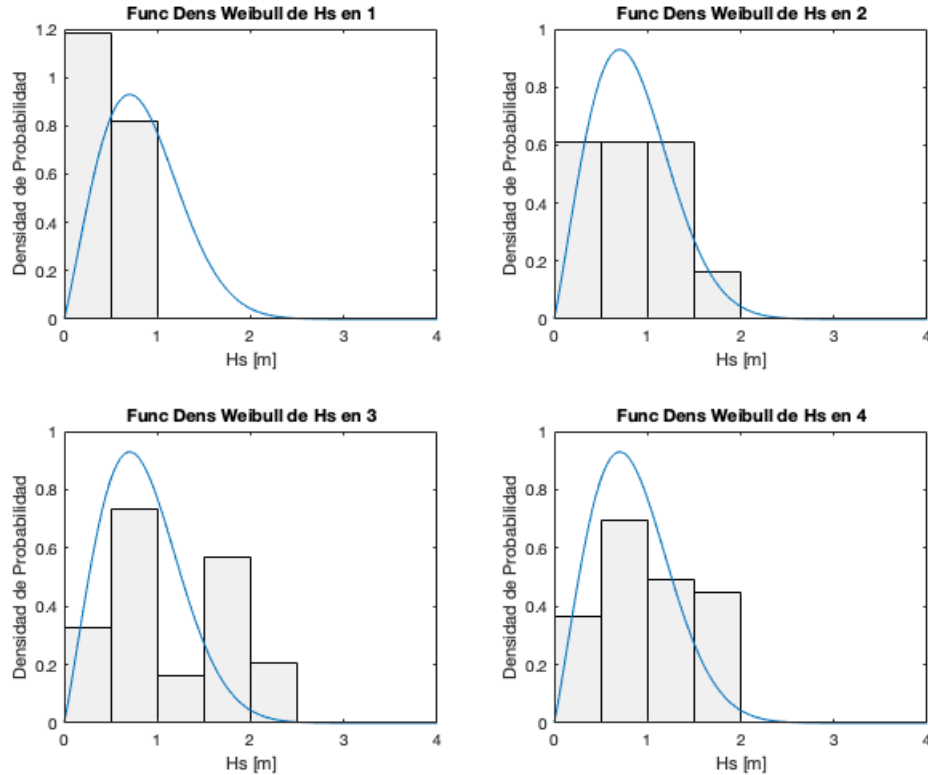


Figura 5.5 Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 1..

En esta figura se observa como el punto 3 es el que cuenta con las mayores olas que lo atraviesan debido a su lejanía a la costa en comparación con el resto de puntos. Sin embargo, el punto 1, al estar más cercano y encontrarse en una zona de calma, cuenta con oleaje menor. Es por eso que aquí la función es más estrecha y más alta que en los demás casos.

Resultante Media Anual (Escenario 1)

La Resultante Media Anual (RMA) se trata de un vector que representa el flujo medio de energía del oleaje. El módulo indica en qué zonas el oleaje está aportando más energía y en cuales menos, y la dirección indica el ángulo con el que incide dicho flujo.

Primero se define la normal a la costa en cada punto de control. El ángulo que forma la normal a la costa con el norte en sentido horario se denomina β . La dirección del vector α viene dada por un ángulo medido respecto a la dirección normal, en sentido horario. Este convenio descrito se encuentra representado gráficamente en la Figura 5.6:

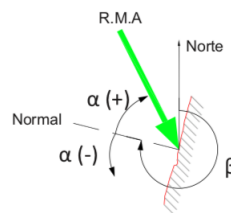


Figura 5.6 Convenio de signos en la definición de los ángulos β y α .

El módulo del vector, $|RMA|$, se define con la expresión siguiente:

$$|RMA| = \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{c}{2 \sinh 2kh} \quad (5.1)$$

donde:

- ρ : densidad del agua del mar, 1025 kg/m^3
- g : gravedad, 9.81 m/s^2
- H : altura de ola de rotura [m]
- c : velocidad [m/s]
- $k = \frac{2\pi}{L}$: número de onda, que depende de la longitud de onda L .
- h : profundidad [m]

Cada una de las componentes del vector RMA se obtienen mediante la siguiente expresión:

$$RMA_x = |RMA| \sin(\alpha) \quad (5.2)$$

$$RMA_y = |RMA| \cos(\alpha) \quad (5.3)$$

Con esto, quedan representados los vectores con su módulo y dirección en la Figura 5.7, así como sus valores en la tabla que se encuentra dentro de dicha Figura:

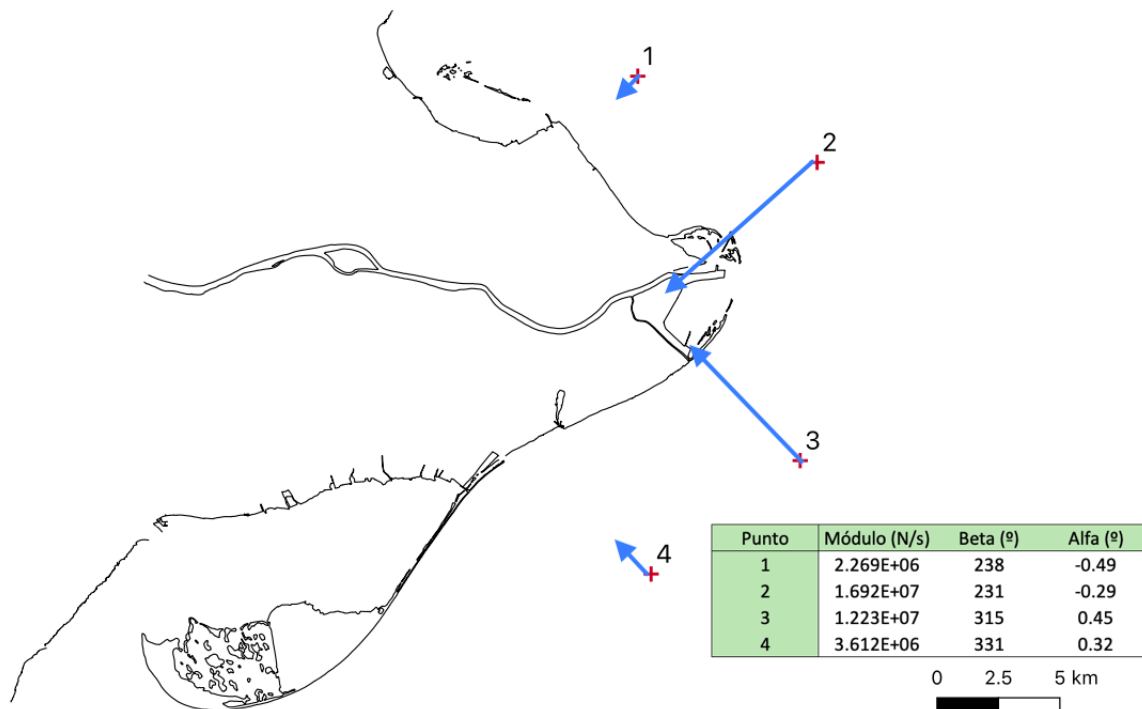


Figura 5.7 Vectores RMA (Escenario 1).

Como aparece representado en la Figura 5.7, los vectores que nacen en los puntos 1 y 2 tienen un ángulo α negativo. Esto significa que el oleaje en esos puntos favorece un transporte de sedimentos hacia el sur. Sin embargo, en los puntos 3 y 4, ocurre lo contrario: el transporte favorable es hacia el norte. Esto evidencia la formación del delta, como se pudo ver en el Capítulo 1.2.2. - Evolución Histórica de la Zona, en la Figura 1.6. Sin embargo, debido al bajo valor de estos ángulos, se trata de un proceso muy lento en el tiempo, del orden de cientos de años. Para el caso de una zona costera estándar, esto podría significar un equilibrio en la

línea de costa, pero es debido a la existencia de una gran cantidad de sedimentos entrante por el Río Ebro que la línea de costa seguirá variando con el paso de los años.

Los vectores más cercanos a la desembocadura transportan sedimentos con una mayor energía, y conforme se aleja de dicho punto, se reduce su módulo. Esto es lógico, ya que dichas zonas poseen una profundidad mayor, así como una longitud de onda también mayor: la energía y la celeridad de grupo aumentan, por tanto aumenta el flujo medio de energía del oleaje.

5.2 Escenario 2: Temporal 2

Para el Escenario 2, que abarca del 31 de octubre de 2015 a las 20:00 al 4 de noviembre de 2015 a las 03:00 (79 horas de duración), la representación de la serie temporal correspondiente se encuentra en la Figura 3.15 (Capítulo 3.1.3 - *Análisis en Régimen Extremal*). En la Figura 5.8 se muestran los gráficos correspondientes a la altura de ola significativa en cada punto de observación a lo largo de todo el escenario estudiado:

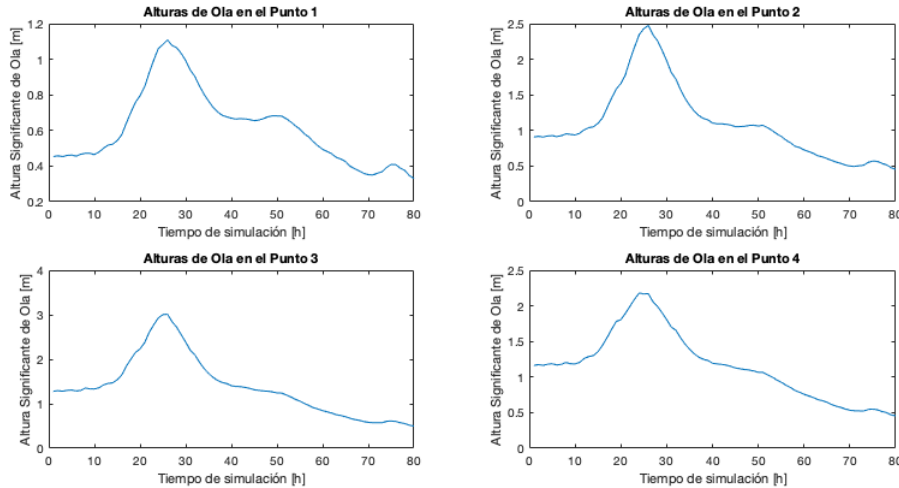


Figura 5.8 Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 2..

Histogramas de Frecuencias (Escenario 2)

Para el Temporal 2, se tienen los histogramas de frecuencias de la altura de ola significativa de los cuatro puntos de observación representados en la Figura 5.9:

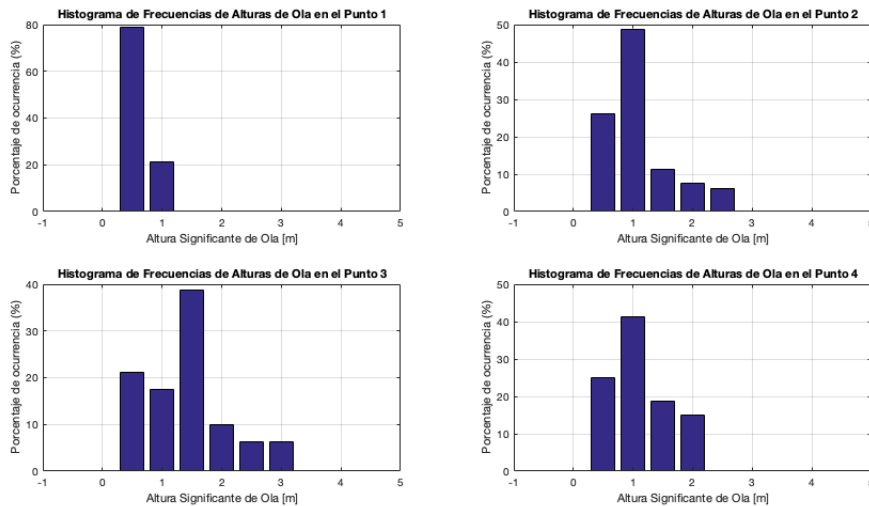


Figura 5.9 Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 2, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo..

Los puntos situados al sur del delta cuentan con mayores alturas de ola, mientras que los situados al norte se encuentran más limitados.

No se ha registrado ningún oleaje inferior a 0.5 metros. Los valores medios de oleaje están comprendidos entre 0.61 metros para el punto 1, y 1.38 metros para el punto 3.

Rosas de Oleaje (Escenario 2)

Las rosas de oleaje de los cuatro puntos de observación se encuentran representadas en la Figura 5.10:

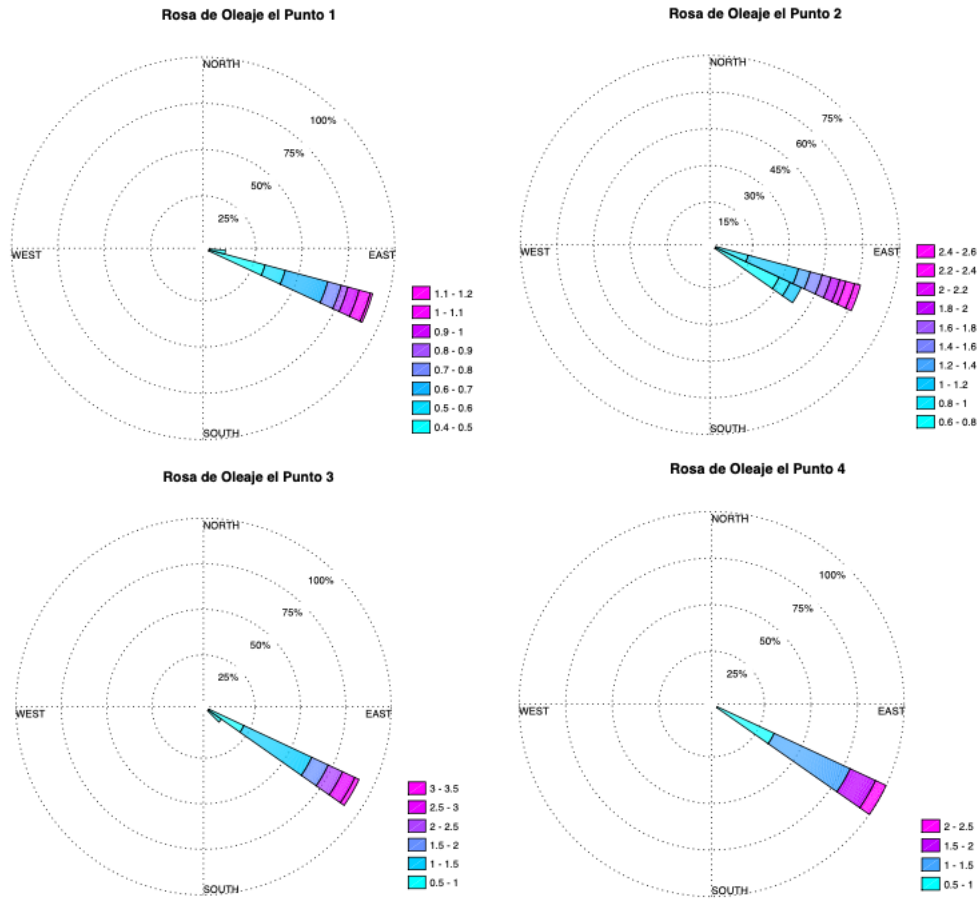


Figura 5.10 Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 2..

Se aprecia como en este escenario las direcciones son muy similares a las obtenidas en el escenario anterior. Sin embargo, las alturas de ola han aumentado.

Función de Densidad de Weibull (Escenario 2)

Para la obtención de la Función de Densidad de Weibull se ha empleado la aplicación integrada en *MatLab* llamada *Distribution Fitting*. Los resultados aparecen reflejados en la Figura 5.11:

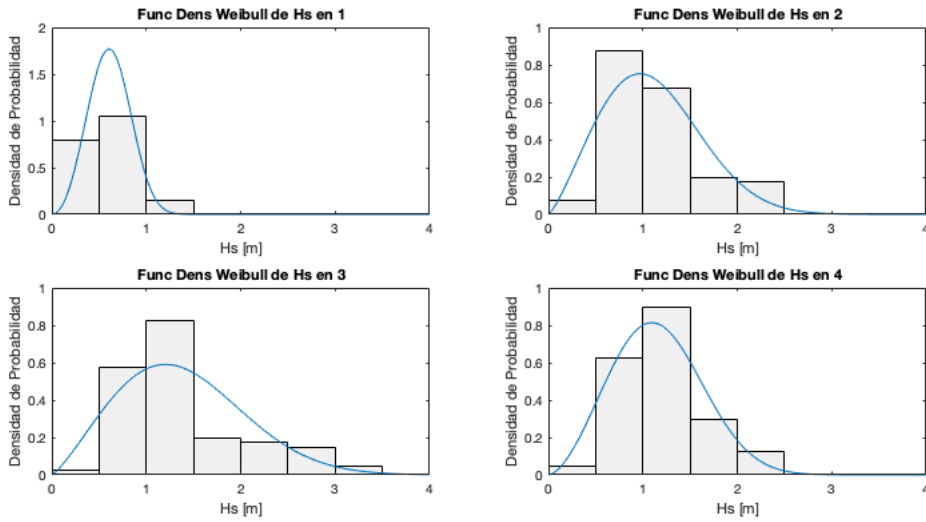


Figura 5.11 Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 2..

Estos resultados evidencian lo descrito anteriormente en vista a los histogramas obtenidos.

Resultante Media Anual (Escenario 2)

Mediante la misma metodología descrita en el apartado anterior, aparecen representados los vectores de RMA para el segundo escenario en la Figura 12:

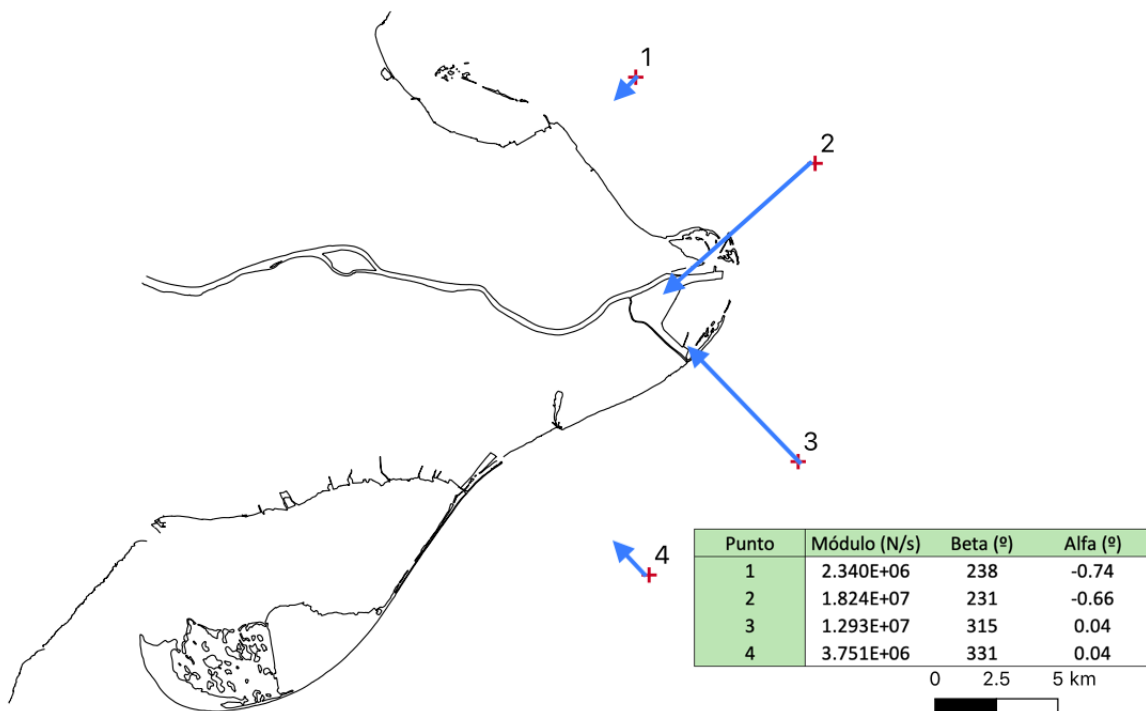


Figura 5.12 Vectores RMA (Escenario 2).

5.3 Escenario 3: Temporal 3

Para el Escenario 3, que abarca del 16 de enero de 2017 a las 19:00 al 24 de enero de 2017 a las 18:00 (191 horas de duración), la representación de la serie temporal correspondiente se encuentra en la Figura 3.16 (Capítulo 3.1.3 - Análisis en Régimen Extremal).

En la Figura 5.13 se muestran los gráficos correspondientes a la altura de ola significativa en cada punto de observación a lo largo de todo el escenario estudiado:

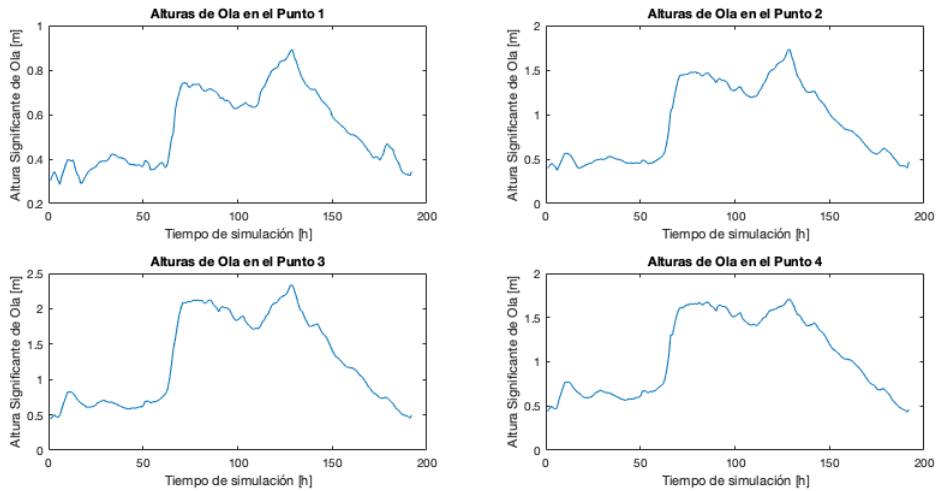


Figura 5.13 Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 3..

Histogramas de Frecuencias (Escenario 3)

Aparecen representados los histogramas de frecuencias de la altura de ola significativa de los cuatro puntos de observación en el Temporal 3 en la Figura 5.14:

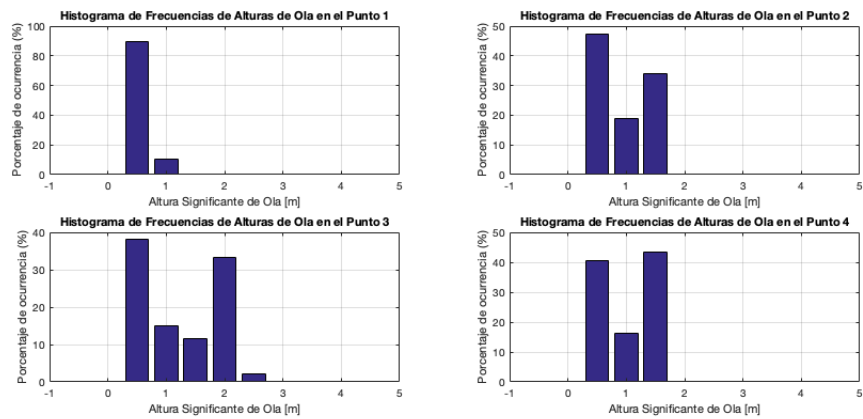


Figura 5.14 Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 3, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo..

Mientras que en el punto 1, el 89.5% de las olas contaban con una altura de ola inferior a 0.5 metros, en el punto 3 era de un 38% únicamente. Se corrobora lo expuesto anteriormente: los puntos 2 y 3 cuentan con mayores frecuencias de alturas de ola mayores.

Rosas de Oleaje (Escenario 3)

Las rosas de oleaje de los cuatro puntos de observación se encuentran representadas en la Figura 5.15:

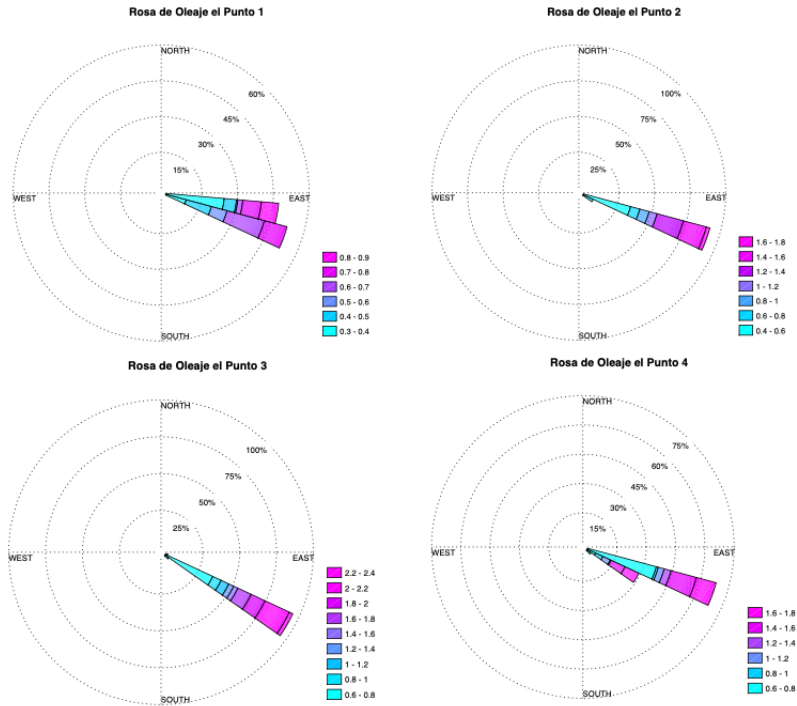


Figura 5.15 Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 3..

Función de Densidad de Weibull (Escenario 3)

Para la obtención de la Función de Densidad de Weibull se ha empleado la aplicación integrada en *MatLab* llamada *Distribution Fitting*. Los resultados aparecen reflejados en la Figura 5.16:

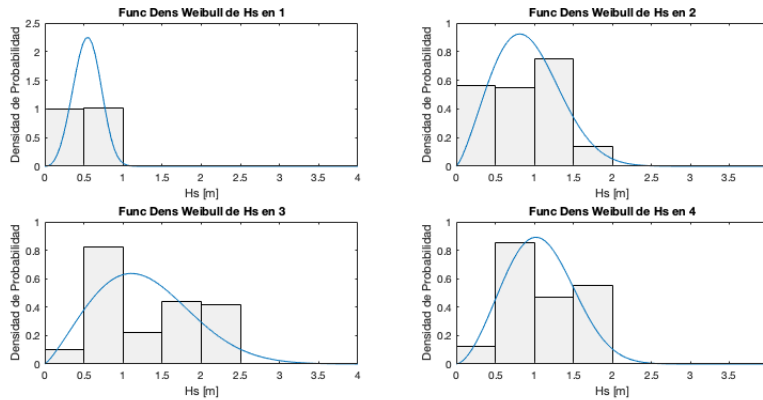


Figura 5.16 Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 3..

Resultante Media Anual (Escenario 3)

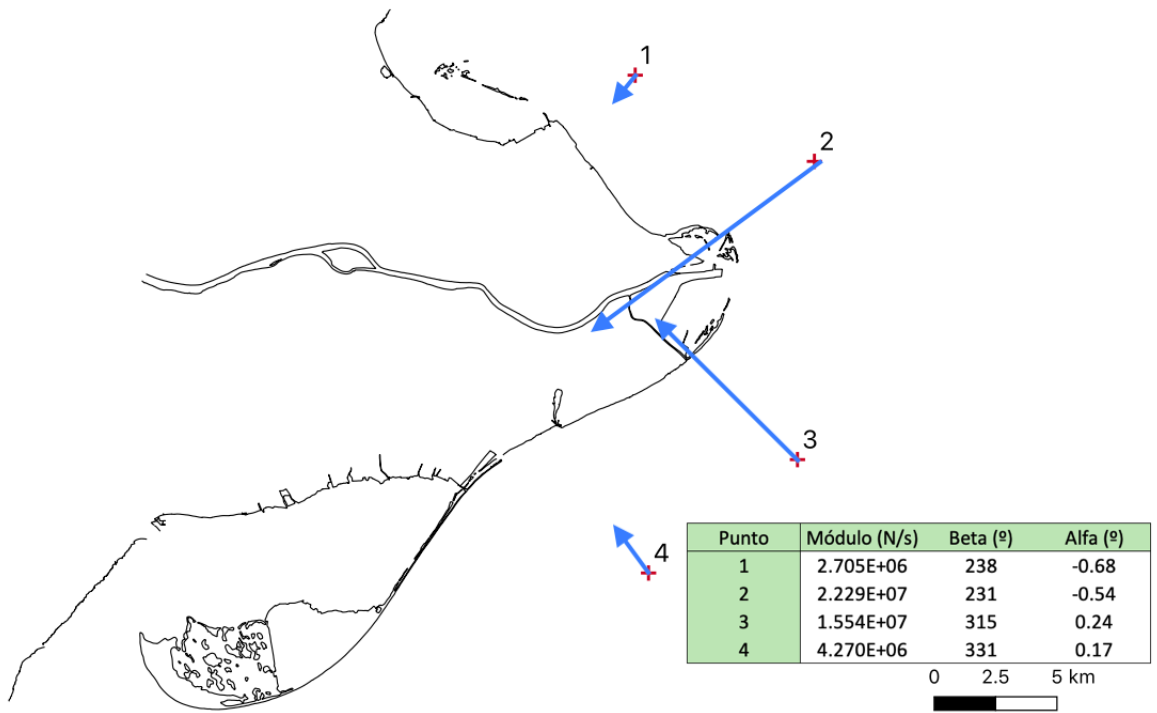


Figura 5.17 Vectores RMA (Escenario 3).

5.4 Escenario 4: Semana sin temporales

Para el Escenario 4 (semana sin temporales), que abarca del 1 de Marzo de 2017 a las 00:00 al 7 de Marzo de 2017 a las 23:00 (167 horas de duración), la representación de la serie temporal correspondiente se encuentra en la Figura 3.17 (*Capítulo 3.1.3 - Análisis en Régimen Extremal*).

En la Figura 5.18 se muestran los gráficos correspondientes a la altura de ola significativa en cada punto de observación a lo largo de todo el escenario estudiado:

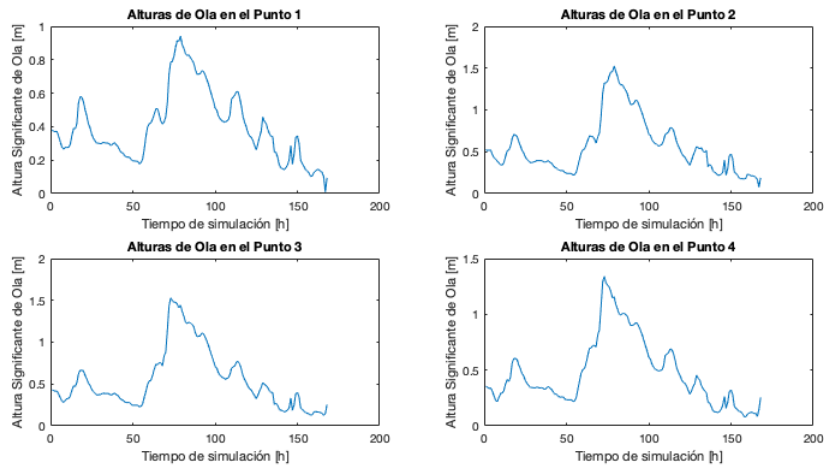


Figura 5.18 Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 3..

Histogramas de Frecuencias (Escenario 4)

Para la semana sin temporales, se tienen los histogramas de frecuencias de la altura de ola significativa de los cuatro puntos de observación representados en la Figura 5.19:

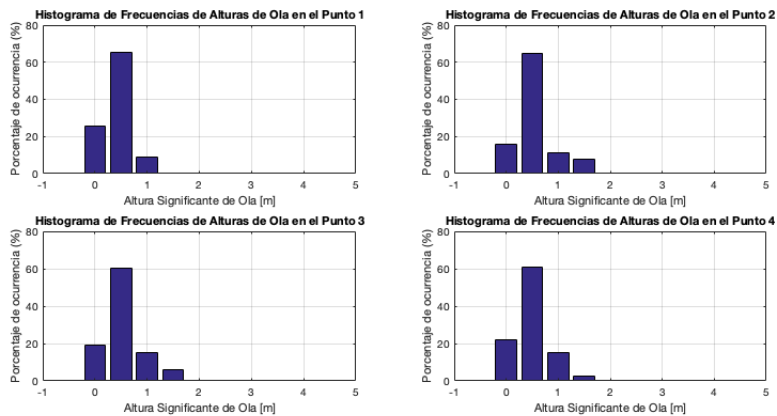


Figura 5.19 Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para la semana sin temporales, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo..

Rosas de Oleaje (Escenario 4)

Las rosas de oleaje de los cuatro puntos de observación se encuentran representadas en la Figura 5.20:

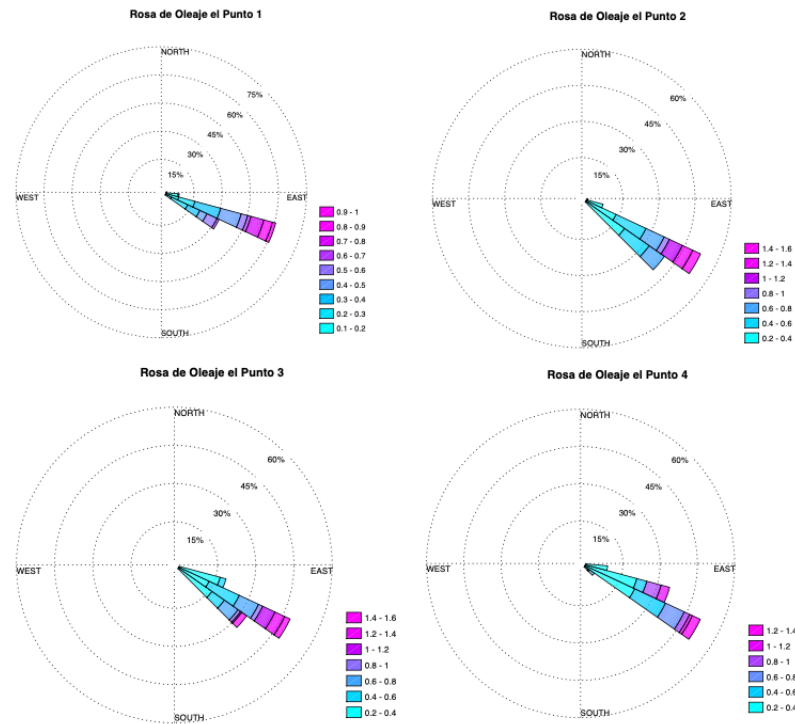


Figura 5.20 Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para la semana sin temporales..

Función de Densidad de Weibull (Escenario 4)

Para la obtención de la Función de Densidad de Weibull se ha empleado la aplicación integrada en *MatLab* llamada *Distribution Fitting*. Los resultados aparecen reflejados en la Figura 5.21:

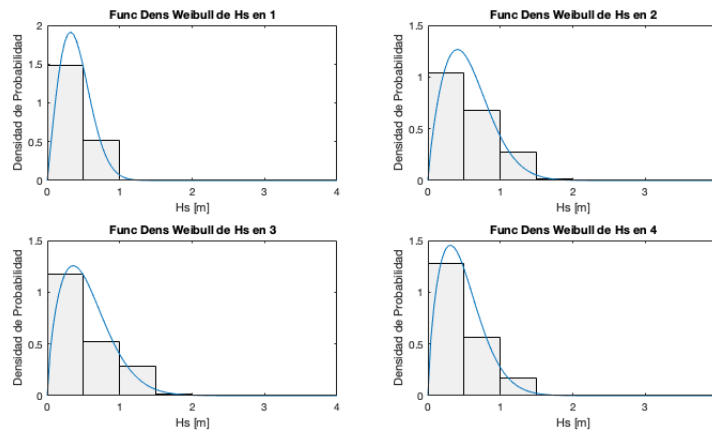


Figura 5.21 Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para la semana sin temporales..

Resultante Media Anual (Escenario 4)

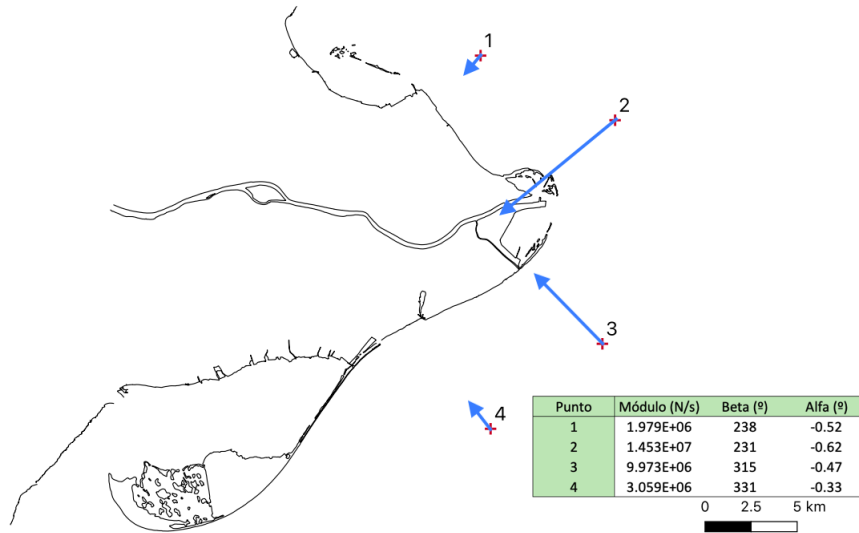


Figura 5.22 Vectores RMA (Escenario 4).

5.5 Comparativa de Resultados

En resumen, los cuatro escenarios estudiados son muy diferentes entre sí. Cada uno posee una duración diferente, así como una altura de ola máxima distinta. En la Figura 23 aparece un diagrama comparativo entre la altura de ola en cada escenario y la frecuencia de ocurrencia:

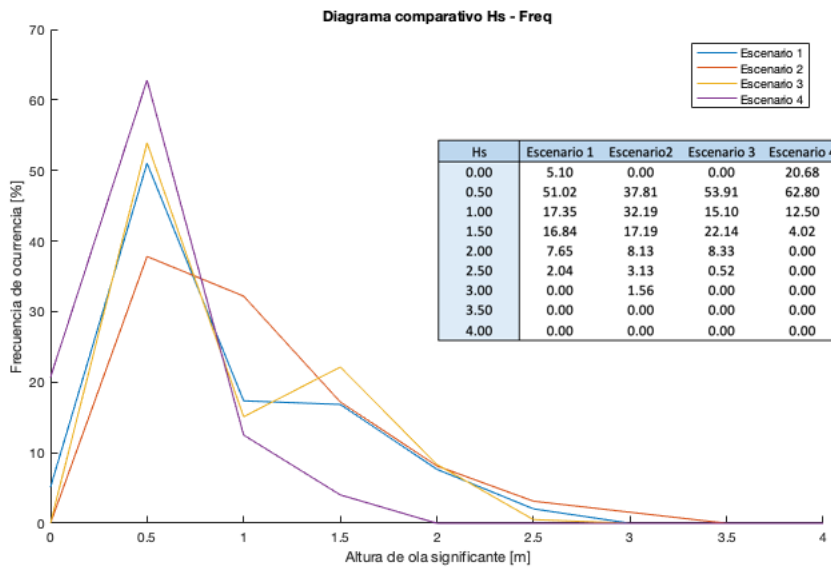


Figura 5.23 Diagrama comparativo entre Hs y % Frecuencia.

Todos los escenarios estudiados cuentan con una altura de ola más frecuente de 0.5 metros. El escenario 2 es el que tiene una base más ancha: esto indica que posee un oleaje mayor que los demás. Por el contrario, el escenario 1 es que cuenta con un menor forzamiento.

6 Conclusiones

El Delta del Ebro conforma una zona natural con numerosos recursos y riqueza ecológica. Como se expuso en el *Capítulo 1*, debido al cambio climático y a la alteración del transporte natural de sedimentos con el que contaba el Río Ebro, el Delta se encuentra en grave riesgo de desaparecer si no se toman actuaciones para su recuperación.

6.1 Clima Marítimo

Partiendo de los datos procedentes de la Boya de Tarragona y los puntos SIMAR cercanos a la zona de estudio, se ha elaborado el clima marítimo de la costa que bordea el Delta del Ebro. Se puede sintetizar los resultados obtenidos en las siguientes afirmaciones:

- El rango de alturas de ola significantes oscila entre 0 y 4 metros, siendo las de mayor frecuencia de ocurrencia las situadas entre 0.5 y 1 metro (el 51.38% de los casos en todo el periodo estudiado).
- Los periodos pico oscilan entre 1 y 14 segundos, aunque los más frecuentes se encuentran entre 4 y 5 segundos (43.75%).
- Las direcciones medias de procedencia del oleaje cuentan con sus valores más frecuentes en el sur y el sudeste, con una frecuencia de más del 67% de ocurrencia.

Para el régimen medio se ha obtenido que la altura cuya probabilidad de no excedencia es del 50% es de 0.48 metros, y aquella del 90% es de 1.04 metros. Para el régimen extremal se ha definido un umbral de 3 metros de altura de ola como límite para considerar un episodio de oleaje como temporal. El oleaje mayor a dicho umbral aparece con una frecuencia de 0.05%. El mayor oleaje registrado en el periodo estudiado es de 3.67 metros. En comparación con otros estudios realizados, por ejemplo, en la costa atlántica andaluza, el Mediterráneo posee un clima marítimo mucho más suave.

Finalmente, del estudio del viento se han obtenido velocidades entre 0 y 16 m/s , siendo las más frecuentes entre 1 y 4 m/s , con una frecuencia del 51%. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el viento son sudeste (15%) y oeste (4%).

6.2 Modelo Numérico

El modelo numérico empleado es el *Delft3D*. Gracias a su módulo *WAVE* se ha podido analizar la influencia del oleaje y el viento sobre el Delta. Para la aplicación del modelo se ha definido una malla (244x244 celdas) que cubre toda la zona, y mediante un proceso iterativo, se ha determinado el valor del coeficiente de Collins (medida de la fricción del fondo) para así calibrar el modelo. Tras cuatro simulaciones, se ha escogido el valor de 0.2 como el que mejor se ajusta. Se han simulado cuatro forzamientos de distinta intensidad, y se han comparado y analizado los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios.

6.3 Análisis de Escenarios

Para el análisis del régimen medio se ha calculado, para cada escenario, el histograma de frecuencias altimétricas y las funciones de densidad de Weibull, además de la resultante media anual (RMA) en cada uno de los puntos de control establecidos para cada escenario.

Los datos obtenidos han permitido medir la intensidad de cada uno de estos temporales, y compararlos entre sí. El escenario que mayor cantidad de energía produce es el correspondiente al tercer temporal estudiado (mayor RMA), seguido del segundo, del primero, y por último de la semana sin temporales (cuarto escenario). En el Escenario 4, escenario en el cual no se produce ningún temporal, la altura significativa media es de 0.23 metros (50%), mientras que para el Escenario 3, dicha altura es de 0.46 metros (50%).

La existencia de un temporal, además de suponer una ocurrencia de un evento extremal en cuanto a alturas de ola, supone un aumento enorme en el transporte de sedimentos. Que en el periodo de estudio de casi siete años haya habido seis situaciones en las que se registraron oleajes mayores a tres metros, y con ello energías de arrastre de sedimentos también más altas de lo normal, hace que sea necesario prestar atención en la influencia de estos temporales en el Delta. Mediante la modelización y el estudio de datos históricos de diversas fuentes, se puede aproximar e intentar prever estos eventos extremos, para así actuar de manera inminente.

En el caso de que otros escenarios extremales ocurran, se podrían tomar las propuestas de actuación descritas en el apartado 6.4.

6.4 Propuestas de Actuación

Como solución al problema de la erosión y la falta de sedimentos, se ha desarrollado el Plan Integral de Protección del Delta del Ebro, junto con el proyecto de recuperación ambiental de la Barra del Trabucador. En la Figura 6.1 se puede observar la situación de la Barra en verde, así como las zonas de extracción y vertido de sedimentos para la recuperación del Delta:

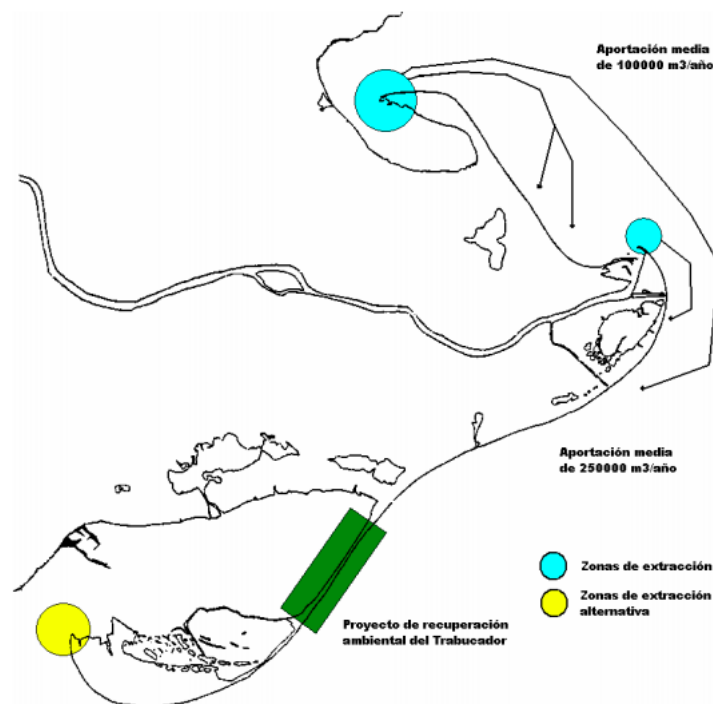


Figura 6.1 Zonas de extracción y de vertido de sedimento propuestas por el Plan Integral de Protección del Delta del Ebro.

Otra solución complementaria a la anterior contemplada es la eliminación de los sedimentos acumulados en los numerosos embalses existentes a lo largo de todo el curso del Ebro: *'Se estima que en las próximas*

décadas más del 50% de la capacidad de almacenamiento de los embalses de agua del mundo puede verse reducida debido a la sedimentación y colmatación, por tanto, las prácticas de gestión de los sedimentos deberían ser mejoradas', (www.ecoticias.com, El Periódico Verde, 2018).

En la cuenca del Ebro existen unos 135 embalses. Los de Ribera-roja, Mequinenza y Flix son los que acarrean problemas mayores de colmatación (Figura 6.2). Para su eliminación, se proponen los siguientes métodos:

- Arrastre controlado con bajo nivel de embalse y apertura de desagües de fondo o flushing.
- Transporte con barcazas o gánguiles en los embalses.
- Transporte con tubería a presión, ya sea con bombeo o por gravedad.
- Transporte por carretera o ferrocarril.

Teniendo en cuenta los costes aproximados de transporte de sedimentos, en $/m^3$, que se encuentran recogidos en la tabla de la Figura 6.3, el método de arrastre controlado sería el que posee un coste unitario menor.

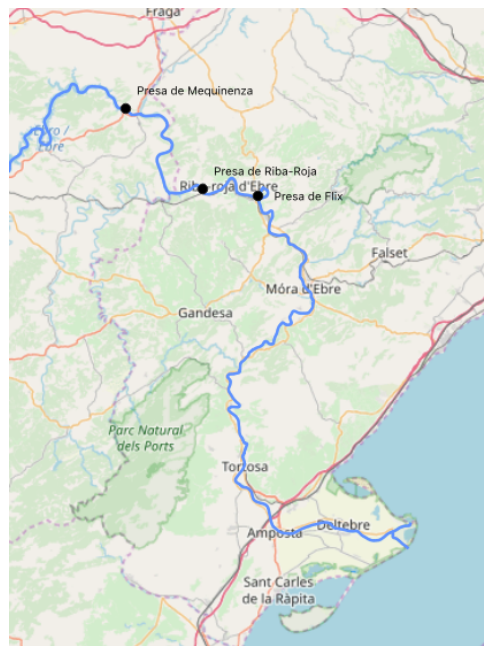


Figura 6.2 Localización de las Presas del curso bajo del Ebro que acumulan mayor cantidad de sedimentos.

	Mequinenza	Ribera-roja	Flix	Coste adicional
Gánguil	5.5	2.3	0.90	Cruce de presas
Carretera		29.2		Muelles
Carretera		12.2		Muelles
Ferrocarril		-		Derivación, muelles
Tubería sin bombeo	3.6	1.4	0.57	Cruce de presas por desagüe
Tubería con bombeo	4.9	1.0	0.38	
Arrastre controlado	-	0.54	-	

Figura 6.3 Costes de transporte de sedimentos en $/m^3$ sin tener en cuenta la extracción artificial (Martín Vide, 2004).

Estas medidas serían útiles para restaurar el caudal sólido del río, así como para asegurar la conservación del Delta del Ebro y de su enorme biodiversidad.

Apéndices

Apéndice A

Red de Datos de Puertos del Estado

A.1 Red de Datos REDEXT

Las boyas de tipo SeaWatch constituyen una plataforma estable en la que se pueden mantener una serie de instrumentos para la medida y monitorización en tiempo real del entorno marino. El despliegue, mantenimiento y explotación de estos aparatos constituye el núcleo principal de la Red de Aguas Profundas de puertos del Estado.

Las boyas constan de una parte central de forma lenticular, que proporciona flotabilidad y aloja el ordenador y diversos equipos electrónicos, y de tres mástiles o soportes verticales de 6 metros de largo, ubicados de forma tal que la mitad de su longitud queda por encima del agua (proporcionando soporte para los sensores meteorológicos) y la otra mitad por debajo (alojando los sensores oceanográficos). Las baterías que proporcionan energía al conjunto se alimentan a través de placas solares. La longitud total de la boya (incluyendo los sensores) es de unos 6.5 m, su diámetro de 1.8 m y su peso aproximado de 600 Kg (Puertos del Estado, 2016).

De la red de Boyas se obtienen los siguientes datos:

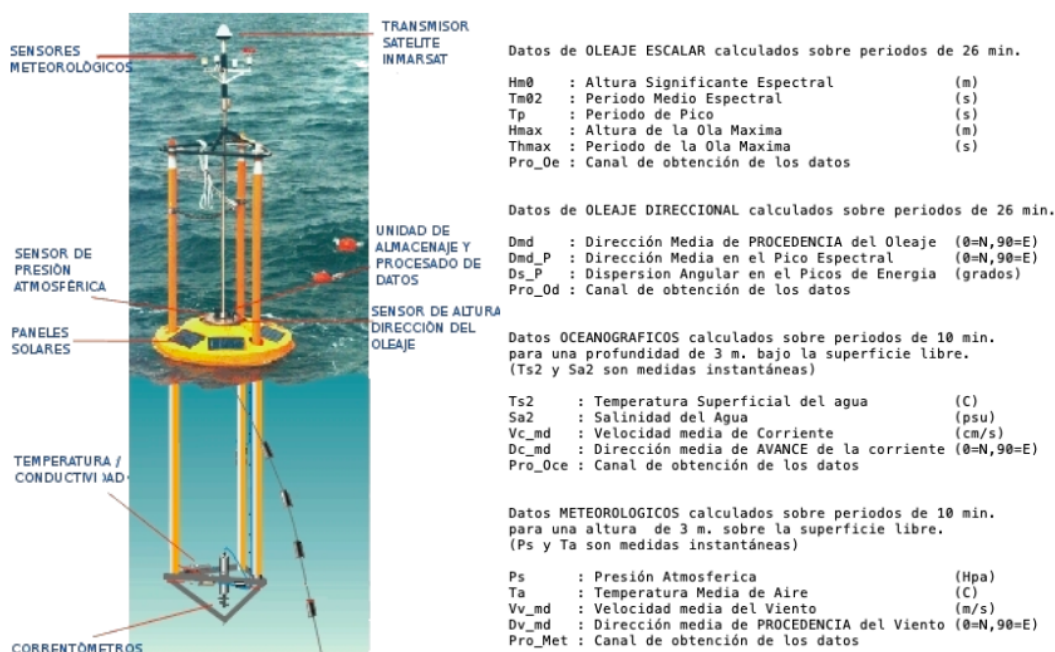


Figura A.1 Boya de aguas profundas de Tarragona (tipo SeaWatch).

A.2 Red de Datos REDMAR

El conjunto de datos REDMAR está formado por las medidas procedentes de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado. Tiene como finalidad primordial medir, grabar, analizar y almacenar de forma continua el nivel del mar en los puertos, siendo el acceso a los datos en tiempo real uno de sus aspectos primordiales. Las estaciones más antiguas proporcionan datos desde Julio de 1992. En la actualidad esta red cuenta con más de 30 estaciones en funcionamiento.

El dato de nivel del mar en tiempo real es utilizado para la realización de dragados o para la navegación en el interior de algunos puertos. Las series históricas que la red de mareógrafos proporciona permiten afrontar el estudio del régimen extremo y medio, que sirven de referencia a la hora de proyectar una obra en la costa; seguimiento del cero del puerto o nivel de referencia, obtención de constantes armónicas más precisas para la realización de las tablas de marea (o predicción de marea astronómica), conocimiento de la componente meteorológica del nivel del mar en caso de tormenta, estudio de la evolución del nivel medio del mar, calibración de modelos numéricos de corrientes y mareas, calibración de datos de altimetría espacial, etc. (Puertos del Estado, 2015).



Figura A.2 Mareógrafo de Tarragona.

Obtención de Datos

De manera general, los sensores acústicos y de presión de la REDMAR proporcionaban datos brutos cada 5 minutos que son enviados a una estación receptora ubicada en la Autoridad Portuaria. Posteriormente, mediante correo electrónico dicha información llegaba a Puertos del Estado con una periodicidad de una hora.

Los datos obtenidos de la red de mareógrafos son los siguientes:

- Nivel del mar
- Residuo meteorológico (horario)
- Extremos
- Niveles medios
- Carreras de marea
- Constantes armónicas

A.3 Red de datos SIMAR

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR-44 y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

Este trabajo de fusión se ha aprovechado para ampliar también la cobertura espacial, ampliando considerablemente el lote de puntos disponibles tanto en el Mar Mediterráneo como en el Océano Atlántico, en aguas abiertas como en costa, llegando a ofrecer datos a escala portuaria.

Subconjunto SIMAR-44

El conjunto SIMAR-44 se constituye a partir de modelado numérico de alta resolución de atmósfera, nivel del mar y oleaje que cubre todo el entorno litoral español. La simulación de atmósfera y oleaje en la cuenca mediterránea han sido realizadas por Puertos del Estado en el marco del Proyecto Europeo HIPOCAS. Los datos del dominio Atlántico y el Estrecho de Gibraltar proceden de dos simulaciones análogas de oleaje y viento, una realizada por Puertos del Estado de forma independiente y la otra por el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA).

Cada agente simulado se ha generado de la siguiente manera:

- Viento: modelo atmosférico regional REMO, integrado utilizando una malla de unos 50x50 km con un paso de tiempo de 5 minutos. Los datos son medidos a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.
- Oleaje: modelo numérico WAM, usando una malla de 25x25 km.

Subconjunto WANA

Las series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelado y consistente con las observaciones realizadas.

Es importante tener en cuenta que las series temporales de viento y oleaje del conjunto WANA no son homogéneas, pues los modelos de viento y oleaje se van modificando de modo periódico para introducir mejoras. Estas mejoras han permitido, entre otras cosas, aumentar la resolución espacial y temporal de los datos a partir de los cuales se genera la información del conjunto WANA.

Los modelos numéricos empleados para el cálculo de las series de viento y oleaje son los siguientes:

- Viento: se ha utilizado el modelo atmosférico HIRLAM, de AEMET. Los datos de viento son medidos a 10 metros de altura del nivel del mar.
- Oleaje: se han utilizado dos modelos, WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo HIRLAM

Apéndice B

Módulo WAVE

B.1 Contexto físico: Ecuaciones WAVE/SWAN

En el Capítulo 4 - Modelo Numérico se expuso la ecuación de balance de acción espectral:

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{B.1})$$

Siendo:

- $\frac{\partial}{\partial t}N$ la variación de la densidad de la acción en el tiempo.
- $\frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N$ la propagación de la acción en el espacio geográfico.
- $\frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N$ el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a variaciones en las profundidades y corrientes.
- $\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N$ la refracción inducida por la profundidad y la corriente.

El término del lado derecho de la ecuación de balance representa los efectos de la generación, disipación e interacciones onda-onda no lineales. Se compone de los siguientes sumandos:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (\text{B.2})$$

B.1.1 Transferencia de energía al oleaje debida al viento

El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar. La transferencia de dicha energía a las olas se describe en SWAN con un mecanismo de resonancia (Phillips, 1957) y un mecanismo de retroalimentación (Miles, 1957).

La expresión del término fuente correspondiente a la transmisión de energía debida al viento se encuentra constituida por la suma de un término lineal A más un término de crecimiento exponencial B:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (\text{B.3})$$

en el que A y B dependen de la frecuencia y dirección de las olas, y la velocidad y dirección del viento. Los efectos de las corrientes se contabilizan en SWAN utilizando la aparente velocidad y dirección del viento local.

La expresión para el término A se debe a Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981) con un filtro para evitar el crecimiento a frecuencias más bajas que la frecuencia de Pierson-Moskowitz (Tolman, 1992a).

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^3} (U_* \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad (\text{B.4})$$

donde θ_w es la dirección del viento, H es un filtro para eliminar el crecimiento del oleaje a frecuencias menores que la frecuencia de Pierson-Moskowitz y viene dado por:

$$H = \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right] \quad (B.5)$$

y donde σ_{PM}^* es la frecuencia pico del estado de mar completamente desarrollado y reformulado en términos de la velocidad friccional:

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (B.6)$$

Se usan dos expresiones opcionales para el coeficiente B en el modelo. La primera está tomada de una versión anterior del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 3 (1988)). Se debe a Snyder et al. (1981), reescalada en términos de velocidad de fricción U por Komen et al. (1984) La segunda expresión para B en SWAN se toma de la versión más reciente del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 4, Komen et al. (1994)). Se debe a Janssen (1991a) y explica explícitamente la interacción entre el viento y las olas al considerar los efectos de la capa límite atmosférica y la longitud de la rugosidad de la superficie del mar. El conjunto correspondiente de ecuaciones se resuelve (como en el modelo WAM) con el procedimiento iterativo de Mastenbroek et al. (1993).

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max [0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \cdot \sigma \quad (B.7)$$

- c_{ph} : Velocidad de fase [m/s]
- ρ_a : Densidad del aire [kg/m³]
- ρ_w : Densidad del agua [kg/m³]
- U_* : Velocidad de fricción [m/s]
- θ : Dirección de propagación del oleaje [°]
- θ_w : Dirección del viento [°]
- β es la constante de Miles, que se calcula de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda_h \ln^4(\lambda_h) \quad \lambda_h \leq 1 \quad (B.8)$$

$$\lambda_h = \frac{gz_e}{c_{ph}^2} e^r \quad r = \frac{\kappa c}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (B.9)$$

siendo κ la constante de Von Karman de valor 0.41 y z_e la longitud de rugosidad efectiva. En el caso de que la altura crítica adimensional $\lambda_h \geq 1$, la constante de Miles $\beta = 0$.

Cabe señalar que el modelo SWAN es un modelo computacional que trabaja con la velocidad del viento a 10 metros de altura sobre la superficie U_{10} , mientras que los cálculos utilizan la velocidad de fricción U_* . Para la formulación WAM Cycle 3, la transformación de U_{10} a U_* se obtiene con:

$$U_*^2 = CD \cdot U_{10}^2 \quad (B.10)$$

B.1.2 Interacciones no lineales entre olas

Se consideran dos casos para las interacciones no lineales entre olas:

Interacciones entre cuadrupletes

Se trata de interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas que intercambian energía entre ellas si se dan ciertas condiciones. Este tipo de interacciones es de mayor importancia en aguas profundas.

La interacción onda-onda se calcula mediante la aproximación propuesta por Hasselman et al. (1985). Su término fuente se ha utilizado en el modelo SWAN. En la Aproximación de Interacción Discreta se consideran dos cuádrupletes de números de onda, ambos con sus frecuencias:

$$\begin{aligned}\bar{k}_1 + \bar{k}_2 &= \bar{k}_3 + \bar{k}_4 \\ \bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 &= \bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_4\end{aligned}\quad (\text{B.11})$$

El término fuente es el definido por la siguiente expresión, que debido a su complejidad, no se desarrollará en este anexo:

$$S_{nl4} = (\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (\text{B.12})$$

Interacciones triádicas

Se trata de la interacción entre tres olas, en la que dos olas interactúan de manera lineal y le transfieren energía a una tercera. Este tipo de interacciones son de mayor importancia en aguas someras, mientras que en aguas de mayor profundidad su importancia es mucho menor.

En 1995 Eldeberky y Battjes consiguieron una aproximación para el cálculo de las interacciones triádicas, el DTA (Discrete Triad Approximation) (Eldeberky and Battjes, 1995). Partiendo del DTA, Eldeberky en 1996 modificó la formulación creando el LTA (Lumped Triad Approximation) (Eldeberky, 1996). El SWAN tiene implementado esta aproximación y su formulación es la siguiente:

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{B.13})$$

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max \left[0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta_i)| E^2 \left(\frac{\sigma}{2}, \theta \right) - 2E \left(\frac{\sigma}{2}, \theta \right) E(\sigma, \theta) \right] \quad (\text{B.14})$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{B.15})$$

Siendo α_{EB} un coeficiente de proporcionalidad, c la velocidad de la ola y c_g la velocidad de grupo. La bifase β tiene la siguiente expresión:

$$\beta_i = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left(\frac{0.2}{U_r} \right) \quad (\text{B.16})$$

y el número de Ursell U_r , se define como:

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (\text{B.17})$$

con:

- $\bar{T} = \frac{2\pi}{\bar{\sigma}}$ [s]
- H_s : altura de ola significativa. [m]
- d : calado [m].
- J : Coeficiente de Interacción (Madsen y Sorensen, 1993).

B.1.3 Disipación de energía en aguas profundas debido al whitecapping

El primer término de disipación que se va a definir es debido al whitecapping o decrestamiento. Es la ruptura de la ola inducida por la inclinación, que ocurre en aguas más profundas cuando la altura de la ola se vuelve demasiado grande en comparación con la longitud de onda. Esta rotura es fácilmente reconocible por la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

Delft3D permite elegir entre dos modelos: el de Komen et al. (1984) y el de Van der Westhuysen et al. (2007). Se ha optado por el segundo debido a que es más reciente y completa:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = f_{br}(\sigma) S_{dis,break} + [1 - f_{br}(\sigma)] S_{dis,non-break} \quad (\text{B.18})$$

Se compone de dos términos. El primero corresponde a la contribución a la disipación por rotura:

$$S_{dis,break}(\sigma, \theta) = C_{ds} \left[\frac{B(k)}{B_r} \right]^{\frac{p}{2}} [\tanh(kd)]^{\frac{2-p}{4}} g^{\frac{1}{2}} k^{\frac{1}{2}} E(\sigma, \theta) \quad (\text{B.19})$$

- C_{ds} : constante de valor 5×10^{-5} .
- $B(k) = \int_0^{2\pi} k^4 \phi(k, \theta) d\theta$: saturación espectral.
- B_r : constante (Nivel de saturación espectral), de valor 1.75×10^{-3} .
- k : Número de onda.
- d : calado [m]
- $p \left(\frac{u_*}{c} \right) = 3 + \tanh \left[25 \left(\frac{u_*}{c} - 0.1 \right) \right]$
- g : gravedad [m/s^2].
- $E(\sigma, \theta)$: espectro de densidad de energía.

El segundo corresponde a una contribución más débil de no rotura:

$$S_{dis,non-break}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left(\frac{k}{\tilde{k}} \right)^q \left(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right) \tilde{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (\text{B.20})$$

- C'_{ds} : constante de valor 2.36×10^{-5} .
- $\tilde{k} = \left[E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} df rac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-2}$: número de ondas medio, siendo $E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$ la energía total.
- $\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}}$: pendiente media del oleaje.
- \tilde{s}_{PM} : constante de valor $\sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$
- ryq : constantes que valen respectivamente 4 y 1.
- $\tilde{\sigma} = \left[E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} df rac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-1}$: frecuencia media

Por último, el término $f_{br}(\sigma)$ se define como:

$$f_{br}(\sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left[10 \left(\left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{1/2} - 1 \right) \right] \quad (\text{B.21})$$

B.1.4 Disipación debida a la rotura por disminución de profundidad

SWAN utiliza el modelo de Battjes y Janssen (1978):

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} = \frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (\text{B.22})$$

- D_{tot} : tasa media de disipación de energía por unidad horizontal debida a la rotura.
- α_{BJ} : constante a calibrar. Su valor por defecto es 1.
- Q_b tal que $\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2}$: fracción de olas que rompen
- $H_m^2 = \gamma d$, siendo γ un parámetro de rotura a calibrar.

B.1.5 Disipación de energía por fricción con el fondo

Los modelos de fricción de fondo que se utilizan en SWAN son el modelo empírico de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), el modelo de la ley de arrastre de Collins (1972) y el modelo empírico de Madsen et al., (1988).

Las formulaciones de los tres modelos de fricción con el fondo comparten la expresión general:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (B.23)$$

En este estudio se ha utilizado el modelo de Collins (1972). Según Collins el coeficiente de fricción se define:

$$C_{bottom} = C_{fw} g U_{rms} \quad (B.24)$$

- C_{bottom} : coeficiente de fricción. Este valor es el que habrá que introducir en el programa.
- C_{fw} : constante a calibrar.
- $U_{rms} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma}{2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$ movimiento orbital de fondo

B.2 Parámetros del Modelo

B.2.1 Description

Se puede adjuntar una breve descripción a la simulación para simplificar y organizar el trabajo. Se permite introducir como máximo tres líneas de 72 caracteres cada una.

B.2.2 Hydrodynamics

Aquí hay que especificar si la simulación WAVE va a llevarse a cabo de manera independiente (Standalone) o de manera conjunta con FLOW. En este caso es WAVE Standalone.

B.2.3 Grids

Computational Grid

Se especifica la malla computacional sobre la cual SWAN resolverá las ecuaciones de balance. El archivo a introducir tiene extensión *.grd*. Las mallas se definen con el sistema de referencia representado en la Figura B.1:

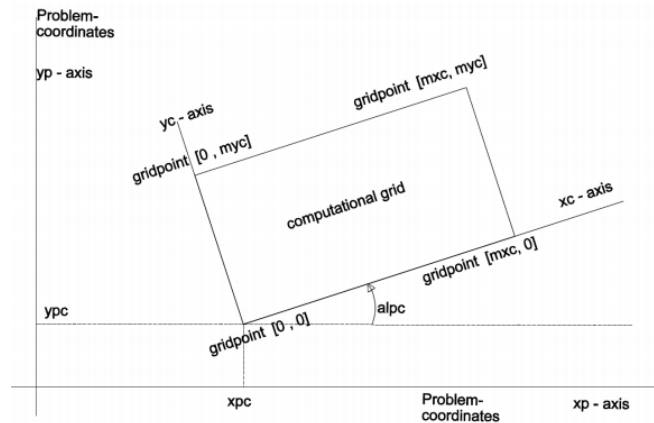


Figura B.1 Sistema de Referencia.

Bathymetry

Se adjunta la batimetría para la malla obtenida de la interpolación de esta con el *.xyz* original. El archivo tiene la extensión *.dep*.

Spectral resolution

Este apartado se divide en dos partes:

- Directional space: se especifica el número de partes en que se puede dividir la circunferencia a la hora de considerar las direcciones.
- Frequency space: aquí hay que especificar la frecuencia más baja y la más alta que se considera para el oleaje (los periodos mayores y menores que se tendrán en cuenta en el cálculo del oleaje).

Nesting

Al tener una única malla, este apartado no aplica.

Hydrodynamics

Este apartado sirve para indicarle al programa cómo utilizar los datos provenientes del módulo FLOW. Por tanto, no aplica.

B.2.4 Time Frame

Se define el período de tiempo de estudio en formato [dd mm aaaa hh mm ss]. Estas fechas deben coincidir con las introducidas en el archivo *wavecon*.

B.2.5 Boundaries

Existen distintas formas de introducir las condiciones de contorno en el modelo: por dirección, por coordenadas, por celdas, etc. En este modelo se ha introducido mediante orientación sureste. Con esta opción el programa interpreta que los datos de oleaje introducidos al modelo entran por aquellos bordes de la malla cuyas normales se aproximan más a la orientación oeste.

B.2.6 Obstacles

Esta opción permite añadir obstáculos al modelo en zonas donde haya muros de contención de escollera, muros sumergidos, etc. Al no existir obras marítimas cercanas por tratarse éste de una zona protegida, no aplica.

B.2.7 Physical Parameters

Es uno de los apartados más importantes de todo el programa, es el que más se modificará para intentar calibrar el modelo numérico ya que son estos parámetros físicos los que controlan en mayor medida el correcto funcionamiento del modelo.

Constantes

Se han de especificar los siguientes valores:

- Gravedad: $9.81m/s^2$
- Densidad del agua del mar: $1025kg/m^3$
- Posición del eje X respecto al norte: 90, el eje X señala al norte.
- Profundidad mínima: $0.05m$
- Sistema de coordenadas: cartesiano
- Fuerzas: Ratio de disipación de energía del oleaje

Processes

- Generation: se utilizará el modelo de tercera generación. Estos modelos se caracterizan por contar con métodos de aproximación discreta en lugar de formulaciones paramétricas simples (Hasselmann, 1985). Esto significa que la ecuación a resolver tiene tantos grados de libertad como valores haya en el espectro ya discretizado.
- Depth induced breaking: Es necesario calibrar los siguientes parámetros: α (ratio de disipación) y γ (parámetro dependiente de la pendiente del fondo).
- Non-linear triad, LTA: los parámetros que han de definirse son: α , que es el valor del coeficiente de proporcionalidad α_{EB} , y β que determina el ratio entre la máxima frecuencia y la frecuencia principal para las cuales las interacciones son calculadas. Para su obtención, se han utilizado como referencia inicial modelos similares en localizaciones cercanas y se han ajustado posteriormente. Ref: Ecuaciones B.13, B.14 y B.15.
- Bottom friction: para la fricción en el fondo se emplea el modelo de Collins. Este parámetro es el más sensible a la hora de calibrar el modelo.
- Diffraction: una vez activada esta opción, hay que definir el coeficiente de suavizado y el número de pasos de suavizado.

Various

Se pueden activar o desactivar una serie de procesos tales como, el crecimiento de la ola debido al viento (wind growth), cuádrupletes (quadruplets) y descrestamiento (whitecapping). Para este proyecto solo se activa la opción de descrestamiento y se selecciona el modelo de Van der Westhuysen de las dos opciones posibles.

B.2.8 Numerical Parameters

De este apartado únicamente se han modificado la precisión de convergencia que viene indicado como el tanto por ciento de puntos húmedos en los que el modelo debe converger, por defecto, 98% y el número máximo de iteraciones que se deben realizar en cada paso o barrido, se han elegido 30.

El procedimiento consiste en que, al ejecutar la simulación, el programa realiza la primera iteración. Dentro de cada iteración se realizan cuatro barridos, y una vez que acaban, se da un valor que indica la cantidad de puntos húmedos en los que el modelo ha convergido, debiéndose alcanzar el valor que se le haya indicado. El modelo finaliza cuando se alcance la cantidad mínima de puntos donde exista una convergencia garantizada o bien cuando se alcance el número máximo de iteraciones.

Como ejemplo se muestra el Código B.1:

Código B.1 Ejemplo de informe de simulación que indica cada barrido (sweep) e iteración (iteration) con el porcentaje de celdas que convergen..

```
iteration 1; sweep 1
iteration 1; sweep 2
iteration 1; sweep 3
iteration 1; sweep 4
accuracy OK in 0.27 % of wet grid points ( 98.00 % required)

iteration 2; sweep 1
iteration 2; sweep 2
iteration 2; sweep 3
iteration 2; sweep 4
accuracy OK in 46.60 % of wet grid points ( 98.00 % required)

iteration 3; sweep 1
iteration 3; sweep 2
iteration 3; sweep 3
iteration 3; sweep 4
accuracy OK in 64.20 % of wet grid points ( 98.00 % required)

...
```

B.2.9 Output Curves

Se ha dejado por defecto. No aplica.

B.2.10 Output Parameters

El modo computacional que se ha elegido es el estacionario, cada estado de mar es independiente del otro y sus condiciones son estacionarias; hay que especificar dónde se quieren obtener los resultados. Se pueden especificar puntos de control donde se obtendrían datos en función del tiempo.

El programa ofrece dos formas de presentar los resultados, una de ellas es mediante una gráfica donde asigna a cada punto de la malla un dato de altura de ola, periodo, etc. Otra es en forma de tabla, en la que para cada punto de control que se introduzca mediante coordenadas UTM obtendremos los datos de salida en dicho punto específicamente.

Este procedimiento es el utilizado a la hora de calibrar el modelo.

B.2.11 Additional Parameters

No aplica.

Apéndice C

Códigos de MatLab empleados

Código C.1 Lectura de datos batimétricos.

```
clear all
close all
clc

%% BATIMETRIA COSTA

%Para leer y poder obtener la informacion del fichero netCDF

%Primero damos el nombre
filename='grd_cst_delta_4m.nc';
%Luego, leemos el archivo
ncdisp(filename)

%Vemos como se llama cada variable. Para este caso:
long=ncread(filename,'lon_rho');
lat=ncread(filename,'lat_rho');
h=ncread(filename,'h');

%Convertimos las coordenadas geodesicas en UTM
[latUTM,longUTM]=fGeodesicas2UTMhuso(lat,long,'WGS84',31);

% Creamos una matriz de forma
MATRIX1=[latUTM(:) longUTM(:) h(:)];

fileID=fopen('batim.xyz','w');
fprintf(fileID, '%f\t%f\t%f\n',MATRIX1);
fclose(fileID);

%% BATIMETRIA TIERRA

datoTierra=xlsread('puntostierra.xlsx');

latTierra=datoTierra(:,1);
longTierra=datoTierra(:,2);
hTierra=datoTierra(:,3);
```

```
[latTierraUTM,longTierraUTM]=fUTM2Geodesicas(latTierra,longTierra,'WGS84',31);  
MATRIX2=[latTierra(:) longTierra(:) hTierra(:)];  
  
MATRIXEND=[MATRIX1;MATRIX2];  
  
%% GUARDAR ARCHIVO .XYZ CON LOS DATOS UNIDOS  
  
fileID=fopen('pruebabatimetria.xyz','w');  
fprintf(fileID, '%f\t%f\t%f\n',MATRIXEND);  
fclose(fileID);  
  
%% Para representarla, dos opciones  
% 1. Con contourf: vemos curvas de nivel de profundidades.  
  
figure  
hold on  
contourf(long',rot90(flip(lat)), flip(-h'))  
xlabel('Longitud en grados');  
ylabel('Latitud en grados');  
colorbar  
hold off  
  
% 2. Plot con MESH  
  
figure  
hold on  
mesh(long, lat,-h)  
xlabel('Longitud en grados');  
ylabel('Latitud en grados');  
zlabel('Profundidad en metros');  
hold off  
  
%% BUSCAR LINEA DE COSTA (Lugar geometrico de puntos con cota 0)  
  
LineaCosta=find(MATRIXEND(:,3)==0);  
  
MATRIXCOSTA=MATRIXEND(LineaCosta,:);  
  
% Ahora se exporta la matriz construida en formato .cus y se importa a QGis  
% para verla con un mapa web por detras.
```

Código C.2 Clima marítimo.

```

clear all
close all
clc

%% CLIMA MARITIMO

dato=load('SIMAR_711015017.txt');

%Ano, mes, dia y hora son 1, 2, 3 y 4
% Altura significativa de ola es 5
% Periodo pico es 7
% Direccion media de procedencia es 8

Y=dato(:,1);
M=dato(:,2);
D=dato(:,3);
H=dato(:,4);

N = datenum(Y, M, D, H, 0, 0);

AltSig=dato(:,5);
PerPico=dato(:,7);
DirMedia=dato(:,8);

largo = length(AltSig);

media=mean(PerPico);
for i=1:length(PerPico)
    if PerPico(i)<0
        PerPico(i)=media;
    end
end

Problema=find(DirMedia<0);
DirMedia(Problema)=0;

%% Serie Temporal

plot(N, AltSig)
datetick('x',12)
xlabel('Fecha de suceso')
ylabel('Altura significativa de ola')
title('Serie temporal de altura significativa de ola')

%% Altura Significante de Ola

% Histograma
[nAlt xAlt] = hist (AltSig,20);
bar(xAlt,nAlt*100/largo)
grid on
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');

```

```

title('Histograma de Frecuencias de Alturas de Ola');

% Grafico de Dispersion
scatter(AltSig,PerPico,'filled')
xlabel('Altura de Ola Significante [m]');
ylabel('Periodo Pico [s]');
title('Gráfico de Dispersión Hs-Tp');

%% Periodo Pico

% Histograma

[nPer xPer] = hist (PerPico,20);
bar(xPer,nPer*100/largo)
grid on
xlabel('Periodo Pico del Oleaje [s]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias del Periodo Pico');

% Grafico de Dispersion
scatter(PerPico,DirMedia,'filled')
xlabel('Periodo Pico [s]');
ylabel('Dirección Media de Procedencia [?, 0=N, 90=E]');
title('Gráfico de Dispersión Hs-Dmp');

%% Direccion Media del Oleaje

% Histograma

[nDir xDir] = hist (DirMedia,16);
bar(xDir,nDir*100/largo)
grid on
xlabel('Dirección Media de Procedencia [?, 0=N, 90=E]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de la dirección de procedencia del oleaje');

% Grafico de Dispersion
scatter(AltSig,DirMedia,'filled')
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Dirección Media de Procedencia [?, 0=N, 90=E]');
title('Gráfico de Dispersión Hs-Dmp');

%% Rosa del Oleaje

DirMedia2=DirMedia+180;

figure
wind_rose(DirMedia2,AltSig)
title('Rosa de Oleaje SIMAR 711015017');

%% REGIMEN MEDIO

% Con la herramienta Distribution Fitting se puede cargar el dato de AltSig

```



```

% y obtener la distribucion de Weibull que mas se ajuste. Cambiando el tipo
% de representacion (probabilidad y prob acumulada) se obtienen los
% graficos de la memoria. Luego, se exporta el plot de la App para abrirlo
% como plot normal y se pone bonito.

% En dicha app es donde se dan los parametros de Weibull a y b, tambien
% indicados en la memoria.

% Nota: para poder ajustar la Weibull, no podia haber datos nulos o
% negativos. Es por eso que he sustituido los 0 por 0.00001 para evitar
% problemas.

for i=1:length(AltSig)
    if AltSig(i)<=0
        AltSig(i)=0.00001;
    end
end

%% REGIMEN EXTREMAL (POT function)

umb=3; % Umbral elegido para el metodo

if exist('SIMAR_711015017.txt')==2
    A = load('SIMAR_711015017.txt');
else
    error('No se encuentra el archivo SIMAR_711015017.txt en el directorio
        actual');
end
N = datenum(A(:,1),A(:,2),A(:,3),A(:,4),0,0);
H = A(:,5); T = A(:,7); D = A(:,8);

disp(' ');
fprintf('Se han leído %.0f datos de oleaje\n',length(N));
disp(['Fecha inicial: ',datestr(N(1),0)]);
disp(['Fecha final: ',datestr(N(end),0)]);
disp(' ');

%% Calcula años meteorológicos disponibles -----%

Nini = datenum(A(1,1),9,1,0,0,0);
Aini = A(1,1);
if N(1)>Nini
    Nini = datenum(A(1,1)+1,9,1,0,0,0);
    Aini = A(1,1)+1;
end

Nfin = datenum(A(end,1),8,31,21,0,0);
Afin = A(end,1);
if N(end)<Nfin
    Nfin = datenum(A(end,1)-1,8,31,21,0,0);
    Afin = A(end,1)-1;
end

nANIOS = floor((Nfin-Nini)/365);

fprintf('Hay %.0f años meteorológicos.\n',nANIOS);
disp(' ');

```

```

i = 1;
while N(i)<Nini
    i=i+1;
end
ID = [];
while N(i)<= Nfin
    ID = [ID;i];
    i = i+1;
end

A = A(ID,:); N = N(ID); H = H(ID); T = T(ID); D = D(ID);
disp('%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%');

%% Calcula pico sobre el umbral -----%

%% Saco tamaño de A
[m1,n] = size(A);
%% Transformo la matriz A en la forma:
%%   1   2   3   4   5
%% Fechanum Hmo Tp Dir Prof
A=[N H T D -999.*ones(m1,1)];

%% Salida gráfica:
graf=1;
if graf==1
    plot(A(:,1),A(:,2),'k.-',A(:,1),umb.*ones(size(A(:,1))),'b--')
    set(gca,'XTick',A(1,1):7:A(end,1));
    datetick('x',10)
    lim=max([umb,max(A(:,2))]); lim=ceil(lim)+0.5;
    ylim([0 lim]);
    %grid;
end

%% Verifico que el umbral corte a la serie de datos en alg?n momento. Sino
%% corto la ejecuci?n del programa y doy mensaje de error:
if max(A(:,2))<umb
    error('El umbral es mayor a todos los datos de la muestra')
elseif min(A(:,2))>umb
    error('El umbral es menor a todos los datos de la muestra')
end

%% Primero veo que la serie de datos no comience o termine con H>=Hmo; en
%% caso de que sea as? "acorto" la serie de modo tal que la nueva serie
%% comience y termine con Hmo<umb. Guardo la cantidad de horas "sacadas"
%% para calcular T (el porcentaje de tiempo en que Hmo>=umb.
if A(m1,2)>=umb
    i=m1;
    while A(i,2)>=umb
        i=i-1;
    end
    A=A(1:i,:);
end

if A(1,2)>=umb
    i=1;
    while A(i,2)>=umb

```

```

        i=i+1;
    end
    A=A(i:end,:);
end

[m,n]=size(A); T=(m1-m)*3;

%%% Reviso todo el vector y voy construyendo una tormenta cada vez que
%%% encuentro un dato de Hmo que sobrepasa el umbral.

i=1; k=1;
while i<=m

    % Detecta un comienzo de tormenta y entonces entra:
    if A(i,2)>=umb
        aux=[]; iini=i; j=1;
        while A(i,2)>=umb
            aux(j,:)=A(i,:); i=i+1; j=j+1;
        end
        ifin=i-1;
        % Calcula los datos del pico de la tormenta:
        [Hmax(k) ind]=max(aux(:,2)); Tpm(k)=aux(ind,3);
        Dirmax(k)=aux(ind,4); Profmax(k)=aux(ind,5);
        Fecha(k)=aux(ind,1);
        %Elementos para autocorrelaci?n, si el dato a las 24 hs se va
        %de la matriz (no hay dato disponible), entonces no pongo y
        %despu?s (al final) se rellena con ceros.
        if m>=iini+ind-1+8
            H6hs(k)=A(iini+ind-1+2,2); H12hs(k)=A(iini+ind-1+4,2);
            H18hs(k)=A(iini+ind-1+6,2); H24hs(k)=A(iini+ind-1+8,2);
        end
        % Calculo la duraci?n de la tormenta:
        t1=(A(iini,2)-umb)*3/(A(iini,2)-A(iini-1,2));
        t2=(A(ifin,2)-umb)*3/(A(ifin,2)-A(ifin+1,2));
        dur(k)=3*(j-2)+t1+t2;
        % En caso de que no sea la primera tormenta calculo el tiempo
        % entre tormentas:
        if k==1
            interv1=(iini-1)*3+3-t1;
            ifin2=ifin; t22=t2;
        else
            interv(k-1)=(iini-ifin2-2)*3+3-t22+3-t1;
            ifin2=ifin; t22=t2;
        end
        % Defino k siguiente:
        k=k+1;

    % Si no detecta comienzo de tormenta avanza:
    else
        i=i+1;
    end
end

% Relleno interu con el tiempo que queda desde la ?ltima tormenta hasta
% el final de la serie + el tiempo entre la primera tormenta y el
% principio de la serie:
interv(k-1)=interv1+(m-ifin-1)*3+3-t2;

```

```

%%%
%%% Armo la salida:
mmm=length(Hmax);
if length(H6hs)<mmm
    H6hs(mmm)=0; H12hs(mmm)=0; H18hs(mmm)=0; H24hs(mmm)=0;
end
R=[Hmax' Tpmax' Dirmax' dur' interv' Profmax' Fecha' H6hs' H12hs' H18hs'
    H24hs'];
T=T+sum(dur); N=k-1;

%%% Filtro asumiendo que entre tormentas debe existir al menos intMIN.
R = R(:,1:7);
[m,n]=size(R);
j=1;
intMIN=6;
for i=1:m
    if R(i,5)>intMIN
        R2(j,:)=R(i,:);
        j=j+1; Raux=[];
    else
        [a,b] = max(R(i:i+1,1));
        R(i+1,1:3) = R(i+b-1,1:3);
        R(i+1,end) = R(i+b-1,end);
        R(i+1,4) = R(i,4)+R(i,5)+R(i+1,4);
    end
end
R=R2;
hold on
plot(R(:,end),R(:,1),'or');
axis tight
dateaxis('x',11)
xlabel('Fecha')
ylabel('Altura de ola (m)')
grid on

%%% CREACION VECTORES DE TEMPORALES

Posic=find(AltSig>=3);
Supera=AltSig(Posic);

[nSup, xSup] = hist (Supera,15);
bar(xSup,nSup*100/length(Supera))

% El primero es el 16 de Noviembre de 2013. Sacamos del dato de SIMAR este
% grafico. Rellenamos en el vector T1 dos columnas, la primera con las
% alturas de ola y la segunda con una columna horaria [1 2 3 4 5 .... ]

T1=[];
Threshold=3.*ones(166,1); % en la dimension del vector de ones el primer
                          %valor debe coincidir con el length del T1

figure
axes1 = axes('Parent',figure);
hold(axes1,'on');
plot(T1(:,2),T1(:,1))
plot(T1(:,2),Threshold)
xlabel({'Tiempo [h]'});

```

```

title({'SEMANA SIN TEMPORALES'}, 'FontSize', 14); % Aqui solo cambiar el titulo
ylabel({'Hs [m]'});

%% VELOCIDAD DEL VIENTO

VelV=dato(:,17);

NoValido=find(VelV<0);
VelV(NoValido)=0;

% Histograma
[nVelV, xVelV] = hist (VelV,20);
bar(xVelV,nVelV*100/largo)
grid on
xlabel('Velocidad media del viento [m/s]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de la velocidad del viento');

%% DIRECCION DE PROCEDENCIA DEL VIENTO

DirV=dato(:,18);
NoValido=find(DirV<0);
DirV(NoValido)=0;

% Histograma
[nDirV, xDirV] = hist (DirV,16);
bar(xDirV,nDirV*100/largo)
grid on
xlabel('Direcci?n media de procedencia del viento [?, 0=N, 90=E]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de la direcci?n de procedencia');

% Grafico de Dispersion
scatter(VelV,DirV,'filled')
xlabel('Velocidad media del viento [m/s]');
ylabel('Direcci?n media de procedencia del viento [?, 0=N, 90=E]');
title('Gr?fico de Dispersi?n VelV-DirV');

%% ROSA DEL OLEAJE DEL VIENTO

DirMedia2=DirMedia+180;

figure
wind_rose(DirV,VelV)
title('Rosa de Viento SIMAR 711015017');

```

Código C.3 Creación del archivo Wavecon para las condiciones de contorno.

```

clear all
close all
clc

%% Búsqueda de fechas

format SHORTENG

simar=load('SIMAR_711015017.txt'); % Punto SIMAR 717...

YSimar=simar(:,1);
MSimar=simar(:,2);
DSimar=simar(:,3);
HSimar=simar(:,4);

NSimar = datenum(YSimar, MSimar, DSimar, HSimar, 0, 0);
clear YSimar MSimar DSimar HSimar

mareog=load('MAREOGRAFO.txt'); % Mareografo

YMareog=mareog(:,1);
MMareog=mareog(:,2);
DMareog=mareog(:,3);
HMareog=mareog(:,4);

NMareog = datenum(YMareog, MMareog, DMareog, HMareog, 0, 0);
clear YMareog MMareog DMareog HMareog

%% Para el primer escenario

iSimar1=find(NSimar==datenum(2013,11,16,0,0,0));
iMareog1=find(NMareog==datenum(2013,11,16,0,0,0));

fSimar1=find(NSimar==datenum(2013,11,18,0,0,0));
fMareog1=find(NMareog==datenum(2013,11,18,0,0,0));

D1=[0:60:(fSimar1-iSimar1)*60]';
Hs1=simar([iSimar1:fSimar1],5);
Tp1=simar([iSimar1:fSimar1],7);
Dm1=simar([iSimar1:fSimar1],8);
ms1=ones(length(D1),1);
w11=mareog([iMareog1:fMareog1],5)./100;
Vv1=simar([iSimar1:fSimar1],17);
Dv1=simar([iSimar1:fSimar1],18);

wavecon1=[D1 Hs1 Tp1 Dm1 ms1 w11 Vv1 Dv1];
clear D1 Hs1 Tp1 Dm1 ms1 w11 Vv1 Dv1 iSimar1 iMareog1 fSimar1 fMareog1

%% Para el segundo escenario

iSimar2=find(NSimar==datenum(2015,10,31,20,0,0));
iMareog2=find(NMareog==datenum(2015,10,31,20,0,0));

```

```

fSimar2=find(NSimar==datenum(2015,11,04,23,0,0));
fMareog2=find(NMareog==datenum(2015,11,02,05,0,0)); % Es hasta el 4 de Nov a
    las 23:00 pero no hay datos suficientes.

D2=[0:60:(fSimar2-iSimar2)*60]';
Hs2=simar([iSimar2:fSimar2],5);
Tp2=simar([iSimar2:fSimar2],7);
Dm2=simar([iSimar2:fSimar2],8);
ms2=ones(length(D2),1);
w121=mareog([iMareog2:fMareog2],5)./100;
w12=[w121;w121;w121(1:end-2)];
Vv2=simar([iSimar2:fSimar2],17);
Dv2=simar([iSimar2:fSimar2],18);

wavecon2=[D2 Hs2 Tp2 Dm2 ms2 w12 Vv2 Dv2];
clear D2 Hs2 Tp2 Dm2 ms2 w121 w12 Vv2 Dv2 iSimar2 iMareog2 fSimar2 fMareog2

%% Para el tercer escenario

iSimar3=find(NSimar==datenum(2017,01,16,19,0,0));
iMareog3=find(NMareog==datenum(2017,01,16,19,0,0));

fSimar3=find(NSimar==datenum(2017,01,24,18,0,0));
fMareog3=find(NMareog==datenum(2017,01,24,18,0,0));

D3=[0:60:(fSimar3-iSimar3)*60]';
Hs3=simar([iSimar3:fSimar3],5);
Tp3=simar([iSimar3:fSimar3],7);
Dm3=simar([iSimar3:fSimar3],8);
ms3=ones(length(D3),1);
w13=mareog([iMareog3:fMareog3],5)./100;
Vv3=simar([iSimar3:fSimar3],17);
Dv3=simar([iSimar3:fSimar3],18);

wavecon3=[D3 Hs3 Tp3 Dm3 ms3 w13 Vv3 Dv3];
clear D3 Hs3 Tp3 Dm3 ms3 w13 Vv3 Dv3 iSimar3 iMareog3 fSimar3 fMareog3

%% Para el cuarto escenario

iSimar4=find(NSimar==datenum(2017,03,01,0,0,0));
iMareog4=find(NMareog==datenum(2017,03,01,0,0,0));

fSimar4=find(NSimar==datenum(2017,03,07,23,0,0));
fMareog4=find(NMareog==datenum(2017,03,07,23,0,0));

D4=[0:60:(fSimar4-iSimar4)*60]';
Hs4=simar([iSimar4:fSimar4],5);
Tp4=simar([iSimar4:fSimar4],7);
Dm4=simar([iSimar4:fSimar4],8);
ms4=ones(length(D4),1);
w14=mareog([iMareog4:fMareog4],5)./100;
Vv4=simar([iSimar4:fSimar4],17);
Dv4=simar([iSimar4:fSimar4],18);

```

```
wavecon4=[D4 Hs4 Tp4 Dm4 ms4 w14 Vv4 Dv4];  
clear D4 Hs4 Tp4 Dm4 ms4 w14 Vv4 Dv4 iSimar4 iMareog4 fSimar4 fMareog4  
  
%% Guardar el archivo .txt  
  
dlmwrite('wavecon1', wavecon1, 'delimiter','\t','newline','pc')  
dlmwrite('wavecon2', wavecon2, 'delimiter','\t','newline','pc')  
dlmwrite('wavecon3', wavecon3, 'delimiter','\t','newline','pc')  
dlmwrite('wavecon4', wavecon4, 'delimiter','\t','newline','pc')
```


Código C.4 Estudio de los diferentes escenarios mediante los datos obtenidos de la simulación realizada en Delft3D.

```

clear all
close all
clc

%% ESTUDIO ESCENARIO i

Hs=load('hsig_wave_height_escenario3.mat');
Dir=load('directional_spreading_escenario3.mat');
L=load('mean_wave_length_escenario3.mat');
Tp=load('mean_wave_period_T_escenario3.mat');
Alpha=load('hsig_wave_vector_mean_direction_escenario3.mat');

Hs1=Hs.data.Val(:,24,162);
Hs2=Hs.data.Val(:,57,190);
Hs3=Hs.data.Val(:,147,168);
Hs4=Hs.data.Val(:,197,170);

Dir1=Dir.data.Val(:,24,162)-90; % Se resta 90 porque los datos son angulos
    clockwise from north, y matlab los representa from east.
Dir2=Dir.data.Val(:,57,190)-90;
Dir3=Dir.data.Val(:,147,168)-90;
Dir4=Dir.data.Val(:,197,170)-90;

L1=L.data.Val(:,24,162);
L2=L.data.Val(:,57,190);
L3=L.data.Val(:,147,168);
L4=L.data.Val(:,197,170);

Tp1=Tp.data.Val(:,24,162);
Tp2=Tp.data.Val(:,57,190);
Tp3=Tp.data.Val(:,147,168);
Tp4=Tp.data.Val(:,197,170);

AX1=Alpha.data.XComp(:,24,162);
AX2=Alpha.data.XComp(:,57,190);
AX3=Alpha.data.XComp(:,147,168);
AX4=Alpha.data.XComp(:,197,170);

AY1=Alpha.data.YComp(:,24,162);
AY2=Alpha.data.YComp(:,57,190);
AY3=Alpha.data.YComp(:,147,168);
AY4=Alpha.data.YComp(:,197,170);

[nHs1,xHs1] = hist (Hs1,[0:0.5:4]);
[nHs2,xHs2] = hist (Hs2,[0:0.5:4]);
[nHs3,xHs3] = hist (Hs3,[0:0.5:4]);
[nHs4,xHs4] = hist (Hs4,[0:0.5:4]);

%% Representacion Altura de Ola

figure
subplot(2,2,1)
plot(Hs1)

```

```
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Altura Significante de Ola [m]');
title('Alturas de Ola en el Punto 1');

subplot(2,2,2)
plot(Hs2)
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Altura Significante de Ola [m]');
title('Alturas de Ola en el Punto 2');

subplot(2,2,3)
plot(Hs3)
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Altura Significante de Ola [m]');
title('Alturas de Ola en el Punto 3');

subplot(2,2,4)
plot(Hs4)
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Altura Significante de Ola [m]');
title('Alturas de Ola en el Punto 4');

%% Representacion Histogramas

figure
subplot(2,2,1)
bar(xHs1,nHs1*100/length(Hs1))
grid on
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de Alturas de Ola en el Punto 1');

subplot(2,2,2)
bar(xHs2,nHs2*100/length(Hs2))
grid on
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de Alturas de Ola en el Punto 2');

subplot(2,2,3)
bar(xHs3,nHs3*100/length(Hs3))
grid on
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de Alturas de Ola en el Punto 3');

subplot(2,2,4)
bar(xHs4,nHs4*100/length(Hs4))
grid on
xlabel('Altura Significante de Ola [m]');
ylabel('Porcentaje de ocurrencia (%)');
title('Histograma de Frecuencias de Alturas de Ola en el Punto 4');

%% Representacion Rosas Oleaje
```

```
wind_rose(Dir1,Hs1)
title('Rosa de Oleaje el Punto 1');

wind_rose(Dir2,Hs2)
title('Rosa de Oleaje el Punto 2');

wind_rose(Dir3,Hs3)
title('Rosa de Oleaje el Punto 3');

wind_rose(Dir4,Hs4)
title('Rosa de Oleaje el Punto 4');

%% Representacion Weibull Fitting Distribution

subplot(2,2,1)
Wb11 = fitdist(Hs1,'Weibull');
h = histogram(Hs1,[0:0.5:4],'Normalization','pdf','FaceColor',[.9 .9 .9]);
xlabel('Hs [m]');
ylabel('Densidad de Probabilidad');
title('Func Dens Weibull de Hs en 1');
xgrid = linspace(0,4,100)';
pdfEst = pdf(Wb11,xgrid);
line(xgrid,pdfEst)

subplot(2,2,2)
Wb12 = fitdist(Hs2,'Weibull');
h = histogram(Hs2,[0:0.5:4],'Normalization','pdf','FaceColor',[.9 .9 .9]);
xlabel('Hs [m]');
ylabel('Densidad de Probabilidad');
title('Func Dens Weibull de Hs en 2');
xgrid = linspace(0,4,100)';
pdfEst = pdf(Wb12,xgrid);
line(xgrid,pdfEst)

subplot(2,2,3)
Wb13 = fitdist(Hs3,'Weibull');
h = histogram(Hs3,[0:0.5:4],'Normalization','pdf','FaceColor',[.9 .9 .9]);
xlabel('Hs [m]');
ylabel('Densidad de Probabilidad');
title('Func Dens Weibull de Hs en 3');
xgrid = linspace(0,4,100)';
pdfEst = pdf(Wb13,xgrid);
line(xgrid,pdfEst)

subplot(2,2,4)
Wb14 = fitdist(Hs4,'Weibull');
h = histogram(Hs4,[0:0.5:4],'Normalization','pdf','FaceColor',[.9 .9 .9]);
xlabel('Hs [m]');
ylabel('Densidad de Probabilidad');
title('Func Dens Weibull de Hs en 4');
xgrid = linspace(0,4,100)';
pdfEst = pdf(Wb14,xgrid);
line(xgrid,pdfEst)
```

```
%% Cálculo RMA

rho=1025; %kg/m3
g=9.81; %m/s2

Hrot=[11.23; 27.71; 23.18; 13.53];
Lmean=[mean(L1); mean(L2); mean(L3); mean(L4)];
Tpmean=[mean(Tp1); mean(Tp2); mean(Tp3); mean(Tp4)];
c=Lmean./Tpmean;

RMA=1/2*rho*g.*Hrot.^2.*c/2;
```

Código C.5 Calibración del modelo.

```

clear all
close all
clc

%% Carga de datos obtenidos: todos son de 3 columnas con Hs Tp y Dm
    respectivamente

% Simar de Referencia (M=63, N=189).
datoref=load('ref_HsTpDm.mat');

% Coeficiente de Collins 0.2
dato02=load('calibr02_HsTpDm.mat');

% Coeficiente de Collins 0.015
dato0015=load('calibr0015_HsTpDm.mat');

% Coeficiente de Collins 0.15
dato015=load('calibr015_HsTpDm.mat');

%% Representación Datos

%Alturas de Ola Significante
figure
hold on
plot(datoref.ref(:,1))
plot(dato02.calibr02(:,1))
plot(dato0015.calibr0015(:,1))
plot(dato015.calibr015(:,1))
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Altura de Ola significativa [m]');
title('Comparación Hs según Coeficiente de Collins');
legend('Hs del SIMAR','Hs para C=0.2','Hs para C=0.015','Hs para C=0.15');
hold off

% Periodo Pico

figure
hold on
plot(datoref.ref(:,2))
plot(dato02.calibr02(:,2))
plot(dato0015.calibr0015(:,2))
plot(dato015.calibr015(:,2))
xlabel('Tiempo de simulación [h]');
ylabel('Periodo Pico [s]');
title('Comparación Tp según Coeficiente de Collins');
legend('Tp del SIMAR','Tp para C=0.2','Tp para C=0.015','Tp para C=0.15');
hold off

```


Índice de Figuras

1.1	Flamencos en las marismas del delta (Fotógrafo: Mariano Cebolla)	1
1.2	Localización de la zona de Estudio dentro de la costa levantina. Las coordenadas se encuentran representadas en el SRC UTM-HUSO 31. Figura creada en QGis mediante el procesamiento de datos vectoriales del Instituto Cartográfico de Cataluña	2
1.3	Municipios del sur de la provincia de Tarragona	3
1.4	Factores que afectan al eustatismo	4
1.5	Cambios en el nivel del mar desde el fin del último episodio glaciario (Robert A. Rohde / Global Warming Art)	5
1.6	Evolución del delta del Ebro. (Dibujos adaptados de Canicio e Ibáñez, 1999)	5
1.7	Evolución prevista de la línea de costa del delta del Ebro (DMAH, 2008)	6
1.8	Mapa litológico del delta del Ebro. (Fuente: Figura creada en QGis mediante el procesamiento de datos vectoriales del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña)	7
1.9	En Rosa, el Parque Natural del Delta del Ebro	8
3.1	Localización de los puntos SIMAR, la Boya y el Mareógrafo de Tarragona	15
3.2	Serie temporal	16
3.3	Histograma de Frecuencias de la Altura Significante de Ola	16
3.4	Gráfico de Dispersión entre la Altura Significante de Ola y el Período Pico	17
3.5	Histograma de Frecuencias del Período Pico	17
3.6	Gráfico de Dispersión entre el Período Pico y la Dirección Media de Procedencia	18
3.7	Histograma de Frecuencias de la Dirección Media de Procedencia	19
3.8	Gráfico de Dispersión de la Altura Significante de Ola y la Dirección Media de Procedencia	19
3.9	Rosa de Oleaje del punto SIMAR 711015017	20
3.10	Función de Densidad de Weibull de la Altura de Ola Significante	21
3.11	Función de Distribución de Weibull de la Altura de Ola Significante	22
3.12	Picos de Altura de Ola sobre Umbral con $H_{umb} = 3m$	23
3.13	Temporales identificados gracias a la herramienta POT	23
3.14	Temporal 1: se representa en azul la altura de ola significativa durante las 50 horas de duración del estudio, así como el umbral de 3 metros marcado en rojo.	24
3.15	Temporal 2: de manera análoga, se representa en azul la altura de ola significativa durante el temporal y en rojo el umbral de 3 metros. Para el Temporal 2, el pico sobre el umbral tiene una mayor duración que el anterior.	24
3.16	Temporal 3: altura de ola significativa para el tercer temporal.	25
3.17	Semana sin temporales: Se eligió una semana consecutiva en la que no se superase el valor umbral de altura de ola en ninguna ocasión. Se representa la altura de ola significativa durante este período en azul, y en rojo el umbral de 3 metros.	25
3.18	Histograma de frecuencias de la velocidad del viento	26
3.19	Histograma de frecuencias de la dirección media de procedencia del viento	27
3.20	Gráfico de dispersión que relaciona la velocidad media del viento con la dirección media de procedencia.	27
3.21	Rosa de Viento del punto SIMAR 711015017	28
4.1	Batimetría del Delta del Ebro	30

4.2	Curvas de nivel obtenidas a raíz de la batimetría del Delta del Ebro	31
4.3	Línea de costa	31
4.4	Malla utilizada en la simulación	32
4.5	Parámetros a modificar en el modelo	33
4.6	Altura de Ola Significante en función del Coeficiente de Collins	34
4.7	Período Pico del oleaje en función del Coeficiente de Collins	34
5.1	Posición de los puntos de observación definidos. La cuadrícula corresponde con las coordenadas en el sistema ETRS89 (UTM Huso 31N).	37
5.2	Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 1.	38
5.3	Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 1, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo.	38
5.4	Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 1.	39
5.5	Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 1.	40
5.6	Convenio de signos en la definición de los ángulos β y α	40
5.7	Vectores RMA (Escenario 1)	41
5.8	Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 2.	43
5.9	Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 2, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo.	43
5.10	Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 2.	44
5.11	Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 2.	45
5.12	Vectores RMA (Escenario 2)	45
5.13	Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 3.	46
5.14	Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para el Temporal 3, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo.	46
5.15	Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para el Temporal 3.	47
5.16	Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para el Temporal 3.	47
5.17	Vectores RMA (Escenario 3)	48
5.18	Representación de Altura de Ola significativa en cada punto de observación para el Escenario 3.	49
5.19	Histogramas de frecuencias de ocurrencia de la altura de ola significativa en cada uno de los cuatro puntos de observación para la semana sin temporales, ordenados de izquierda a derecha y de arriba a abajo.	49
5.20	Rosas de oleaje de cada uno de los puntos de control para la semana sin temporales.	50
5.21	Funciones de densidad de la altura de ola significativa en cada uno de los puntos de control para la semana sin temporales.	50
5.22	Vectores RMA (Escenario 4)	51
5.23	Diagrama comparativo entre Hs y % Frecuencia	51
6.1	Zonas de extracción y de vertido de sedimento propuestas por el Plan Integral de Protección del Delta del Ebro	54
6.2	Localización de las Presas del curso bajo del Ebro que acumulan mayor cantidad de sedimentos	55
6.3	Costes de transporte de sedimentos en $/m^3$ sin tener en cuenta la extracción artificial (Martín Vide, 2004)	55
A.1	Boya de aguas profundas de Tarragona (tipo SeaWatch)	59
A.2	Mareógrafo de Tarragona	60
B.1	Sistema de Referencia	68

Índice de Códigos

B.1	Ejemplo de informe de simulación que indica cada barrido (sweep) e iteración (iteration) con el porcentaje de celdas que convergen.	70
C.1	Lectura de datos batimétricos	71
C.2	Clima marítimo	73
C.3	Creación del archivo Wavecon para las condiciones de contorno	80
C.4	Estudio de los diferentes escenarios mediante los datos obtenidos de la simulación realizada en Delft3D	83
C.5	Calibración del modelo	87

Bibliografía

- [CBI+16] A. Cearreta, X. Benito, C. Ibáñez, R. Trobajo y L. Giosan, «Holocene palaeoenvironmental evolution of the Ebro Delta (Western Mediterranean Sea): Evidence for an early construction based on the benthic foraminiferal record», *The Holocene*, vol. 26, n.º 9, págs. 1438-1456, 2016.
- [Col72] J. I. Collins, «Prediction of shallow-water spectra», *Journal of Geophysical Research*, vol. 77, n.º 15, págs. 2693-2707, 1972.
- [CCI96] A. Curcó, A. Canicio y C. Ibáñez, «6.2. Mapa d'hàbitats potencials del delta de l'Ébre.», 1996.
- [dCat09] G. de Catalunya, «Departament de Territori i Sostenibilitat», *Guia bàsica per al seguiment de l'execució i modificació dels ajuts amb càrrec al Fons de foment del programa de barris i àrees urbanes d'atenció especial dins del Delta de l'Ébre*, 2009.
- [dEbr96] C. H. del Ebro, «Plan hidrológico de la cuenca del Ebro», *Zaragoza*, 1996.
- [dEst15a] P. del Estado, *Clima Medio de Oleaje Punto SIMAR 1043070*, 2015.
- [dEst15b] P. del Estado, «Conjunto de datos SIMAR», *Recuperado de http://calipso.puertos.es/BD/informes/INT_8.pdf*, 2015.
- [EGP+15] M. M. Eixarch, A. R. Garcia, M. R. T. Pujadas, N. A. M. Caiola, L. J. Torren y C. I. Martí, «Medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en el Delta del Ebro: proyecto Life Ebro-Admiclim», *Agrícola vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*, vol. 34, n.º 383, págs. 153-155, 2015.
- [Eld96] Y. Eldeberky, «Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone (Ph. D. thesis)», *Netherlands: Delft University of Technology, Department of Civil Engineering*, 1996.
- [Fun15] A. Fundación, *Aquae Fundación*, 2015.
- [GP06] J. M. Gutiérrez y M. R. Pons, «Modelización numérica del cambio climático: bases científicas, incertidumbres y proyecciones para la Península Ibérica», *Revista de Cuaternario y geomorfología*, vol. 20, n.º 3-4, págs. 15-28, 2006.
- [HJE91] J. T. Houghton, G. J. Jenkins y J. J. Ephraums, *Climate change*. 1991.
- [ICDC97] C. Ibáñez, A. Canicio, J. W. Day y A. Curcó, «Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain», *Journal of Coastal Conservation*, vol. 3, n.º 1, págs. 191-202, 1997.
- [IPC96] C. Ibáñez, N. Prat y A. Canicio, «Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary», *Regulated Rivers: Research & Management*, vol. 12, n.º 1, págs. 51-62, 1996.
- [KSD14] V. S. Kumar, P. Shanas y K. Dubhashi, «Shallow water wave spectral characteristics along the eastern Arabian Sea», *Natural hazards*, vol. 70, n.º 1, págs. 377-394, 2014.
- [Lon86] M. S. Longuet-Higgins, «Eulerian and Lagrangian aspects of surface waves», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 173, págs. 683-707, 1986.
- [LTCT77] M. A. Losada, L. Tejidor, M. Corneiro y J. Tejeria, «Métodos espectrales de previsión de oleaje. Estudio comparativo», *Revista de Obras Públicas*, vol. 124, n.º 3145, págs. 399-422, 1977.

- [MML+04] F. J. Méndez, R. Medina, I. J. Losada, M. Olabarrieta, A. Tomás, M. Liste, M. Menéndez, A. J. Abascal, P. Agudelo y S. Castanedo, «Estudio de los impactos en la costa española por efecto del cambio climático», *El clima entre el mar y la montaña*, J. Garcia Codron et al. eds., Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Santander, pgg, págs. 63-72, 2004.
- [Mol06] V. Molinet Coll, «Recuperación del Delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del Delta del Ebro», 2006.
- [NS+00] N. Nakicenovic, R. Swart y col., *Emissions scenarios. Special report of the Intergovernmental panel on climate change*, 2000.
- [Roh07] R. A. Rohde, «Global warming art», Retrieved November 9 th 2009 from website: [http://www.globalwarmingart.com/wiki/File: Atmospheric_Transmission_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Transmission_png), 2007.
- [RSV16] A. Rovere, P. Stocchi y M. Vacchi, «Eustatic and relative sea level changes», *Current Climate Change Reports*, vol. 2, n.º 4, págs. 221-231, 2016.
- [SJGN97] A. Sánchez Arcilla, J. A. Jiménez, G. Gelonch y J. Nieto, «El problema erosivo en el Delta del Ebro», *Revista de obras públicas*, vol. 3, n.º 368, págs. 23-32, 1997.
- [SBA+98] L. Sornoza, A. Barnolas, A. Arasa, A. Maestro, J. Rees y F. Hernández-Molina, «Architectural stacking patterns of the Ebro delta controlled by Holocene high-frequency eustatic fluctuations, delta-lobe switching and subsidence processes», *Sedimentary Geology*, vol. 117, n.º 1-2, págs. 11-32, 1998.