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

DESARROLLO DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN Y AYUDA AL DESEMBARCO SOPROA

TRABAJO FINAL DE MASTER

Trabajo realizado por:
Cristina Pérez-Íñigo Álvarez

Dirigido:
Gabriel Díaz Hernández

Titulación:
Máster Universitario en Ingeniería Costera y Portuaria

Santander, octubre de 2018

Contenido

LISTA DE ACRÓNIMOS 4

1. INTRODUCCIÓN 9

2. OBJETIVOS 12

3. ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA SOPROA 13

3.1. Descripción de los módulos 16

3.2. Descripción detallada de cada módulo 18

3.2.1. Pre-proceso 19

3.2.2. Ejecución 22

3.2.3. Post-proceso/ productos 30

3.2.3.1. MSI 34

3.2.3.2. NAVEGABILIDAD 43

3.2.3.3. VARADA 48

3.2.3.4. INFORME 50

3.2.3.5. ESTRUCTURA GUI POST-PROCESO 60

4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA 61

4.1. Caso benchmark. Luc Hamm (1990) 61

4.1.1. Batimetría plana y paralela 64

4.1.2. Rip channel 69

4.2. DELILAH 75

5. CONCLUSIONES 95

6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 96

7. REFERENCIAS 97

ANEXO 1. MANUAL DE USUARIO Y APLICACIÓN EN UN CASO REAL 98

MANUAL DE USUARIO SISTEMA SOPROA 99

PASO 0: Instalar el MCR y ejecutar el programa IH_SOPROA.exe 101

PASO 1: Crear un proyecto nuevo 102

PASO 2: Leer un archivo de batimetría 104

PASO 3: Definición de las mallas. 107

PASO 4. Definición de los puntos de salida de resultados (puntos de control) 116

PASO 5: Seleccionar forzamiento y ejecutar 117

PASO 6: Abrir un proyecto pre-existente 122

PASO 7: Realizar el post-proceso 123

PASO 8: Generar informe 133

COMPARACIÓN DE RESULTADOS 134

LISTA DE ACRÓNIMOS

AAV: Vehículos de asalto anfibio

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

DELILAH: Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Cross-shore Hydrodynamics.

FRF: Field Research Facility

GNP: Grupo Naval de Playas

GUI: Interfaz Gráfica de Usuario

IHM: Instituto Hidrográfico de la Marina.

LaTeX: sistema de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica.

LCM: Lanchas para desembarco anfibio de medios mecanizados.

MATLAB: MATrix LABoratory

MCR: Matlab Runtime Compiler (Compilador de MATLAB)

METOC: referido a Meteo-Oceanográfico

MSI: Modified Surf Index

PdE: Puertos del Estado

PDF: Portable Document Format

SCT: Supercat

SHORECIRC: modelo de corrientes en costa.

SOPROA: Sistema operacional de Predicción para Operaciones Anfibias.

SWAN: Simulating WAves Nearshore

TFM: Trabajo fin de máster.

DESARROLLO DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN Y AYUDA AL DESEMBARCO SOPROA

Autor: Cristina PÉREZ-ÍÑIGO ÁLVAREZ, Trabajo Final de Máster Universitario en Ingeniería Costera y Portuaria. Octubre 2018.

Dirigido por: Gabriel DÍAZ HERNÁNDEZ.

Palabras clave: operacional, sistema de predicción, desembarco anfibio, navegabilidad, varada, MSI, validación.

RESUMEN

Las operaciones de desembarco anfibio, llevadas a cabo por la Armada Española, son de gran importancia y muy delicadas debido a la complejidad meteo-oceanográfica de la zona de desembarco. Por ello es necesario un conocimiento profundo del área de maniobra para asegurar el éxito del desembarco, hacer más eficientes los tiempos y optimizar los recursos humanos y técnicos.

En concreto y en relación directa con una maniobra de desembarco anfibio, es necesario conocer muy bien las condiciones batimétricas, climáticas y meteo-oceánicas de la zona donde se va a llevar a cabo la misión.

La viabilidad o no viabilidad de una operación de desembarco anfibio depende de ciertas variables o productos definidos por la propia armada, productos que se derivan en general de variables METOC tales como la altura de ola, el periodo pico, el viento y las corrientes de rotura.

Estos productos condicionan cada maniobra que se puede presentar a lo largo de una operación de desembarco, tales como la navegabilidad de las embarcaciones, la identificación geográfica de los puntos de fondeo, la varada (instante en el que se produce el cambio de medio, es decir, se toma tierra viniendo desde mar y viceversa), y la viabilidad del desembarco mediante el valor del MSI, parámetro de referencia para los militares y que indica las condiciones ambientales en el momento del desembarco anfibio

en distintos perfiles de playa. Estas variables derivadas deberán ser analizadas en el ámbito espacio temporal a lo largo de todo el área y todo el tiempo de maniobra.

En este Trabajo de Fin de Máster o TFM, se presenta el desarrollo de la herramienta SOPROA, la cual gestiona, analiza y prepara toda la información necesaria para la adecuada toma de decisiones mediante la predicción de condiciones de oleaje y corrientes en la zona de rompientes. Con ella se puede predecir el escenario donde se llevará acabo la maniobra, de forma portable y re-localizable.

El sistema se puede instalar en cualquier ordenador de forma independiente y aporta la información de forma rápida y fiable de los parámetros de navegabilidad, varada y desembarco, todos ellos de una forma intuitiva e interactiva.

A lo largo de este TFM se presenta el sistema SOPROA, la metodología empleada, su arquitectura, sistema y productos. Adicionalmente se muestra su validación, su puesta en valor con un caso real y un manual para su uso.

Figura 1: Logo de la herramienta

DEVELOPMENT OF THE PREDICTION AND ASSISTANCE SYSTEM TO THE AMPHIBIOUS ASSAULT OPERATIONS, SOPROA

Author: Cristina PÉREZ-ÍÑIGO ÁLVAREZ, Trabajo Final de Máster Universitario en Ingeniería Costera y Portuaria. Octubre 2018.

Directed by: Gabriel DÍAZ HERNÁNDEZ.

Keywords: operational system, prediction, amphibious assault operations, disembarkation, navigability, beaching, MSI, validation.

ABSTRACT

The amphibious assault operations, carried out by the Spanish army are very important and very delicate due to the meteo-oceanographic complexity of the landing zone. Therefore, a thorough knowledge of the area of maneuver is necessary to ensure the success of the landing, to make the times more efficient and optimize the human and technical resources.

Specifically, and in direct relation to an amphibious landing maneuver, it is necessary to know very well the bathymetric, climatic and meteo-oceanic conditions of the area where the mission will be carried out.

The feasibility of an amphibious landing operation depends on certain variables or products defined by the Armada itself, products that are derived in general from METOC variables like wave height, peak period, wind and breaking currents.

These products condition each maneuver that may occur during a landing operation, such as the navigability of the boats, the geographical identification of the anchoring points, the beaching (when the sea-land change takes place), and the viability of the disembarkation through the MSI value, reference parameter for the military that indicates the environmental conditions at the time of the amphibious landings in different beach profiles. These derived variables should be analyzed in the time and space fields throughout the entire area and all the time of maneuver.

In this TFM, the development of SOPROA tool is presented, which manages, analyzes and prepares all the information necessary for the appropriate decision-making through the prediction of wave conditions and currents in the surf zone. With it, it is possible to predict the scheme where the operation will take place, in a portable and re-locatable way.

The system can be installed on any computer independently and provides information of the parameters of navigability, beaching and disembarkation quickly and reliably, all of them in an intuitive and interactive way.

Throughout this TFM the SOPROA system is presented, the methodology used, its architecture, system and products. Additionally, its validation is shown, its use in a real case and an user manual.

1. INTRODUCCIÓN

Una operación anfibia es una aproximación desde mar hacia tierra por fuerzas navales y fuerzas de desembarco, en una costa hostil o potencialmente hostil. Por tanto, consiste en realizar una operación logística y estratégica para proyectar una fuerza militar en playa. Está calificada como una de las operaciones militares más complejas ya que es necesaria la coordinación de grupos de tierra, mar y aire.

Durante un desembarco anfibio se realizan aproximaciones entre buques, aproximaciones de costa a mar y varadas en costa. Son maniobras muy delicadas ya que si las condiciones climáticas y meteo-oceánicas no son favorables se pueden producir movimiento, choques entre embarcaciones o el vuelco de las mismas poniendo así en riesgo general la operación.

Es por ello que adquieren mucha importancia los procesos físicos que ocurren en la costa, especialmente la hidrodinámica en la zona de rompientes, lugar donde la mayor parte de la energía del oleaje se transforma, disipa y transfiere hacia corrientes a lo largo de la playa. Adicionalmente, esta zona es susceptible de sufrir cambios en su morfología debido a los efectos que pueden producir en ella el oleaje y las corrientes como es el transporte de sedimentos.

Es, por tanto, fundamental el conocimiento de los procesos físicos que tienen lugar en la zona de rompientes para mediante ellos, obtener valores de navegabilidad, varada y desembarco (ver figura 2) y definir sus límites operacionales en función del tipo de embarcación o maniobra. Además, es importante poder planificar estas operaciones, para un mayor éxito y seguridad, por lo que es necesario tener una predicción de todas las variables.

Figura 2: Desembarco realizado por unidades de Infantería de Marina

En la actualidad y en relación con la toma de decisiones en maniobras de desembarco anfibio, la Armada Española se apoya en información meteorológica y oceanográfica disponible en internet (por ejemplo, para maniobras en la costa española, PdE, AEMET, etc.), la cual cubre grandes áreas. Esta información cuenta con la gran desventaja de que únicamente representa el oleaje en aguas indefinidas, por lo tanto, no incluye la resolución de los procesos físicos involucrados en aguas poco profundas y en la costa, que son necesarios para una adecuada cuantificación de la factibilidad de la operación de desembarco anfibio.

Adicionalmente, está aceptado el uso del modelo SURF, principalmente por la Armada Americana, para la obtención de valores de altura de ola y corrientes en la zona de rompientes. El modelo SURF resuelve la hidrodinámica de rompientes en un perfil 1D asumiendo ciertas aproximaciones sobre la batimetría, la distribución de altura de ola y el espectro de oleaje. Al ser un modelo 1D, no es capaz de simular todos los procesos que ocurren en la costa, en cambio, un modelo 2DH es capaz de resolver más procesos obteniendo así resultados más reales y completos.

Esta carencia de datos de detalle, unida al uso de fuentes de datos no heterogéneas y personal poco especializado en este ámbito, llevaba a una interpretación inadecuada de

los datos en algunos casos y con ello a la cancelación de maniobras, derivando en problemas materiales y de personal lo que lleva a problemas económicos.

Esta aproximación técnica al problema fue mejorada y revolucionada por el trabajo del Teniente de Navío Alejando Ortega en su TFM en el Máster de Ingeniería Costera y Portuaria de la Universidad de Cantabria (curso 2015-2016). Él asentó las bases metodológicas para el apoyo medioambiental para las operaciones militares de desembarco, proporcionando una nueva visión en elementos de seguridad y al mismo tiempo un mayor éxito en las operaciones, pudiendo planificarlas adecuadamente y optimizando los recursos de los que se dispone. En la actualidad y para el desarrollo del presente TFM, él ha seguido trabajando y concienciando desde entonces de la importancia y necesidad de un sistema, que proporcione de forma fiable la información necesaria y con el correcto detalle para la realización de operaciones anfibias.
En aquel TFM se plantea un estudio de las condiciones meteo-oceanográficas para mejorar la identificación de las variables METOC que afectan a los buques en las maniobras, y ser capaz de identificar el papel que juegan a la hora de calcular sus límites funcionales de desembarco. Esto se llevó a cabo mediante un profundo estudio del funcionamiento histórico de la playa del Retín de Cádiz, usada por la Armada Española para la realización de prácticas de maniobras de desembarco, principalmente mediante la realización de una reconstrucción histórica (o hindcast) de las variables METOC y sus productos derivados de desembarco anfibio.
En dicho TFM, finalmente, se plantea la primera arquitectura de un sistema operacional, que sirviese de ayuda en las maniobras y que pudiese usarse en cualquier parte del mundo, previa identificación de los proveedores de datos meteo-oceanográficos y el establecimiento del flujo de tareas y módulos que formarían parte del sistema, así como la validación del mismo.

Por lo tanto, el presente TFM toma como testigo esta última idea y, por lo tanto, se encarga del desarrollo de la primera versión del sistema SOPROA de predicción. Sistema

que define una metodología, que automatiza el cálculo de las variables necesarias, con una resolución adecuada, mediante el acoplamiento de un modelo de propagación y uno de corrientes para finalmente realizar un post-proceso de las variables obtenidas e involucradas para obtener los productos de utilidad para la Armada (navegabilidad, varada, desembarco). Estos productos utilizarán los pesos y límites de cada variable METOC que se estudiaron previamente.

Todo ello ha sido integrado en una GUI para que sirva de apoyo y ayuda a los oficiales METOC de una forma intuitiva, sencilla e interactiva, siendo además un sistema robusto, portable y re-localizable. Adicionalmente, con el SOPROA se pueden emitir informes automatizados en formato PDF con todos los productos.

2. OBJETIVOS

El primer objetivo del presente trabajo consiste en plantear una metodología para el desarrollo de un sistema operacional de predicción de oleaje y corrientes de rotura, para el apoyo durante las maniobras de desembarco anfibio y que pueda servir de base para futuras mejoras, pudiendo mantener la misma arquitectura y estructura metodológica.

El siguiente objetivo es el desarrollo del sistema operacional mediante la creación de una GUI, que realice de forma automática todo el proceso desde la obtención de datos climáticos y meteo-oceanográficos de los proveedores hasta la salida de resultados y productos, adaptados a las necesidades requeridas por el Instituto Hidrográfico de la Marina. Esta herramienta debe ser portable y re-localizable, es decir, que se pueda instalar en cualquier ordenador y que sirva para cualquier parte del mundo.

Este desarrollo supone una mejora de la calidad de las variables involucradas en un desembarco. Además, ayudará a los militares no familiarizados o especializados en el

ámbito de los procesos físicos que ocurren en la costa, a poder entender de una manera más sencilla e intuitiva las condiciones ambientales que se darán en la zona donde se lleven a cabo las maniobras, facilitando así su toma de decisiones e incrementando sustancialmente las probabilidades de éxito de la misión.

Para cumplir el objetivo el TFM ha realizado diferentes tareas que se describen brevemente a continuación

- Diseño y revisión final de la arquitectura del sistema.
- Planteamiento técnico de la metodología a seguir, modelos, forzamientos y productos
- Validación con casos de referencia o benchmark
- Puesta en valor con un caso real (En la playa de Raposa, Portugal)
- Redacción del manual de usuario y tutorial

3. ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA SOPROA

La arquitectura general del sistema SOPROA se basa en tres módulos generales bien diferenciados y unidos de forma automática que son: i) el módulo de pre-proceso, ii) el módulo de ejecución, y iii) el módulo de post-proceso que se describen brevemente a continuación y en los que se entrará en detalle en los siguientes puntos:

i) Módulo de pre-proceso: este módulo se encarga de la automatización de los datos aportados por los proveedores de oleaje, viento y nivel del mar en aguas profundas, mediante su adaptación y normalización al formato requerido por los modelos que forman parte del siguiente módulo.

ii) Módulo de ejecución: con este módulo se lleva a cabo, primero la propagación de los datos aportados por el pre-proceso desde aguas profundas hasta la costa. Y segundo, se obtendrán resultados de oleaje y corrientes de rotura en la zona más cercana a la costa, generando un fichero que recoge toda la información de las variables involucradas en dichos procesos físicos y que son la base del cálculo realizado en el tercer módulo, el módulo de post-proceso.

Las variables que están incluidas en el fichero son:

- Batimetría.
- Coordenadas X, Y UTM
- Tiempo
- Altura de ola significante
- Periodo pico
- Dirección del oleaje incidente
- Módulo de las corrientes
- U y V de las corrientes
- Uw y Vw del viento

iii) Módulo de post-proceso: mediante este último módulo, se obtienen los productos de navegabilidad, varada y desembarco, derivados de las variables obtenidas tras la ejecución. Se ha diseñado para que realice de forma automática todos los cálculos y devuelva los productos que resultan de utilidad a los oficiales METOC, incluyendo en ellos los límites operacionales en función de las condiciones climáticas y del tipo de embarcación.

La visualización será de forma dinámica, pudiendo ver la variación de los resultados tanto temporal como espacialmente y todo ello de una forma intuitiva e interactiva. Éste paquete incluirá la obtención automatizada de informes, los cuales integran una información detallada de los datos introducidos, los resultados obtenido y los valores de los mismo tanto de forma gráfica como numérica. El diseño que se presenta y que

engloba todo el sistema descrito anterior, está integrado en una interfaz de usuario (GUI), programada en MATLAB

Esta arquitectura general de tres módulos presenta la importante ventaja de ser universal en su conceptualización, es decir, es independiente de los métodos, modelos, algoritmos, ecuaciones, etc. que lo componen, es decir, esta arquitectura permite intercambiar dichas herramientas, actualizarlas o modificarlas sin que el esquema general cambie.
Por tanto, cumpliendo con la metodología (ver figura 3) y el diseño que se explica en las secciones 4.1 y 4.2, se cumpliría el objetivo de ofrecer una herramienta que sea:

- Integrada: En una misma herramienta se realizar todos los procesos necesarios para obtener los productos finales a partir de unas condiciones generales.
- Eficiente: capaz de obtener resultados de calidad en un tiempo competitivo y práctico para la predicción de las maniobras.
- Intuitiva: fácil de usar. Se puede aprender a usarla siguiendo las indicaciones del manual que se aporta en el Anexo 1 de este documento. Además, los productos que se obtienen son fácilmente entendibles, sin necesidad de unos conocimientos profundos en el ámbito.
- Robusta: realiza gran cantidad de operaciones sin producir fallos.
- Interactiva: el usuario puede interactuar con ella para visualizar gran cantidad de resultados mediante perfiles y puntos que se pueden mover en el espacio, como pudiendo moverse en el tiempo, buscando el instante que reúna las mejores condiciones.
- Portable: el sistema se puede instalar en cualquier ordenador sin necesidad de ningún otro programa adicional, únicamente con un MCR.
- Re-localizable: se puede usar en cualquier parte del mundo, pudiendo ser usada para el desembarco en cualquier playa.

Adicionalmente en el presente TFM se ha realizado un ejercicio de validación (ver apartado 4) con el objetivo de demostrar no solo la calidad de sus resultados, sino también las cualidades anteriormente descritas aprendiendo a lo largo de este proceso más sobre el sistema y realizando las modificaciones necesarias en él para alcanzar todas ellas.

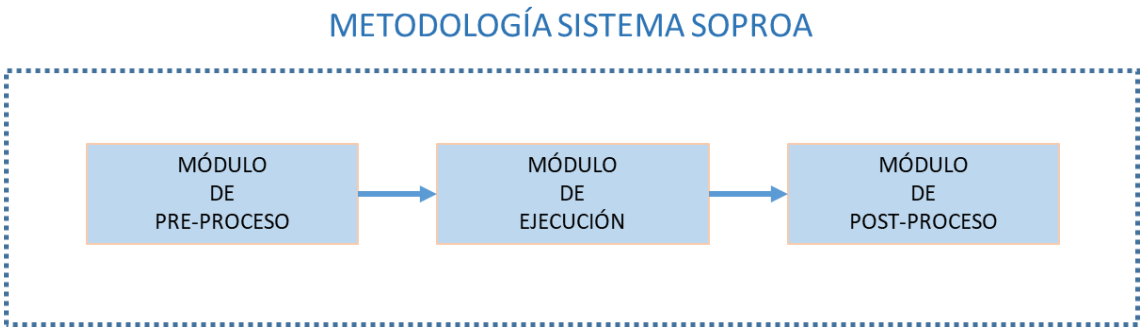


Figura 3: Esquema de la metodología

3.1. Descripción de los módulos

La versión actual del sistema SOPROA (desarrollada en el presente TFM) integra diferentes modelos, métodos, ecuaciones, y algoritmos dentro de cada una de los módulos generales.

En este apartado se explica el método y los modelos usados siguiendo la metodología explicada en apartados anteriores, para obtener la primera versión del sistema SOPROA. Será en el apartado 3.2 en el que se profundizará en ellos, explicando los procesos y algoritmos que tienen lugar en cada uno.

En la figure 4 se presenta un esquema de cajas con la arquitectura del sistema.

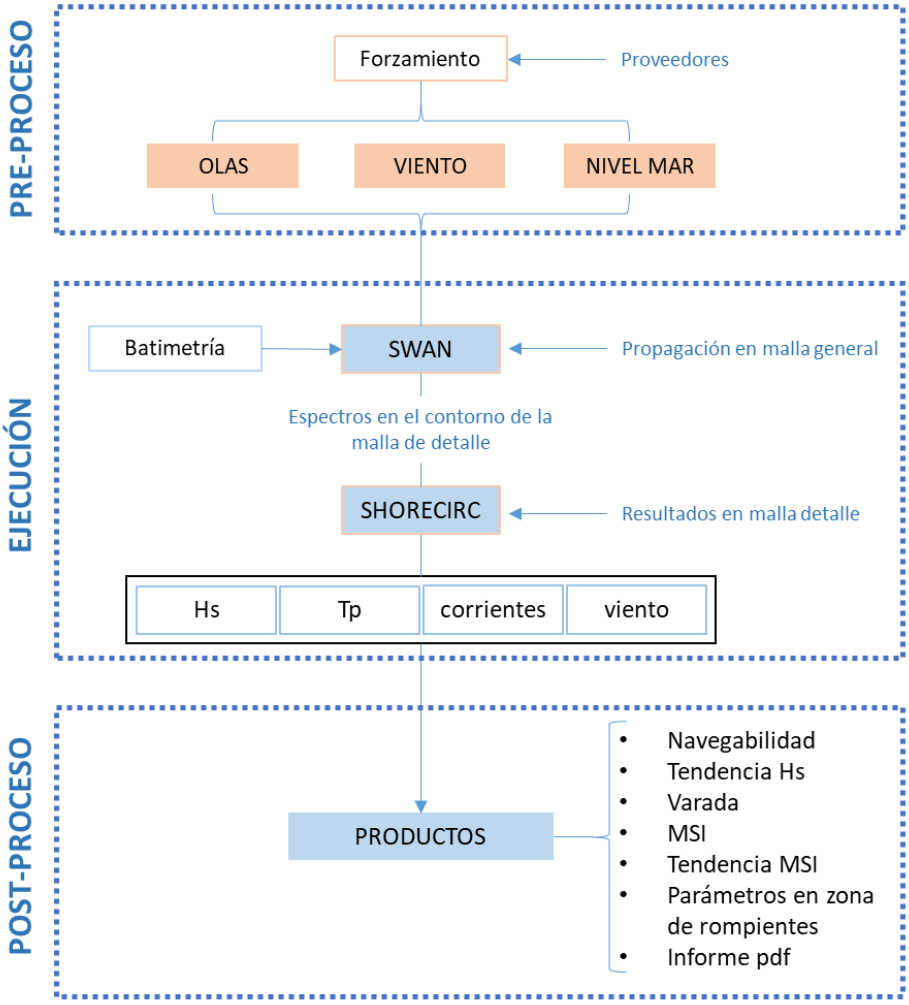


Figura 4: Arquitectura del sistema operacional SOPROA

En primer lugar, el módulo de pre-proceso se resuelve a través de la búsqueda predictiva de información de oleaje, corriente y viento en aguas profundas frente a la zona de estudio. Éste se obtendrá de proveedores meteo-oceanográficos a nivel mundial (por ejemplo: Puertos del Estado, AEMET, NOAA, etc.). Una vez identificado el mejor proveedor para cada maniobra, este primer módulo se encarga de adaptar la información de partida anteriormente mencionada, a los requerimientos y formatos del sistema para su correcta y directa aplicación al siguiente módulo de ejecución.

En segundo lugar, el módulo de ejecución se dedica a la regionalización del oleaje y corrientes de rotura, desde aguas profundas hasta la zona de rompientes en costa. Para

la propagación del oleaje, el sistema SOPROA usa el modelo SWAN (Booij et al. 1999, ver descripción general en la sección 3.2.2) y para las corrientes el modelo SHORECIRC (Svendsen et al., 2000, ver descripción general en la sección 3.2.2). Este segundo módulo necesita, por lo tanto, datos de la batimetría de detalle, el forzamiento de oleaje, viento y nivel del mar provenientes del módulo de pre-proceso. La propagación del oleaje y la obtención de las corrientes de rotura se realizan dentro de un dominio numérico pre-definido por el usuario, que consiste en una malla general y una de detalle. El acoplamiento realizado entre los dos modelos se realiza de forma automática y aporta matrices de variables oceanográficas espacio-temporales que son aprovechadas por el tercer módulo de post-proceso.

En tercer lugar, el módulo de post-proceso permitirá finalmente integrar los datos aportados por el módulo anterior en un fichero (en el cual están todos los resultados de oleaje, viento y corrientes de rotura en la malla de detalle), que se emplea para obtener todos los productos que la Armada, y en especial el oficial METOC, necesita para la toma de decisiones. Estos productos consisten en valores espacio-temporales de navegabilidad, varada, desembarco, MSI, tendencias de oleaje y parámetros en la zona de rompiente (ver descripción de estos productos de post-proceso en la sección 3.2.5). Adicionalmente en este tercer módulo se integra una herramienta de consulta de resultados que automatiza un informe en formato PDF, donde se integra toda la información anterior a gusto y necesidad del usuario. Todos estos productos se presentarán mediante una GUI desarrollada en lenguaje MATLAB®.

3.2. Descripción detallada de cada módulo

A continuación, se describe cada uno de los 3 módulos generales presentados en la sub-sección anterior, explicando las fuentes de datos necesarias, los procesos que tienen lugar, las herramientas numéricas, así como detallando los productos finales definiendo

los límites operativos que el sistema utiliza para obtener la viabilidad o no viabilidad de la navegabilidad, la varada y el desembarco.

3.2.1. Pre-proceso

Como ya se ha comentado anteriormente, este módulo será el encargado de la descarga automática de los datos meteo-oceanográficos de los proveedores y de su adaptación al formato que requiere el segundo módulo y que se explicará a continuación.

Previamente es necesario el estudio de los proveedores disponibles para elegir aquel que aporte mejores datos para la zona de estudio en cada momento.

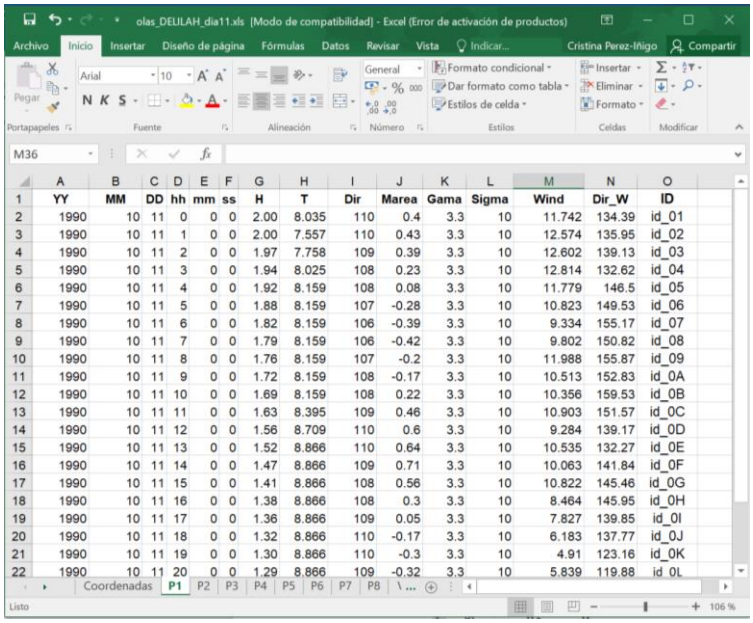
Para realizar la predicción (o forecast) es necesario que los datos adquiridos sean predictivos a cuatro o cinco días vista, y que presenten series homogéneas y horarias. Se deben obtener datos de oleaje, viento y nivel del mar. Adicionalmente, es importante que este indicada la localización, coordenadas UTM, de los puntos de predicción ya que será necesario para el adecuado montaje del sistema.

Para la obtención de los datos de oleaje, viento y nivel del mar, se han identificado distintos proveedores operacionales, con mayor o menor utilidad en función de la zona del mundo en la que se quiera realizar la operación de desembarco. Los que se indican a continuación son los más importantes a nivel global con base en su robustez, número de usuarios y disponibilidad libre de datos. Estos proveedores y los productos meteo-oceánicos que cada uno de ellos ofrece son los siguientes:

- Productos de viento a nivel España, aportados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).
- Productos de oleaje a nivel España, aportados por el Organismo Público Puertos del Estado (PdE).
- Productos de oleaje y viento a nivel global, aportados por el Weather Service de la National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA).

- Productos de oleaje, viento y nivel del mar a nivel global, aportados dentro del proyecto Europeo COPERNICO. Programa para la Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y la Seguridad, antes conocido como GMES. Esta iniciativa está liderada por la Comisión Europea (CE), en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA). Copérnico constituye un sistema unificado para distribuir una gran cantidad de información, recogida desde el espacio o sobre el terreno, a una larga serie de servicios temáticos diseñados para mejorar el cuidado del medio ambiente, la calidad de vida de los ciudadanos y las necesidades humanitarias, y para ayudar a desarrollar políticas más efectivas para garantizar la sostenibilidad de nuestro futuro. Todos estos servicios se enmarcan en seis grandes categorías: gestión del suelo, el medio marino, la atmósfera, respuesta en situaciones de emergencia, seguridad y cambio climático.

Tras la descarga y normalización automática por parte del sistema, se obtendrá un fichero Excel compuesto por varias pestañas que se explican a continuación.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	YY	MM	DD	hh	mm	ss	H	T	Dir	Marea	Gama	Sigma	Wind	Dir_W	ID
2	1990	10	11	0	0	0	2.00	8.035	110	0.4	3.3	10	11.742	134.39	id_01
3	1990	10	11	1	0	0	2.00	7.557	110	0.43	3.3	10	12.574	135.95	id_02
4	1990	10	11	2	0	0	1.97	7.758	109	0.39	3.3	10	12.602	139.13	id_03
5	1990	10	11	3	0	0	1.94	8.025	108	0.23	3.3	10	12.814	132.62	id_04
6	1990	10	11	4	0	0	1.92	8.159	108	0.08	3.3	10	11.779	146.5	id_05
7	1990	10	11	5	0	0	1.88	8.159	107	-0.28	3.3	10	10.823	149.53	id_06
8	1990	10	11	6	0	0	1.82	8.159	106	-0.39	3.3	10	9.334	155.17	id_07
9	1990	10	11	7	0	0	1.79	8.159	106	-0.42	3.3	10	9.802	150.82	id_08
10	1990	10	11	8	0	0	1.76	8.159	107	-0.2	3.3	10	11.988	155.87	id_09
11	1990	10	11	9	0	0	1.72	8.159	108	-0.17	3.3	10	10.513	152.83	id_0A
12	1990	10	11	10	0	0	1.69	8.159	108	0.22	3.3	10	10.356	159.53	id_0B
13	1990	10	11	11	0	0	1.63	8.395	109	0.46	3.3	10	10.903	151.57	id_0C
14	1990	10	11	12	0	0	1.56	8.709	110	0.6	3.3	10	9.284	139.17	id_0D
15	1990	10	11	13	0	0	1.52	8.866	110	0.64	3.3	10	10.535	132.27	id_0E
16	1990	10	11	14	0	0	1.47	8.866	109	0.71	3.3	10	10.063	141.84	id_0F
17	1990	10	11	15	0	0	1.41	8.866	108	0.56	3.3	10	10.822	145.46	id_0G
18	1990	10	11	16	0	0	1.38	8.866	108	0.3	3.3	10	8.464	145.95	id_0H
19	1990	10	11	17	0	0	1.36	8.866	109	0.05	3.3	10	7.827	139.85	id_0I
20	1990	10	11	18	0	0	1.32	8.866	110	-0.17	3.3	10	6.183	137.77	id_0J
21	1990	10	11	19	0	0	1.30	8.866	110	-0.3	3.3	10	4.91	123.16	id_0K
22	1990	10	11	20	0	0	1.29	8.866	109	-0.32	3.3	10	5.839	119.88	id_0L

Figura 5: Apariencia del fichero de forzamiento

La primera pestaña está compuesta por tres columnas en las que se indican las coordenadas de los puntos de forzamiento. En la primera columna el nombre de referencia del punto y en las dos siguientes sus coordenadas X, Y (UTM).

	A	B	C
1	**ID_punto**	**X**	**Y**
2	P1	-11.5	-14
3	P2	-11.5	14

Figura 6: Input coordenadas de los puntos de forzamiento

Segunda pestaña: a continuación, habrá tantas pestañas como puntos de forzamiento haya. Cada una de ellas tendrá una cabecera en la que se indican las variables que se deben introducir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	**YY**	**MM**	**DD**	**hh**	**mm**	**ss**	**H**	**T**	**Dir**	**Marea**	**Gama**	**Sigma**	**Wind**	**Dir_W**	**ID**

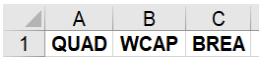
Figura 7: Cabecera para el input de los datos de cada punto

Estas son, respectivamente, año, mes, día, hora, minuto, segundo, altura de ola significante (Hs), periodo de pico (Tp), dirección media de propagación del oleaje (Dir), marea o nivel del mar, factor de apuntamiento del espectro (gama) y valor de dispersión angular (sigma) asociados al espectro de oleaje teórico JONSWAP. Adicionalmente se incluye información del viento (magnitud y dirección) y el identificador del estado de mar, que se aporta por defecto.

En las siguientes filas del fichero se indican los estados de mar consecutivos y de forma horaria (debiendo haber más de una ya que el modelo de oleaje incluido en el sistema SOPROA ejecuta de forma no estacionaria).

Tanto la fecha como el número de estados de mar, debe coincidir en todos los puntos de forzamiento que se introduzcan.

Para finalizar el montaje del fichero, en la última pestaña se indican características de los procesos físicos que llevará acabo el modelo, así como algunas características de la ejecución generales.



	A	B	C
1	**QUAD**	**WCAP**	**BREA**

Figura 8: Cabecera procesos físicos

QUAD: quadruplets, indica la activación del método de aproximación de interacción de ola-ola (4 olas), valor por defecto 1 (activado).
WCAP: controla el efecto del whitecapping en la ejecución, valor por defecto 1 (activado).
BREA: activa el efecto de rotura por fondo, valor por defecto 1 (activado).
Esta pestaña deberá tener tantas filas como estados de mar se hayan introducido en los puntos.

Este XLS se emplea como forzamiento del siguiente módulo.

3.2.2. Ejecución

Este módulo se alimenta del fichero Excel de forzamiento obtenido en el pre-proceso y del archivo de batimetría. En él se lleva a cabo la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa mediante el modelo SWAN y posteriormente el cálculo de las corrientes de rotura mediante el modelo SHORECIRC.
A continuación, se explican los procesos que cada uno de ellos resuelve y el acoplamiento entre ambos.

El **modelo SWAN** (Simulating WAves Nearshore, Booij et al. 1999) fue desarrollado por Delf University of Technology, es un modelo espectral que resuelve la ecuación de balance de energía o ecuación del balance de acción de onda, y es capaz de resolver los efectos de refracción, asomeramiento, interacción ola-corriente, interacción no lineal

ola-ola, la disipación por whitecapping y por fondo, en cambio, la difracción y la reflexión solo la resuelve de forma aproximada, además de no generar corrientes de rotura en playas.

Con él se obtienen estimaciones realistas de los parámetros del oleaje como son su altura, su periodo y su dirección tras la propagación. Los procesos costeros que no resuelve son obtenidos mediante el modelo SHORECIRC como se verá más adelante. En este sistema, el objetivo principal del modelo SWAN es propagar de una forma eficiente el oleaje de aguas profundas a reducidas.

A continuación, se explica la ecuación del balance de acción de onda (action balance equation) que como se ha indicado es la que resuelve el modelo SWAN:

$$\frac{\partial E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta}+\frac{\partial C g_x E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial x}+\frac{\partial C g_y E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial y}+\frac{\partial C_\theta E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta}+\frac{\partial C_\sigma E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \sigma}=\frac{S(\sigma,\theta;x,y,t)}{\sigma}$$

Siendo el significado de cada término:

- $\frac{\partial E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta}$: cambio de la densidad de energía espectral en el tiempo y espacio x-y.

- $\frac{\partial C g_x E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial x}+\frac{\partial C g_y E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial y}$: propagación de la densidad espectral en el espacio x-y (evalúa el asomeramiento del oleaje espectral).

- $\frac{\partial C_\theta E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \theta}$: Representa el cambio de la dirección de energía espectral por efecto del fondo y corrientes (resuelve refracción y difracción parcialmente).

- $\frac{\partial C_\sigma E(\sigma,\theta;x,y,t)}{\partial \sigma}$: Es el cambio de las frecuencias relativas de energía por efecto del fondo y corrientes.

- $\frac{S(\sigma,\theta;x,y,t)}{\sigma}$: forzamiento espectral direccional (incluye los efectos no lineales ola-ola y de disipación).

Donde E es la energía y C la celeridad. La ecuación, por tanto, se resuelve en un espacio de cuatro dimensiones, dos correspondientes al espacio geográfico (x, y) y otras dos al espectral (dirección y frecuencia).

El modelo obtiene las variables de oleaje y viento en toda la malla general, además del espectro en los puntos del contorno de la malla de detalle (malla del modelo SHORECIRC), definidas previamente por el usuario.

Posteriormente, para la obtención de las corrientes y la altura de ola en la costa con más detalle, se usa el modelo SHORECIRC desarrollado por la Universidad de Delaware (Svendsen et al., 2000). Es un modelo de corrientes que acopla de forma bilateral (two-way coupling) la propagación de detalle del modelo SWAN con la solución del modelo de corrientes forzado por el tensor de radiación asociado al oleaje calculado en la zona de rompientes. Se trata de un modelo quasi-3D que resuelve la circulación que se produce en la costa. La versión completa del modelo es capaz de obtener las corrientes en vertical con base en un tratamiento multicapas, pero para este estudio el uso del modelo se limita al ámbito bidimensional en plano x-y o 2DH. Éste modelo es capaz además de obtener el transporte de sedimentos producido por el oleaje y las corrientes, que será interesante a considerar para futuras versiones del SOPROA.
El acoplamiento entre ambos modelos se realiza a través de la extracción de la información espectral del oleaje en el perímetro de la malla de detalle del modelo SHORECIRC (ver puntos rojos en la figura 9).

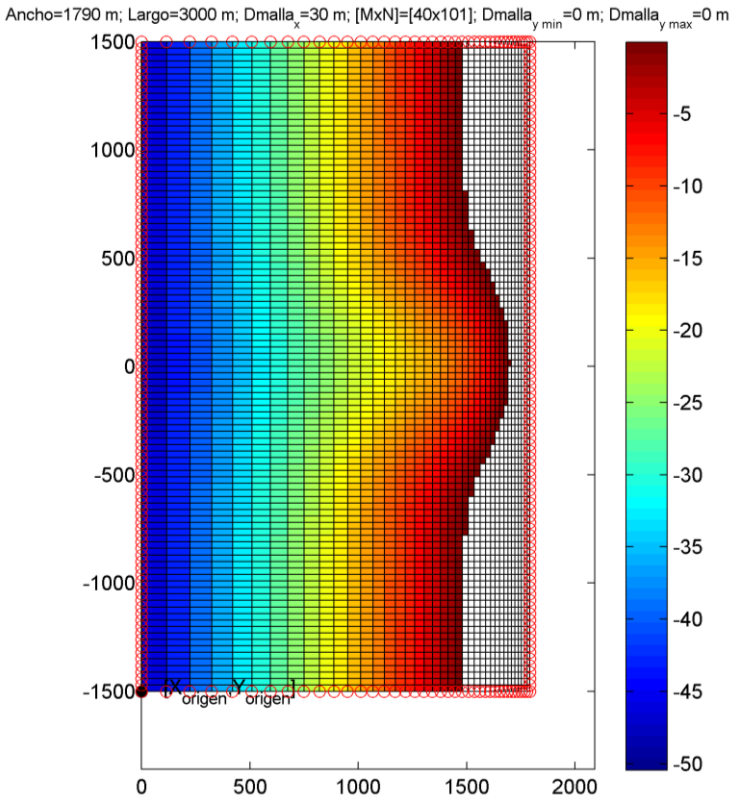


Figura 9: Ejemplo de puntos input en la malla SHORECIRC

En el sistema SOPROA, el SHORECIRC se alimenta de los espectros obtenidos en los nodos de la malla de detalle que se indican en la figura 9. Los resultados que se obtienen son un conjunto de mapas de altura de ola (ver figuras 10 a 12) y corrientes en cada estado de mar y un fichero llamado *"SHORECIRC.mat",* que contiene toda la información necesaria sobre el oleaje, el viento y las corrientes de rotura y que será el que utilice el tercer módulo para obtener los productos de navegabilidad, varada y desembarco.

Las variables guardadas en el fichero "SHORECIRC.mat" son:

- Batimetría.
- Coordenadas X, Y UTM
- Tiempo

- Altura de ola significante
- Periodo pico
- Dirección del oleaje incidente
- Módulo de las corrientes
- U y V de las corrientes
- Uw y Vw del viento

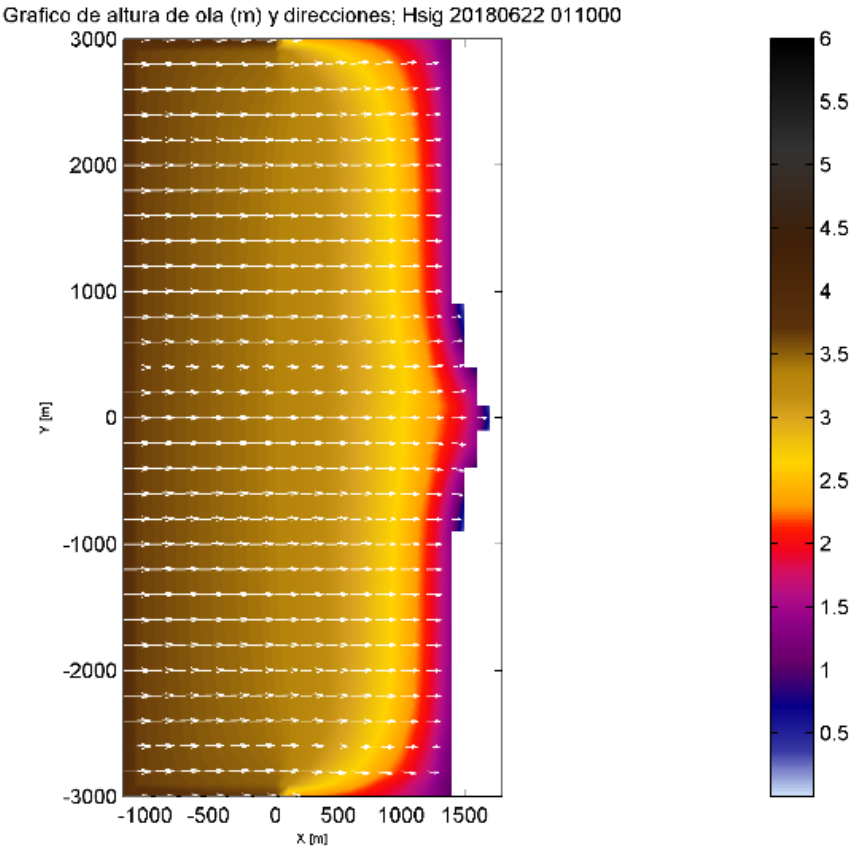


Figura 10: Ejemplo output de la malla general para la altura de ola significante.

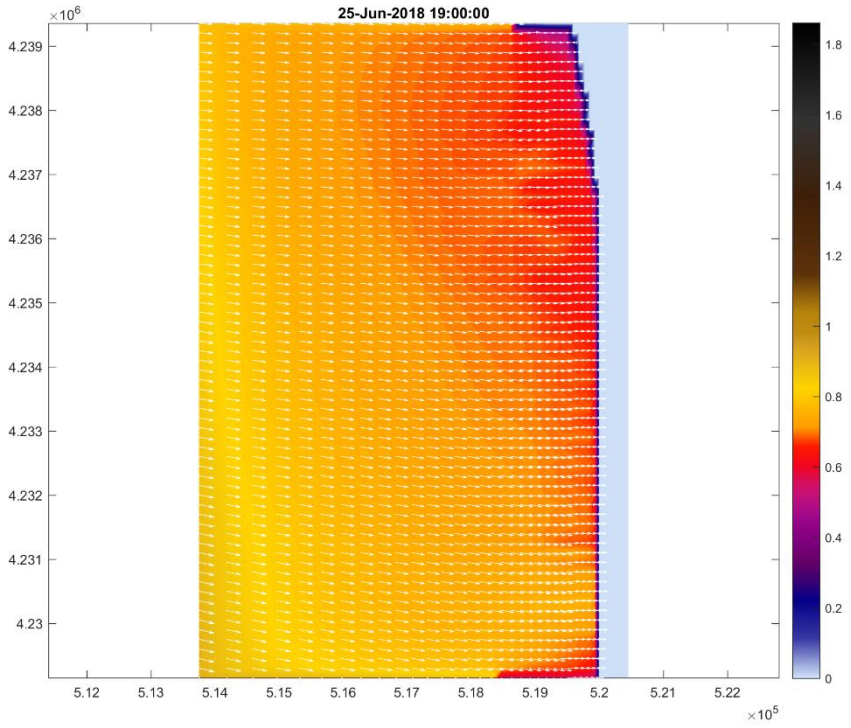


Figura 11: Ejemplo output de la malla de detalle para la altura de ola significante.

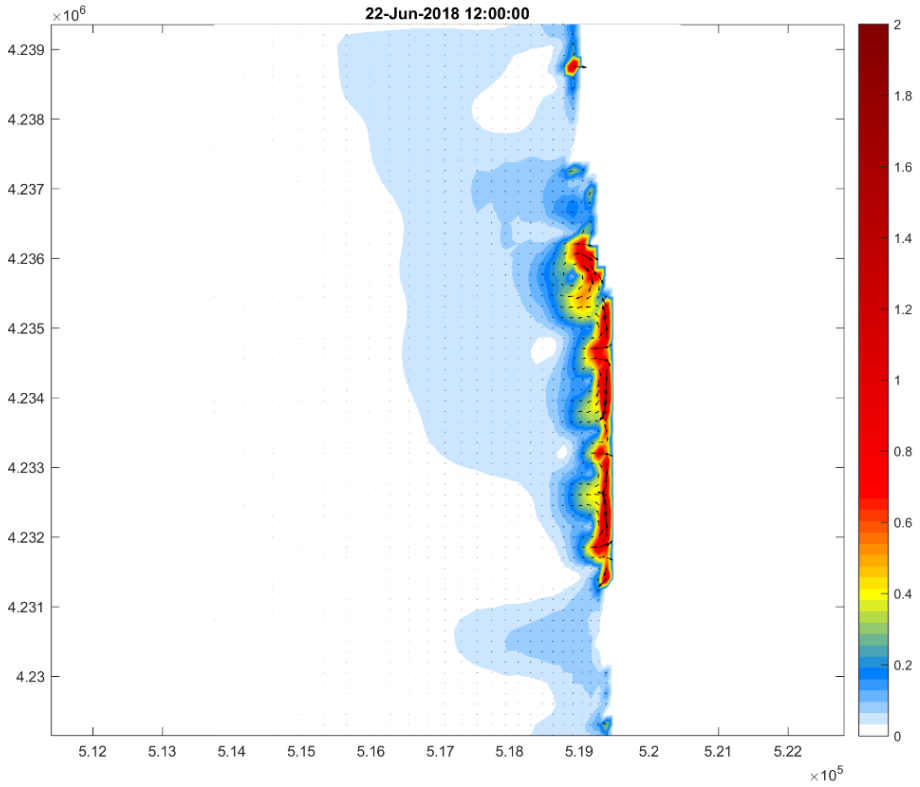


Figura 12: Ejemplo output de la malla de detalle para las corrientes de rotura.

Adicionalmente, es importante destacar la importancia de la calidad de la batimetría. Que sea homogénea, completa, y con la mayor resolución posible (del orden de 10 m al menos), será fundamental para la obtención de resultados de calidad. El modelo SHORECIRC es muy sensible a esta, y puede llegar a variar sus resultados en relación a inexactitudes/cambios batimétricos.

Para ilustrar lo anteriormente comentado, las figuras 13 a 15 muestran, para un instante concreto (las 22 horas del 16 de octubre de 1990), los resultados de tres ejecuciones de un caso de estudio en la playa de Duck (Carolina del Norte), en las que se introduce el mismo forzamiento en el sistema, pero con batimetrías ligeramente distintas en cada uno de los casos.

La primera de ellas es de menor calidad y resolución, además de cubrir un dominio menor haciendo que algunos procesos no puedan ser captados y por tanto no intervengan para el cálculo de las corrientes y de la altura de ola.

La segunda y la tercera cubren el mismo dominio y ambas tienen igual resolución, su variación reside principalmente en los primeros 200 metros, que llegan aproximadamente hasta la cota -2 metros. En la tercera figura puede apreciarse una barra entre los 1000 y 1500 metros del eje y. Esta barra provoca la generación de unas corrientes longitudinales mayores que si no estuviese tan pronunciada como sucede en el caso de la figura situada en el centro.

En conclusión, es importante que la batimetría que se va a usar en el sistema sea lo más reciente posible para que sea lo más parecida posible al momento en el que se quieren obtener los resultados. Además, se debe incluir cualquier elemento que pueda afectar a las corrientes que este cerca de la zona de interés como puede ser la existencia de un rip channel como se ve en el caso de ejemplo de las figuras siguientes.

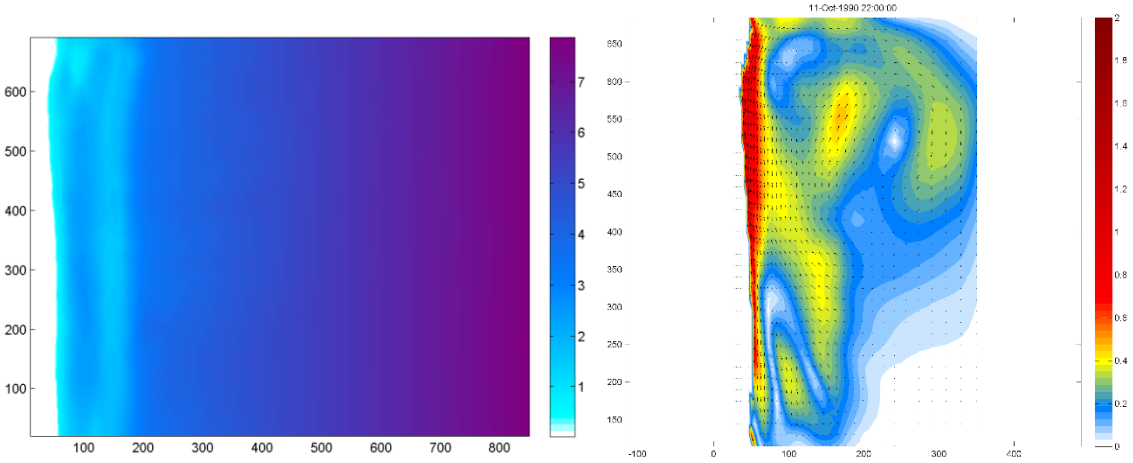


Figura 13: Resultados para una batimetría con poca y resolución y un dominio pequeño.

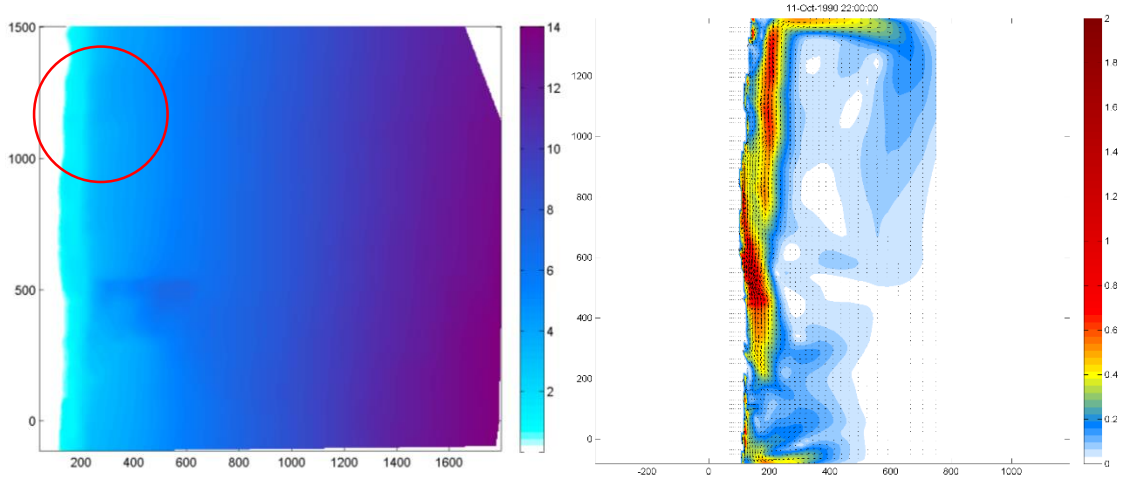


Figura 14: Resultados para batimetría sin barra.

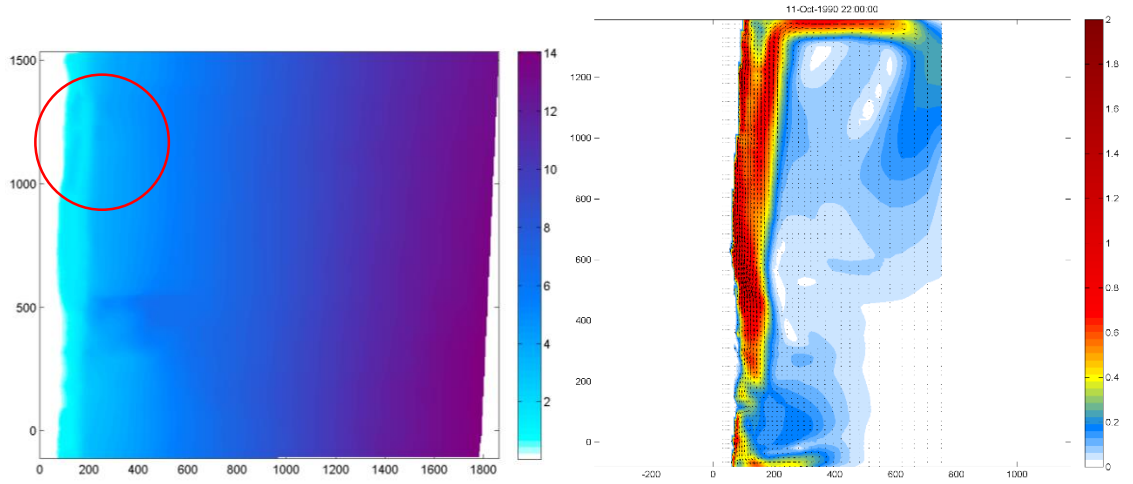


Figura 15: Resultados para batimetría con barra.

La forma de introducir la batimetría en el sistema es mediante un fichero .dat, con tres columnas en las que se indicarán respectivamente, las coordenadas x, y, z.

Retomando la metodología, tras la obtención del fichero de forzamiento en el módulo de pre-proceso y su introducción en el módulo de ejecución junto con la batimetría, se obtiene el fichero "*SHORECIRC.mat*" que alimenta el módulo de post-proceso que se explica a continuación.

3.2.3. Post-proceso/ productos

Es importante que la información que proviene del módulo de ejecución sea tratada de la forma más eficiente posible pudiendo ofrecer unos subproductos, es decir, nuevos resultados a partir de las variables del fichero "*SHORECIRC.mat*", de una manera automática, rápida, intuitiva, completa y robusta para que el usuario, que por lo general será un oficial METOC, pueda tener toda la información que necesita para tomar la mejor decisión a la hora de llevar a cabo una misión y concluirla con éxito.

Para conseguir este fin está el módulo de post-proceso, el cual se compone de una GUI diseñada durante este TFM. La interfaz aporta al usuario una forma ágil, intuitiva y completa de ver los productos, que más adelante se detallan, pudiendo interactuar con ella en tiempo y espacio para encontrar el mejor instante y lugar para realizar cada una de las maniobras de las que se compone una operación de desembarco anfibio.

Los productos antes mencionados que se aportan a través de la interfaz mediante gráficos y que son los requeridos por la Armada Española son:

- Navegabilidad, perfiles de navegabilidad para cada uno de los tipos de embarcaciones y mapas de la zona de detalle.
- Varada, mapas de su viabilidad para cada tipo de embarcación en la zona de interés (en la malla de detalle).

- Valor de MSI, mapa de valores en toda la zona de interés, su valor en un perfil concreto y su tendencia en un punto.
- Valores de tendencia de la altura de ola significante en distintos puntos de la zona.

Para un correcto entendimiento de los productos que se presentan a continuación, es necesaria una breve descripción de las tipologías de embarcación que usa la Armada Española y que tiene en cuenta el SOPROA.
Distinguiremos entre Supercats, vehículos de asalto anfibio por un lado (SCT y AAV) y lanchas de desembarco anfibio mecanizadas por otro (LCM: Landing Craft Mechanized).

- SCTs

Los supercats son lanchas rápidas semirrígidas, con refuerzo de Kevlar en el casco lo que las hacen muy resistentes al impacto que se produce al efectuar una varada en la playa. Van propulsadas con dos motores lo que las proporciona una gran velocidad. Tiene capacidad para transportar a un pelotón compuesto por 6 o 10 hombres en función de la misión a realizar.

Figura 16: Embarcaciones SCTs desembarcando

- AAV

En cuanto a los vehículos de asalto anfibio (AAV), son los principales medios de transporte de las tropas, pueden operar tanto en tierra mediante orugas como en mar con potentes hidrojets. Tienen la capacidad de transportar tropas de asalto de infantería, junto con su material y desembarcarlas en tierra sin la necesidad de un puerto.

Figura 17: Embarcaciones AAV en el mar.

Figura 18: Embarcaciones AAV llegando a tierra

Ambos tipos, los SCT y los AAV, comparten algunos límites operacionales como en la navegabilidad, como se verá más adelante.

- LCMs

Son lanchas para desembarco anfibio de medios mecanizados fabricadas por Navantia para la Armada Española. Su principal misión es situar en la playa en un tiempo razonablemente corto los elementos que integran la fuerza de desembarco mediante su transporte a tierra desde los buques de asalto anfibio (AAV).

Figura 19: Embarcaciones LCM.

Una vez presentados los tipos de embarcación pasamos a describir cada uno de los productos que ofrece la herramienta y que se han mencionado anteriormente, con sus procesos de cálculo y límites operacionales.

3.2.3.1. MSI

El valor de la matriz MSI (*Modified Surf Index*), corresponde a una matriz de impacto que suma el efecto de distintos parámetros meteo-oceanográficos obtenidos de la ejecución, dándoles un peso a cada uno de ellos. Éste índice es el mismo que usan los americanos para sus desembarcos anfibios.

Las embarcaciones usadas para las operaciones de desembarco son muy sensibles al estado del mar, por lo que el MSI proporciona una forma sencilla y fiable para ver cómo afectan distintas variables meteo-oceánicas en la operatividad.
Para la obtención de dicha matriz influyen distintos coeficientes, cada uno de ellos está asociado a una variable, y son las siguientes:

- Altura de ola en rompiente, coeficiente A.
- Periodo pico, coeficiente B.
- Tipo de rompiente, coeficiente C.
- Ángulo del oleaje en la zona de rompiente, coeficiente D.
- Corrientes longitudinales, coeficiente E.
- Viento, coeficiente F.

Por tanto, se tienen en cuenta cinco coeficientes, cada uno de los cuales se describe a continuación:

Altura de ola en rompiente (A): Este es el único factor que se aplica directamente sin obtener unos coeficientes a partir de él. Es por ello que es la variable que más peso va a tener dentro del valor del MSI. La obtención, por tanto, del primer coeficiente es directamente el valor de la altura de ola en rompiente medido en pies (1m = 3.2 pies).

Coeficiente por el periodo de la rompiente (B): para obtener el coeficiente relativo al periodo en cada punto de la malla de detalle, que es la de interés del MSI, es necesario

entrar en una tabla y a partir del valor de la altura de ola significante en la rompiente (en pies) y el periodo se obtiene un valor. La tabla se muestra a continuación:

PERIODO (s)										
>=17	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0
16	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.7
15	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
12	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
11	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
10	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
9	0.0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.7
<=8	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	2.0
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>=5

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN PIES (m)

Tabla 1 : Coeficientes asociados al periodo para la obtención del MSI

Observando los valores de la tabla podemos ver que el coeficiente aumenta mucho para valores de periodo bajo junto con una altura de ola grande, es decir, a mayor peralte mayor coeficiente ya que el riesgo es mayor para las embarcaciones.

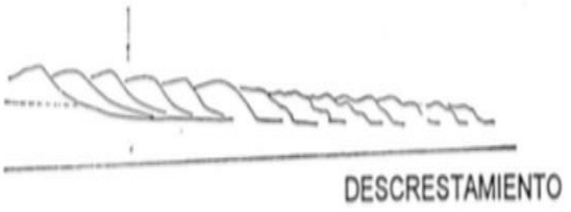
Coeficiente por el tipo de rompiente (C): Para determinar el tipo de rompiente y así poder aplicarle un factor corrector, primero es necesario el cálculo del número de Iribarren ya que es él el que marca los límites entre un tipo de rotura y otra.
El número de Iribarren se viene dado por la siguiente ecuación:

$$I_r = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H}{Lo}}} \qquad Lo = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Donde β es la pendiente del fondo, *H* la altura de ola y *Lo* la longitud de onda en profundidades indefinidas, que se obtiene de la siguiente forma:

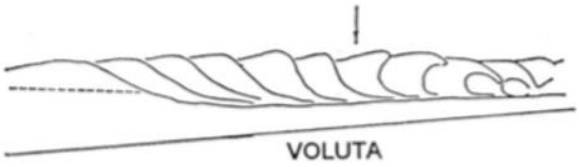
- *Si Ir < 0.46: DECRESTAMIENTO (SPILLING)*

  La cresta de la ola se va haciendo cada vez más aguda, hasta hacerse inestable y se derrama hacia abajo por la pendiente frontal de la ola. Generalmente se da en situaciones en donde el oleaje peraltado se propaga sobre playas con poco pendiente. En esta rotura el decaimiento de la altura es aproximadamente uniforme, con lo que hay gran disipación en la zona de rompientes y muy poca de su energía es reflejada hacia el mar. Es el mejor tipo de rotura para llevar a cabo un desembarco.



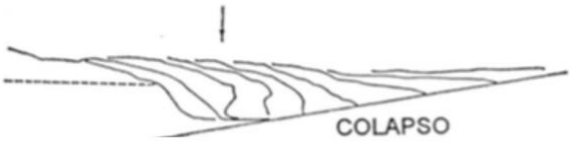
- *Si 0.46 < Ir <2.5: VOLUTA (PLUNGING)*

  Ocurre con olas con poco peralte en playas relativamente inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical y la cresta cada vez más aguda, curvándose hacia el frente hasta que finalmente precipita. El proceso de este tipo de rotura produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire, La reducción de la altura de ola durante la rotura se produce rápida y drásticamente. Las olas reformadas son usualmente de menos de una tercera parte de la altura de ola en rotura y suelen romper de nuevo muy cerca de la orilla. Este tipo de rompiente es muy peligroso para las embarcaciones ya que puede provocar inundaciones, así como el vuelco.



- *Si 2.5 < Ir < 3.3: COLAPSO (COLLAPSING)*

  El frente de la onda se aproxima a la vertical y la ola comienza a desmoronarse por su base y colapsa. El aire queda parcialmente atrapado, formando espuma. El periodo de ascenso-descenso coincide con el periodo del oleaje y el flujo sobre el talud alcanza valores máximos. La reflexión comienza a disminuir debido a la perdida de energía por turbulencia.



- *Si Ir > 3.3: OSCILACIÓN (SURGING)*

  Este tipo de rotura consiste en el ascenso y descenso por el talud de las olas con un mínimo de aire atrapado. El periodo de ascenso y descenso es menos que el periodo del oleaje y la reflexión es muy elevada, pudiendo provocar un riesgo de atravesamiento de las embarcaciones.

Cuando el oleaje rompe en voluta y colapso el desembarco se considera directamente inviable. En cambio, si rompe en decrestamiento u oscilación se determinan unos

coeficientes que son función del tanto por ciento de olas que rompen de ese tipo y de la altura de ola significante de la rompiente en pies. Las tablas se muestran a continuación:

COEFICIENTE PARA ROTURA EN DECRESTAMIENTO

% ROTURA EN DECRESTAMIENTO	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>=5
100	-0.1	-0.2	-0.5	-0.8	-1.3	-1.8	-2.5	-3.2	-4.1	-5.0
90	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-1.1	-1.6	-2.2	-2.9	-3.6	-4.5
80	0.0	-0.2	-0.4	-0.6	-1.0	-1.4	-2.0	-2.6	-3.2	-4.0
70	0.0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.9	-1.3	-1.7	-2.2	-2.8	-3.5
60	0.0	-0.1	-0.3	-0.5	-0.8	-1.1	-1.5	-1.9	-2.4	-3.0
50	0.0	-0.1	-0.2	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.6	-2.0	-2.5
40	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-2.0
30	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.5	-0.7	-1.0	-1.2	-1.5
20	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0
10	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN PIES (m)

Tabla 2: Coeficientes asociados a la rotura en decrestamiento para la obtención del MSI

COEFICIENTE PARA ROTURA EN COLAPSO

% ROTURA EN COLAPSO	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>=5
100	0.1	0.2	0.5	0.8	1.3	1.8	2.5	3.2	4.1	5.0
90	0.0	0.2	0.4	0.8	1.2	1.7	2.3	3.0	3.8	4.7
80	0.0	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	2.2	2.8	3.6	4.5
70	0.0	0.2	0.4	0.6	1.0	1.5	2.0	2.7	3.4	4.2
60	0.0	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.8	2.5	3.1	3.9
50	0.0	0.1	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.3	2.9	3.5
40	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.5	2.0	2.6	3.2
30	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.8	2.2	2.7
20	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.8	2.2
10	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	1.3	1.3	1.6

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN PIES (m)

Tabla 3: Coeficientes asociados a la rotura en colapso para la obtención del MSI

Coeficiente debido al ángulo del oleaje en la zona de rompiente (D): El ángulo con el que el oleaje incide en la costa se referencia a la perpendicular a la misma, es decir, un ángulo de incidencia de cero grados quiere decir un oleaje de incidencia normal.

ÁNGULO										
40	0.1	0.3	0.7	1.3	2.0	2.9	3.9	5.1	6.5	8.0
35	0.1	0.3	0.6	1.1	1.8	2.5	3.4	4.5	5.7	7.0
30	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.2	2.9	3.8	4.9	6.0
25	0.1	0.2	0.5	0.6	1.3	1.8	2.5	3.2	4.1	5.0
20	0.0	0.2	0.4	0.5	1.0	1.4	2.0	2.6	3.2	4.0
15	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.5	1.9	2.4	3.0
10	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	2.0
5	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	>=5

ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN PIES (m)

Tabla 4: Coeficientes asociados al ángulo de la rompiente para la obtención del MSI

Se observa que para incidencias más transversales el coeficiente aumenta ya aumenta también la dificultad del desembarco siendo para un ángulo de 40º y una altura de ola mayor o igual a cinco, totalmente inviable ya que alcanza el valor 8, a partir del cual el MSI indica la inviabilidad de realizar una operación como se explicará más adelante.

Coeficiente debido a la intensidad de corriente (E): El conocimiento de las corrientes es muy importante a la hora de llevar a cabo las maniobras de desembarco y por lo tanto lo es para el cálculo del MSI. En este caso se aplica un valor directamente que es función del valor de la corriente en nudos. Estos valores se indican en la siguiente tabla,

CORRIENTE (nudos)	COEFICIENTE	CORRIENTE (nudos)	COEFICIENTE
0.1	0.3	1.6	4.8
0.2	0.6	1.7	5.1
0.3	0.9	1.8	5.4
0.4	1.2	1.9	5.7
0.5	1.5	2.0	6.0
0.6	1.8	2.1	6.3
0.7	2.1	2.2	6.6
0.8	2.4	2.3	6.9
0.9	2.7	2.4	7.2
1.0	3.0	2.5	7.5
1.1	3.3	2.6	7.8
1.2	3.6	2.7	8.1
1.3	3.9	2.8	8.4
1.4	4.2	2.9	8.7
1.5	4.5	3.0	9.0

Tabla 5: Coeficientes asociados a la intensidad de la corriente para la obtención del MSI

Para corrientes a partir de 2.7 nudos el valor del coeficiente supera el 8 por lo que el desembarco es inviable directamente por ello.

Coeficiente por viento (F): para la obtención de este coeficiente primero hay que diferenciar entre viento *onshore* y *offshore*. Nos referimos como viento onshore a aquel que va desde tierra hacia mar y con offshore, lo contrario, aquel que va de mar a tierra. Al igual que el oleaje, la dirección que lleva el viento se referencia a la normal a la costa para el cálculo del coeficiente, siendo los 0º la dirección normal a la costa. En el esquema siguiente se puede ver dicha referencia y por la dirección que llevan las flechas sería de un viento offshore.

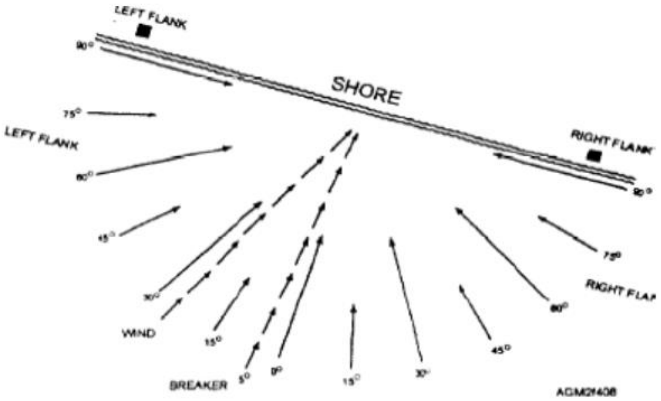


Figura 20: Esquema referencia de los ángulos incidentes en costa

La tabla de coeficientes relativos a la velocidad y dirección del viento son:

VELOCIDAD DEL VIENTO							
	36 – 40	2.0	3.0	4.0	1.5	2.0	4.0
	31 – 35	1.5	2.0	3.0	1.0	1.5	3.0
	26 – 30	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	2.0
	21 – 25	0.5	1.0	1.5	0.0	0.5	1.5
	16 – 20	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5	1.0
	11 – 15	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	1.0
	6 – 10	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5
	0 – 5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5
		00 – 30º	30 – 60º	60 -90º	00 – 30º	30 – 60º	60 -90º
		DESDE TIERRA (ONSHORE)			DESDE MAR (OFFSHORE)		

Tabla 6: Coeficientes asociados al viento para la obtención del MSI

Una vez calculados cada uno de los coeficientes para cada nodo de la malla, se obtiene el valor del MSI para cada punto como la suma de todos los coeficientes anteriores.

$$MSI = A + B + C + D + E + F$$

Si el valor de la suma anterior es igual o superior a ocho (MSI>8), el desembarco se considera inviable.

Este valor es interesante tanto en puntos concretos como a lo largo de un perfil ya que puede ser útil no solo para el momento del desembarco sino también para la navegabilidad u otras operaciones.

Los productos finales relacionados con la variable MSI son, como se ve en las figuras siguientes, un mapa de la zona en el que se indica según una escala de colores el valor del MSI, siendo a partir de 8 el color rojo que indica la inviabilidad de la operación, sobre él, el usuario podrá definir un perfil y varios puntos de los que se obtendrán dos productos más, el valor a lo largo del perfil y la tendencia que tendrá en los puntos a lo largo de todo el forecast. Adicionalmente se muestra la línea de rotura mediante la línea magenta.

Los productos de ejemplo son obtenidos del post-proceso de un caso en la playa del Retín de Cádiz.

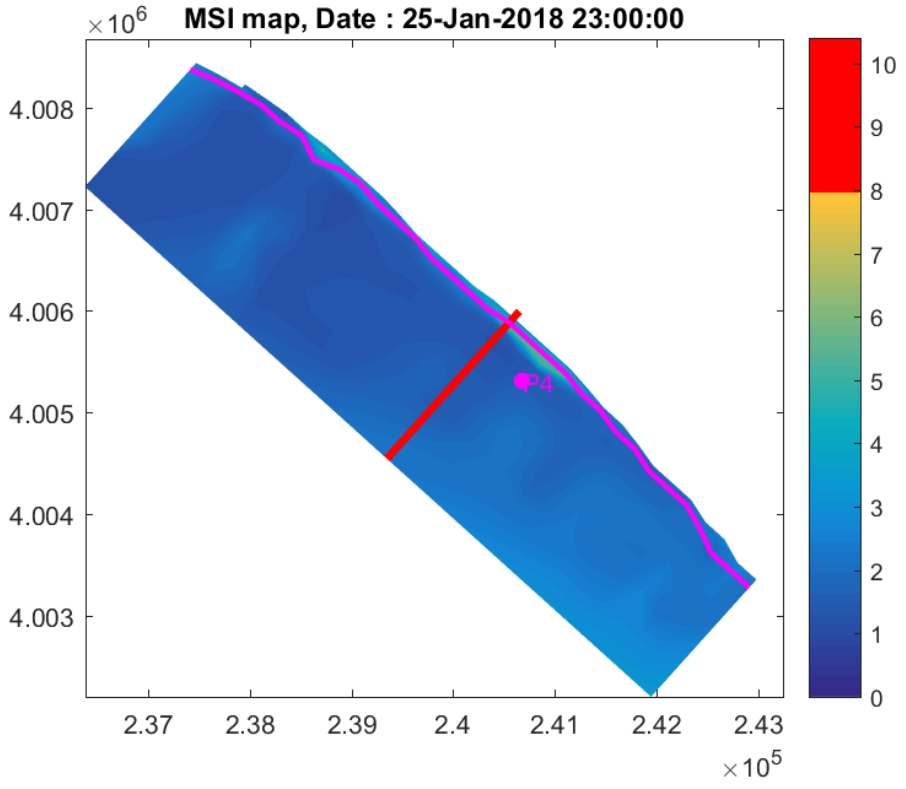


Figura 21: Mapa MSI en la malla de detalle

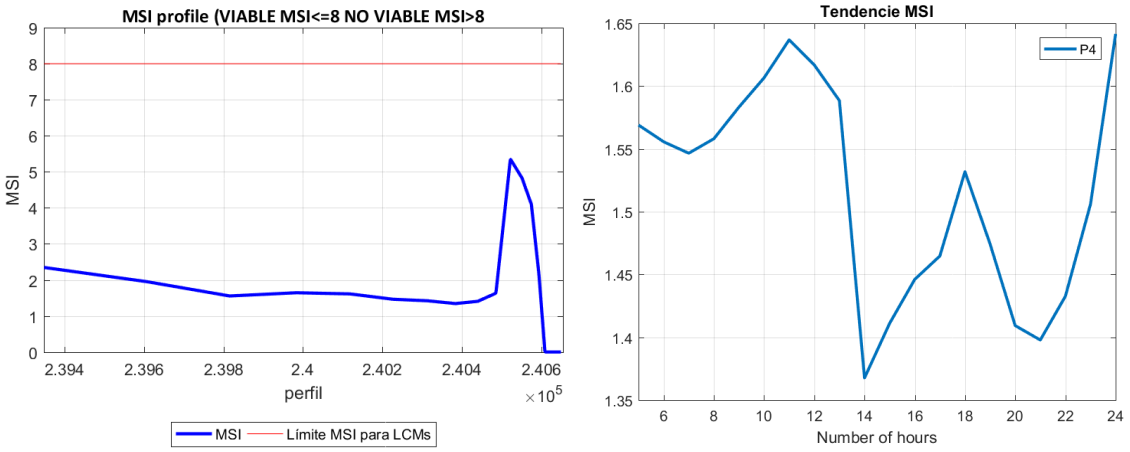


Figura 22: Valor a lo largo de un perfil y tendencia en un punto del MSI

3.2.3.2. NAVEGABILIDAD

La navegabilidad corresponde con el periodo desde que sale la unidad o el buque hasta la zona en la que comienza la aproximación final. Su viabilidad depende fundamentalmente de la altura de la ola y su valor cambiará en función del tipo de embarcación, distinguiéndose entre Supercats y vehículos de asalto anfibio por un lado (SCT y AAV) y lanchas de desembarco anfibio mecanizadas por otro (LCM: Landing Craft Mechanized), que fueron explicadas anteriormente.

A continuación, se expondrán los límites operacionales de cada una de ellas.

- <u>SCTs y AAVs</u>

  Estos dos tipos de embarcaciones comparten los límites operacionales, que van en función de la altura de ola y que se presentan a continuación:

ALTURA DE OLA	OPERATIVIDAD
Hs < 1.25m	VIABLE
1.25 < Hs < 2.5m	MARGINAL
Hs > 2.5m	NO VIABLE

- LCMs

Su límite operacional depende de la altura de ola y de la velocidad del viento medida en nudos (1m/s = 1.94 nudos).

ALTURA DE OLA	VIENTO	OPERATIVIDAD
Hs <= 2.1 m	V <= 35 kts	VIABLE
Hs > 2.1 m	V <= 35 kts	NO VIABLE
Hs < 2.1 m	V > 35 kts	
Hs > 2.1 m	V > 35 kts	

Es decir, siempre que la altura de ola supere los 2.1 metros o el viento los 35 nudos no podrán operar.

Estos límites son los que calcula la herramienta de forma automática, permitiendo elegir en cada momento el tipo de embarcación. Los productos que se ofrecen para poder tomar decisiones sobre la navegabilidad son, un mapa general de la zona sobre el que poder definir hasta 5 perfiles que serían los recorridos de las embarcaciones y que se indicaran mediante las coordenadas de los puntos inicial y final.

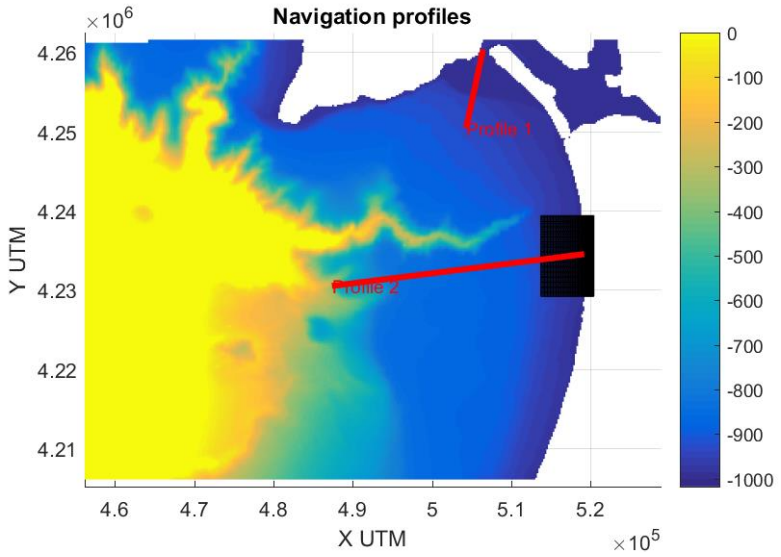


Figura 23: Mapa general con los perfiles de navegabilidad.

De cada uno de los perfiles definidos da información de la viabilidad o no viabilidad de la operación a lo largo de ellos, que dependerá como se ha visto anteriormente del oleaje en el caso de los supercats y AAv y del oleaje y viento para los LCM.

En el ejemplo se puede ver como indica la viabilidad a lo largo de todo el perfil para embarcaciones de tipo LCM, y en cambio para las AAV y SCT durante un tramo no es viable su navegación.

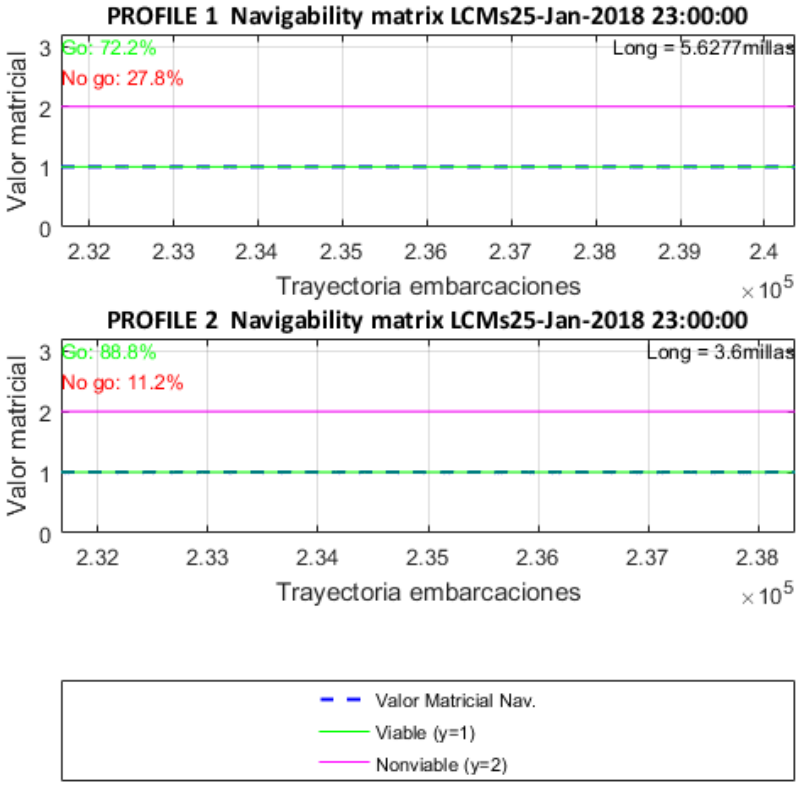


Figura 24: Perfiles de navegabilidad de las LCM.

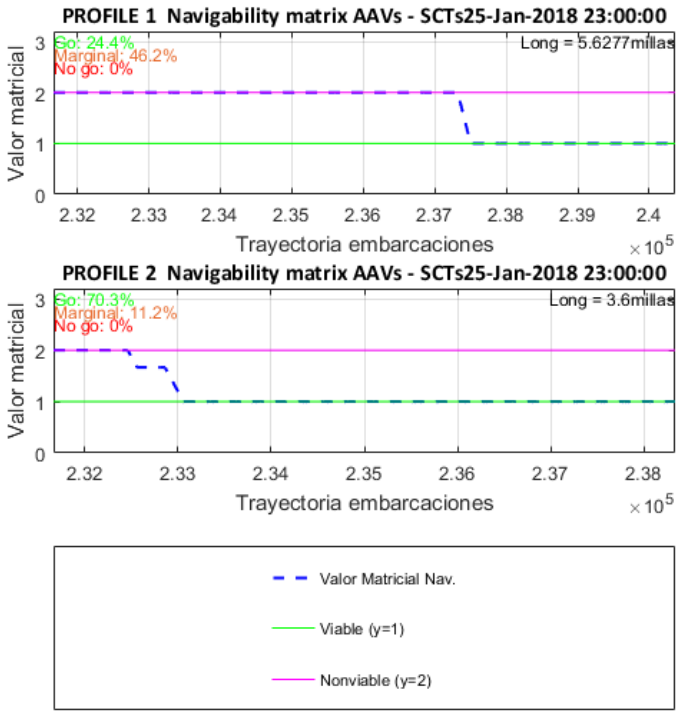


Figura 25: Perfiles de navegabilidad de AAVs y SCTs

Adicionalmente, se podrán definir hasta 10 puntos en todo el dominio introducido en el SOPROA y en ellos se proporcionará información sobre la tendencia del oleaje para los días introducidos en el forzamiento (forecast), se indicará además el instante en el que la altura de ola es máxima y mínima, así como su valor.

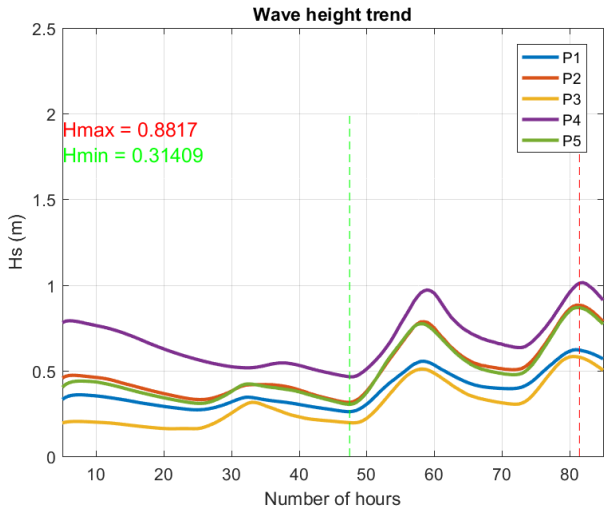


Figura 26: Tendencia de la altura de ola en los puntos introducidos.

El último producto relacionado con la navegabilidad consiste en un mapa de la zona de detalle en el que mediante colores se indica la operatividad de la zona. Este mapa es especialmente interesante ya que la zona más crítica es la más cercana a la costa.

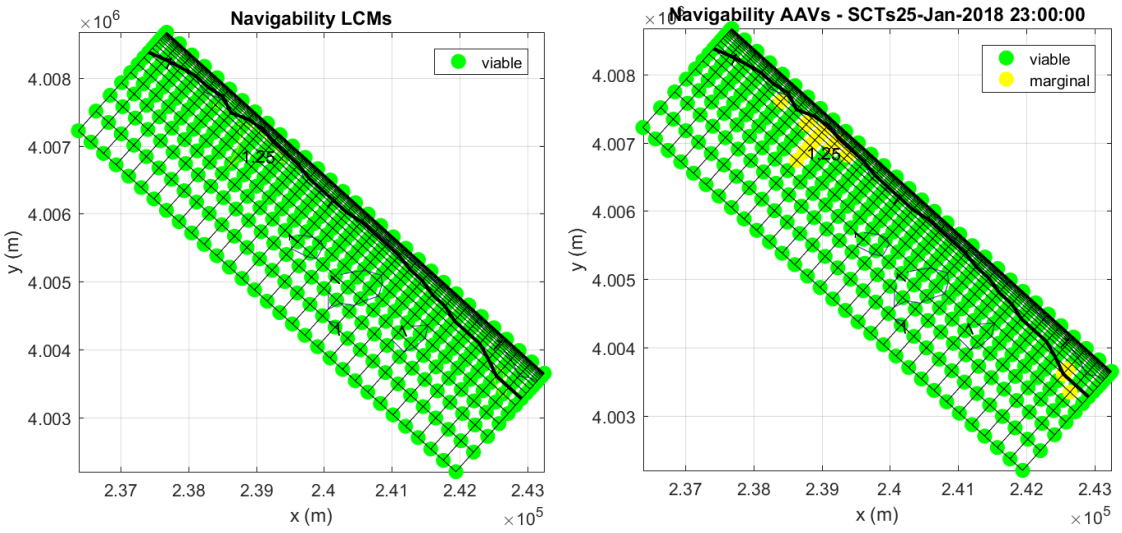


Figura 27: Matrices de navegabilidad en la malla de detalle.

Se puede identificar una zona en la figura de la derecha en la que se indica mediante el color amarillo para los AAV y los SCT, que los parámetros están en el límite de la no viabilidad.

Al igual que en la figura 21, en estos mapas está representada la línea de rotura mediante la línea negra.

El valor añadido de la interfaz reside, en que el usuario, el oficial METOC por lo general, podrá usar de forma interactiva la herramienta, siendo de gran utilidad ya que pueden moverse los perfiles y puntos dentro del dominio y también en el tiempo, obteniendo los productos directamente y pudiendo así escoger la zona y el instante de tiempo que mejores condiciones presente.

3.2.3.3. VARADA

La maniobra de varada se podría definir como el momento en el que la embarcación cambia de medio, es decir, del mar para en tierra o estando en tierra sale a navegar. Por tanto, la zona más importante para esta maniobra es la zona de rompientes ya que es la más delicada. Por ello son importante las variables altura de ola, periodo y tipo de rotura. Los productos de esta maniobra están orientados a los Supercats y a los vehículos de asalto anfibio. Se exponen a continuación los límites operacionales para cada tipo de embarcación.

- Supercats (SCT)

Como puede verse las limitaciones son mayores por la noche ya que es más complicada la maniobrabilidad por la falta de visión. La operatividad se ve limitada por la altura de ola de 1 metro, a la que se añaden condiciones adicionales en caso de ser justo ese su valor. El tipo de rotura cobra importancia ya que puede afectar a la embarcación produciéndose vuelcos o inundaciones de la misma.

	ALTURA DE OLA	OPERATIVIDAD
DÍA	Hs < 1.33 m	VIABLE
	Hs = 1.33 m	MARGINAL
	Hs > 1.33 m	NO VIABLE
NOCHE	Hs < 1 m	VIABLE
	Hs = 1m / Tm>10s/ Descrestamiento > 70%	MARGINAL
	Hs > 1 m	NO VIABLE

- Vehículos de asalto anfibio (AAV)

Como se indicó en su descripción, son vehículos para dar cobertura y apoyo a las tropas en el desembarco pudiendo desplazarse tanto en mar como en tierra. El momento de la varada para ellas es crítico, siendo las variables que más influyen en su operatividad la altura de ola en rompiente, el tipo de rotura y el periodo.

ALTURA DE OLA	OPERATIVIDAD
Hs <= 1.33 m	VIABLE
1.33 < Hs < 2 m	MARGINAL
Hs=2m / 100%Voluta / Tm=9s	
Hs=2m / 50%Voluta / 50%Decrest. / Tm=8s	
Hs=2m / 100%Decrest. / Tm=5s	
Hs > 2 m	NO VIABLE

La limitante principal es la altura de ola, siendo la crítica los 2 metros. Cuando se da esta situación entran en juego otras variables como el tipo de rotura y el periodo.

El SOPROA calcula automáticamente estos límites, calculando previamente la zona de rotura para así obtener los parámetros en esa zona. El producto es un mapa donde se indica con colores la viabilidad de la operación. Al igual que en la navegabilidad se puede ver de forma separada para cada tipo de embarcación y el usuario se puede mover de forma dinámica a lo largo del tiempo incluido en el forecast para decidir que instante es el que reúne las mejores condiciones de desembarco.

A continuación, se muestran las figuras que se ofrecen como producto, se presenta una situación en la que la maniobra es viable para un tipo de embarcación, pero no para el otro.

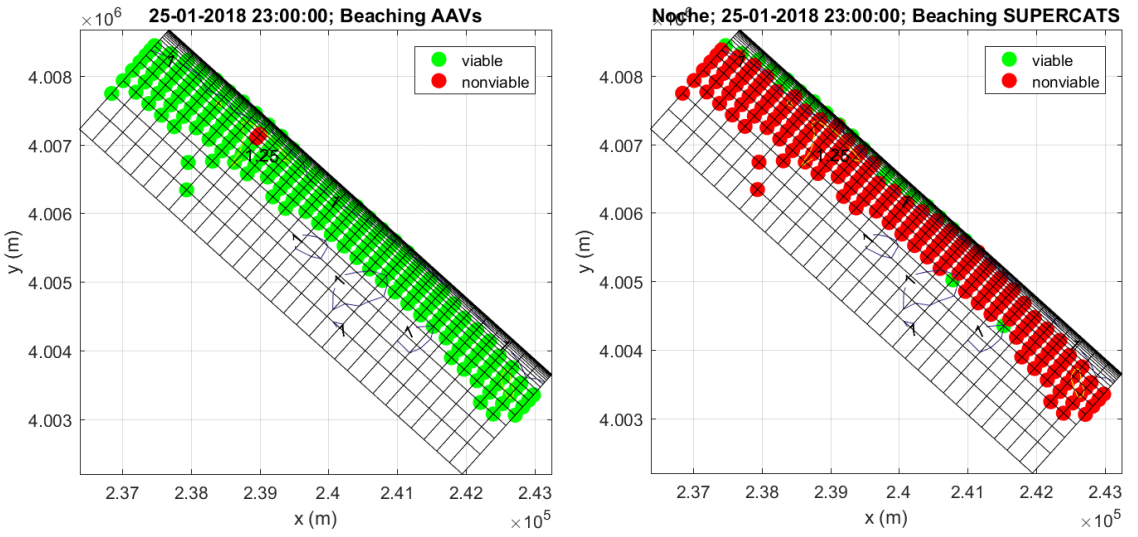


Figura 28: Productos de varada.

3.2.3.4. INFORME

El producto final es un informe, de seis páginas, realizado de forma automática en el que se indica toda la información necesaria para poder tomar una decisión de forma eficaz. El informe ha sido aceptado por el Instituto Hidrográfico de la Marina tras un proceso de iteración con los oficiales METOC.

La información está redactada en el orden en el que se suceden las maniobras, y en el que resulta más fácil llegar a comprender la situación de la zona.

Se explica a continuación cada uno de los puntos de los que se compone. En el Anexo 1 del documento se presenta el manual de la herramienta mediante el montaje y post-proceso de un caso real, al final de dicho manual se puede ver un informe completo.

Para la generación del informe, se ha realizado una plantilla en LaTeX. Mediante MATLAB, se lee dicha plantilla y se modifican las líneas necesarias introduciendo las rutas, imágenes y valores del caso del que se esté realizando el post-proceso. Finalmente, gracias al programa MiKTeX (perteneciente a LaTeX y que se aporta junto al EXE del SOPROA), se puede convertir la plantilla en un archivo PDF.

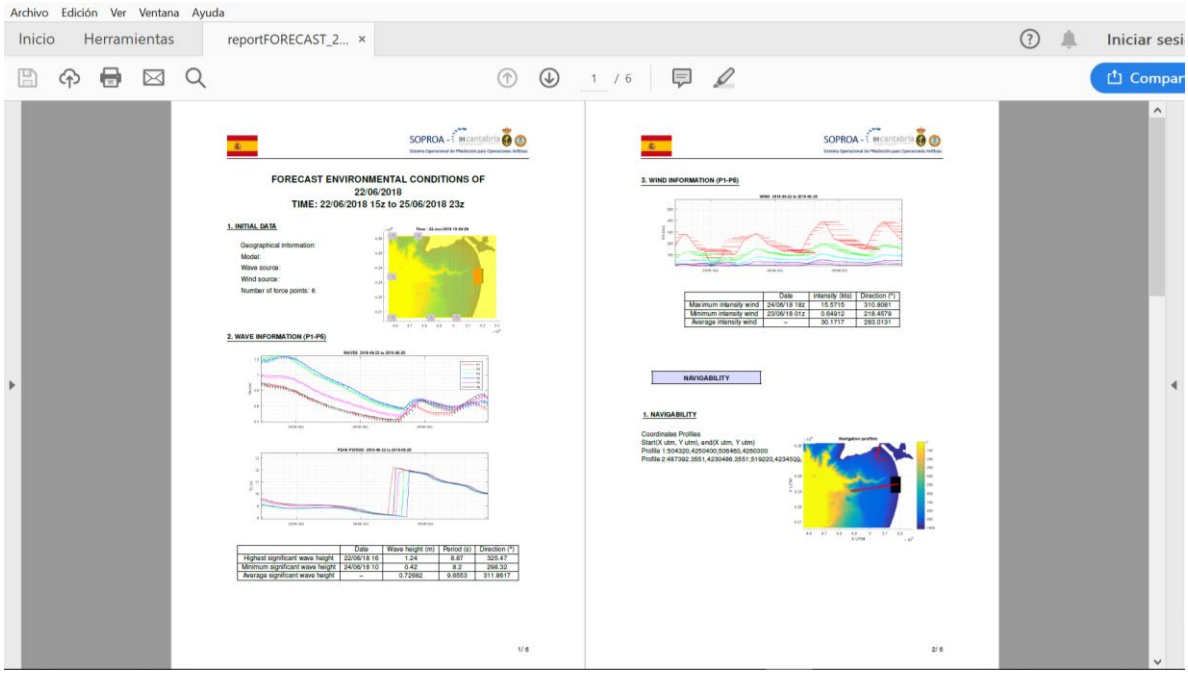


Figura 29: Pantallazo de las dos primeras páginas del informe PDF.

1. DATOS INICIALES

El informe comienza con una imagen de la batimetría general, sobre ella están marcadas la malla general y la de detalle, así como la localización de los puntos de forzamiento introducidos.

También, unas líneas en las que se invita a anotar la fuente de datos del oleaje, del viento y el modelo utilizado, esto no lo rellena de forma automática ya que es un proceso externo. Es información del usuario.

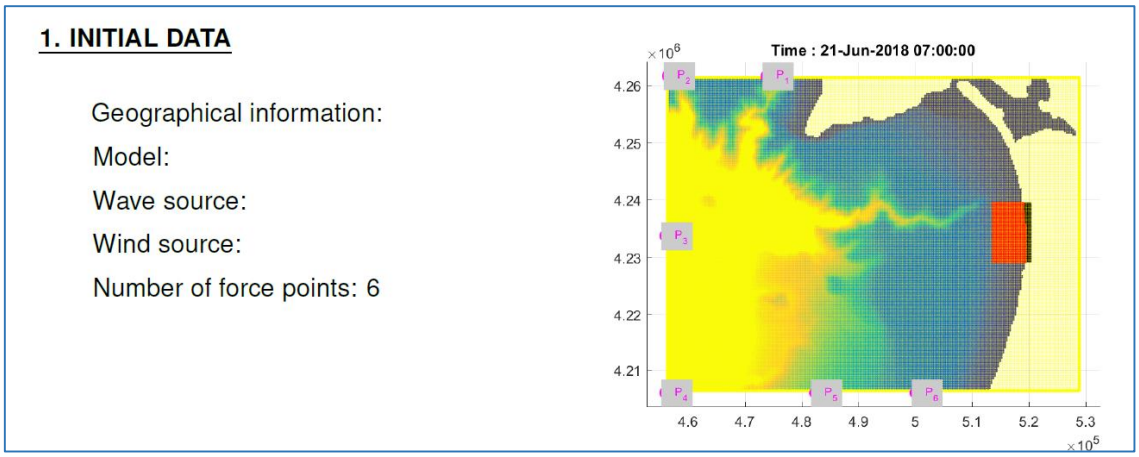


Figura 30: Primer apartado del informe PDF.

2. INFORMACIÓN DEL OLEAJE

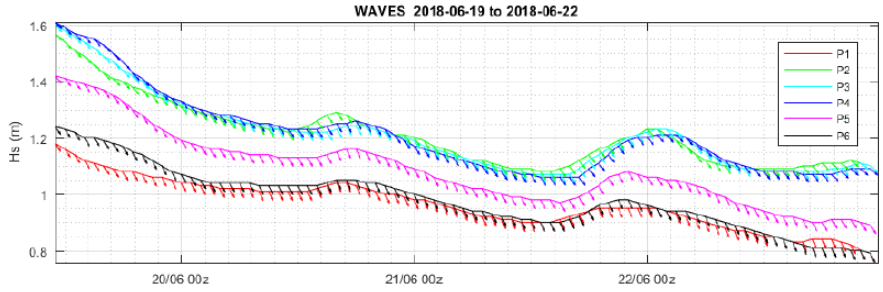
Con el siguiente punto se presenta el forzamiento introducido en el modelo, para poder tener una primera idea de las condiciones de oleaje que habrá en la zona. Para ello el apartado se compone de dos gráficas y una tabla.

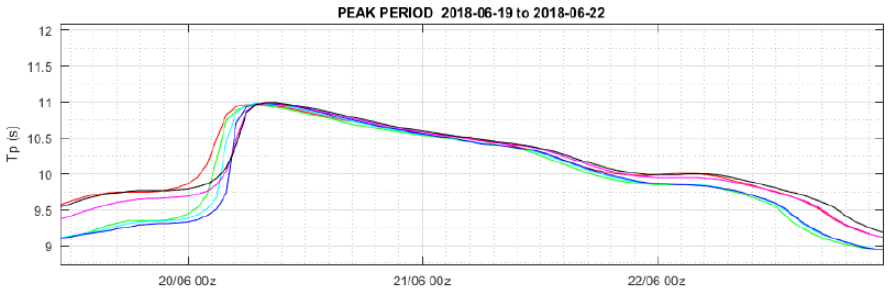
En la primera gráfica se indica la altura de ola para cada uno de los puntos de forzamiento, distinguiéndose entre ellos por el color, además cada una de las líneas incluye flechas que indican la dirección del oleaje en esos puntos e instantes.

En la segunda, se representan los valores del periodo pico, también para cada uno de los puntos.

Por último, la tabla recoge el instante en el que se produce la máxima altura de ola, con su valor en metros, su periodo y dirección. La misma información se da para el instante en el que se produce la mínima altura de ola y finalmente la media de los tres valores indicados (Hs, Tp, dirección).

2. WAVE INFORMATION (P1-P6)





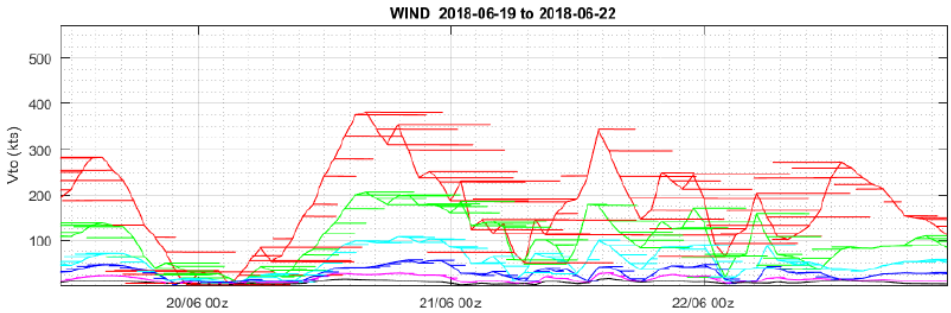
	Date	Wave height (m)	Period (s)	Direction (°)
Highest significant wave height	19/06/18 11	1.61	9.09	321.71
Minimum significant wave height	22/06/18 23	0.79	9.11	299.76
Average significant wave height	–	1.1117	10.0395	307.5697

Figura 31: Segundo apartado del informe PDF.

3. INFORMACIÓN DEL VIENTO

La información se da de la misma manera que la de la altura de ola, un gráfico con el valor del viento introducido en cada punto de forzamiento y una tabla con la fecha, intensidad y dirección del momento en el viento es máximo y mínimo, así como sus valores medios.

3. WIND INFORMATION (P1-P6)



	Date	intensity (kts)	Direction (°)
Maximum intensity wind	21/06/18 15z	15.698	305.094
Minimum intensity wind	19/06/18 23z	0.028407	352.4547
Average intensity wind	–	25.7979	240.497

Figura 32: Apartado tercero del informe PDF.

4. NAVEGABILIDAD

Una vez expuestos los valores con los que el modelo ha trabajado, se comienzan a mostrar los productos más concretos y que resultan de especial importancia para el oficial METOC.

4.1. Navegabilidad general

Al comienzo de este apartado se indican las coordenadas de los perfiles introducidos por el usuario, así como su localización en el mapa general.

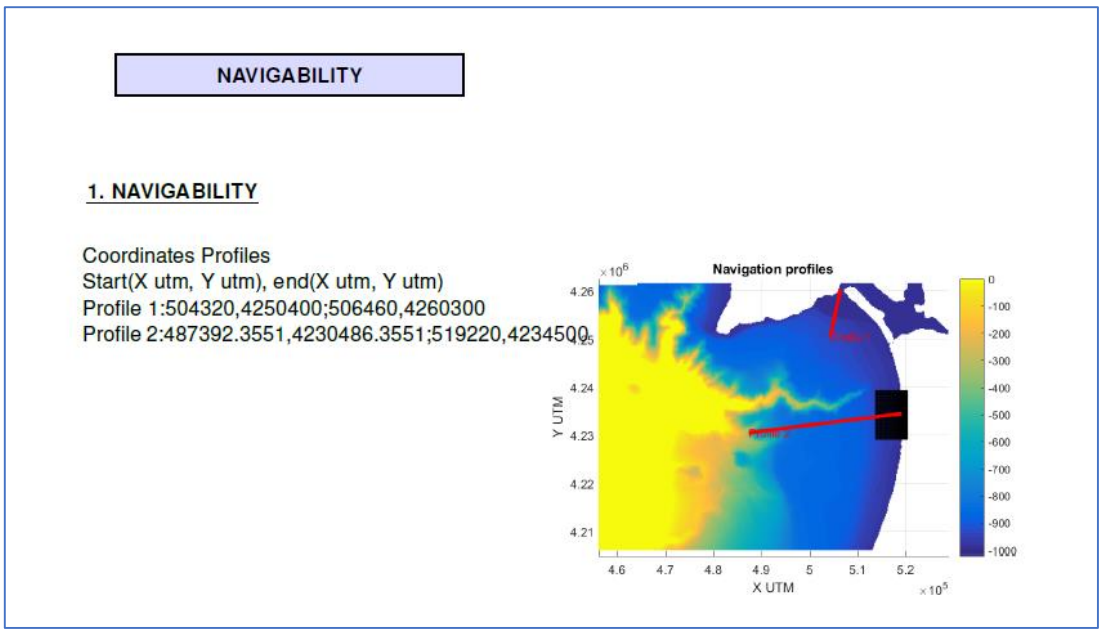


Figura 33: Introducción del apartado cuatro del informe PDF.

Posteriormente se muestran las matrices de navegabilidad de cada uno de los perfiles, y para los tres tipos de embarcación en las que se indica la longitud del perfil, el porcentaje en el que es viable navegar y su valor matricial.

Una vez vistos los valores de la navegabilidad en la zona general, se centran en la de detalle, presentando sobre ella la viabilidad de la maniobra mediante el uso de colores. Estas gráficas son las correspondientes a las figuras 24 y 25 que se muestran en el apartado 3.2.5.2.

4.2. Tendencias

Las tendencias se dan en puntos que el usuario ha introducido, pudiendo introducir un máximo de diez. La variable que se representa es la altura de ola a lo largo de todo el forecast. También viene indicada la máxima y mínima altura de ola del conjunto de puntos.

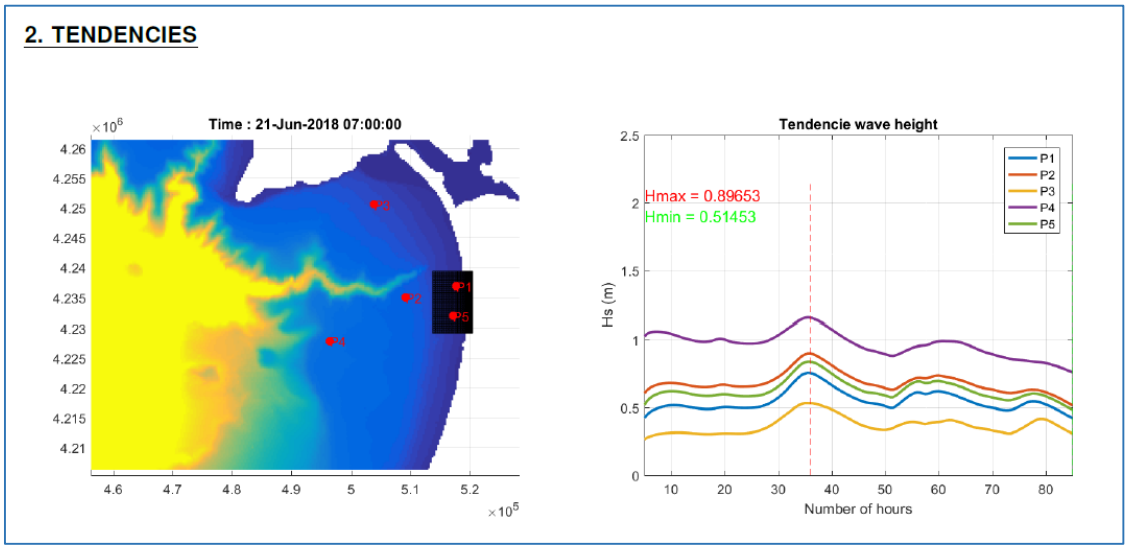


Figura 34: Gráficos de tendencias de oleaje aportados en el informe PDF.

Los valores de tendencia dan información de las características del oleaje en puntos de fondeo de los buques o puntos de largado de las embarcaciones. También es útil para los puntos de transito intermedio de las embarcaciones hasta los puntos de reunión antes de llegar a la playa.

5. INFORMACIÓN DEL PERFIL

A partir de este punto la información se centra más en la zona de detalle, zona como ya se ha indicado de especial importancia por ser la más crítica en las operaciones.

Primeramente, se presenta la batimetría en la zona, con valores como la pendiente, la máxima y mínima altura de ola, corrientes y viento que tendremos en ella durante el forecast y el tipo predominante de rotura.

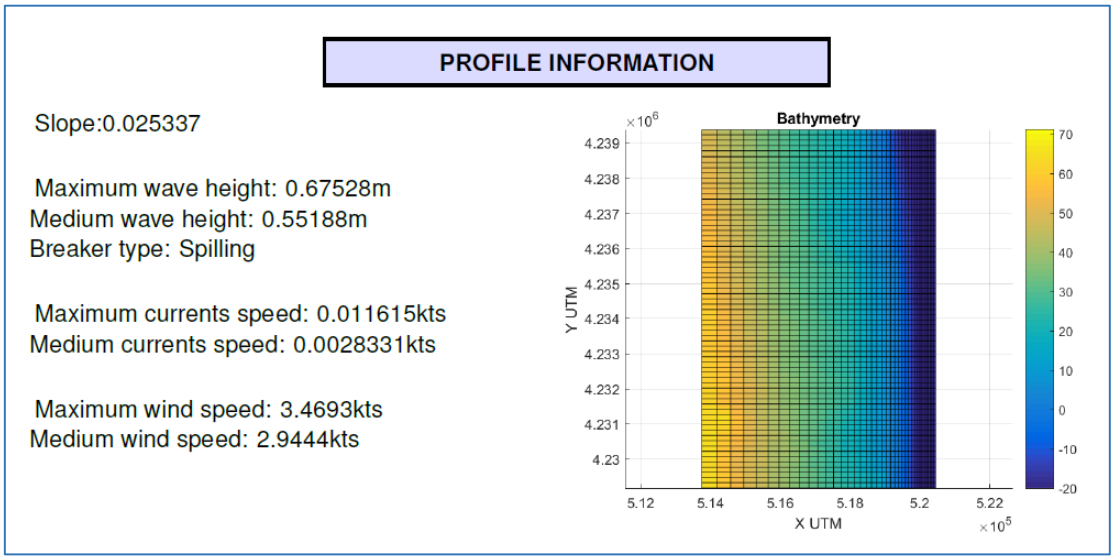


Figura 35: Detalles de la malla de detalle en el informe PDF.

A continuación, se da información de un perfil de referencia, este siempre será el perfil central de la playa. De él se representa el perfil batimétrico, la altura de ola, la corriente y el viento.

Los datos se obtendrán del instante de tiempo que el usuario haya escogido, el mismo que para el que se evalúa la navegabilidad, la varada y el MSI. Mediante una línea roja se representa la línea de costa en cada uno de los perfiles.

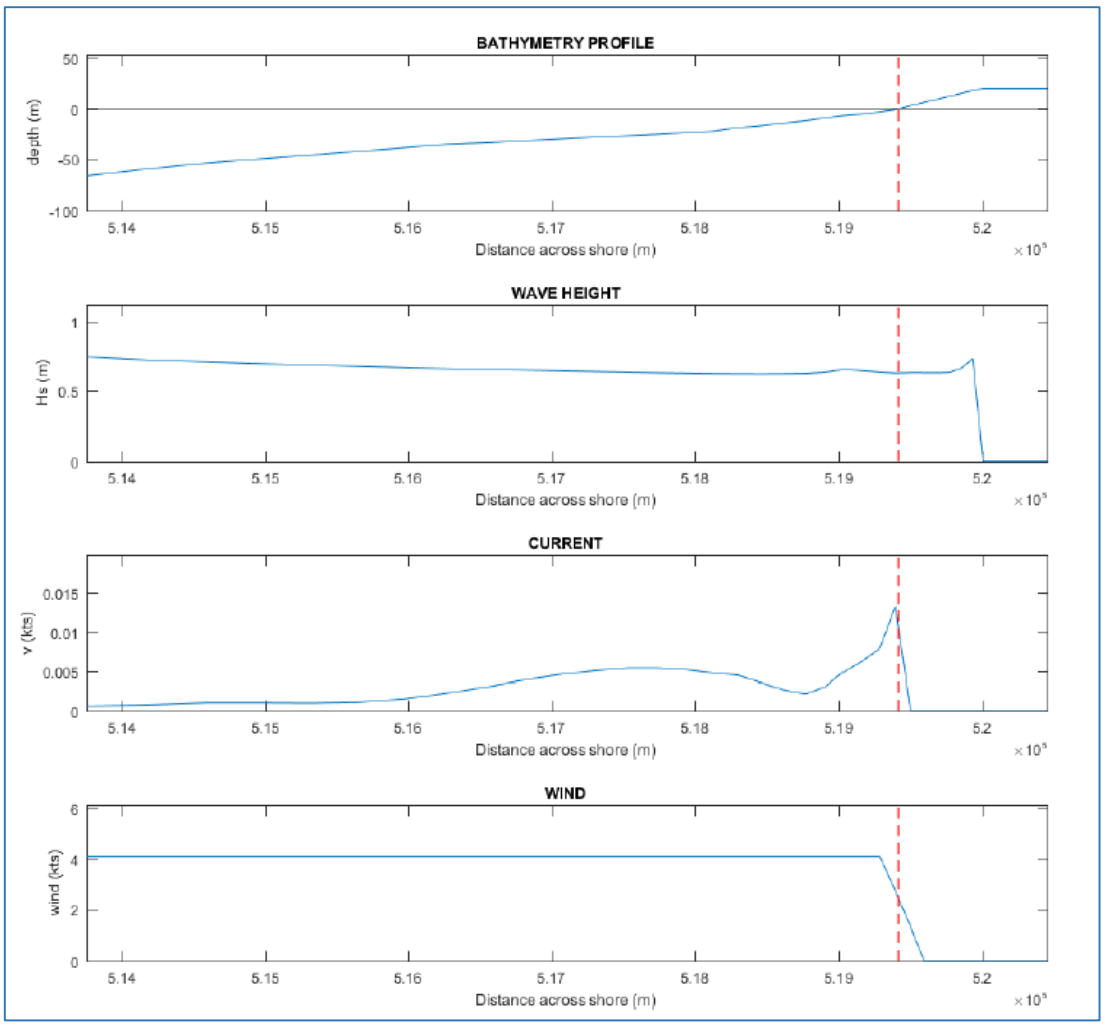


Figura 36: Perfiles de la batimetría, Hs, Tp, corrientes y viento aportados en el informe PDF.

6. INFORMACIÓN FORECAST DE OLEAJE

Este es el último punto del informe, compuesto a su vez por otros cuatro, en los que se describen los últimos movimientos de las maniobras de desembarco, los de mayor interés. Todos ellos proporcionan información de la zona de detalle.

6.1. Varada

Se muestran los mapas de varada, productos mostrados en la figura 28. Se da la información tanto para los supercats como para los vehículos de asalto anfibio.

Para la varada es importante saber el valor del MSI, para ver la viabilidad del desembarco, punto que se indica a continuación.

6.2. MSI

En relación al MSI, se proporcionan tres productos. El primero, un mapa general de la zona de detalle en el que mediante colores se indica el valor del MSI en toda ella en el instante especificado.

Sobre ella, en la interfaz, el usuario podrá definir y mover un perfil, lo cual nos lleva al segundo producto, el valor del MSI a lo largo de ese perfil, visto en un gráfico en el que en el eje de abscisas se representa la distancia y en el de ordenadas el valor en cada punto, estando marcado de forma visual mediante una línea roja el límite operacional que está fijado en 8.

El tercer producto consiste en la tendencia del valor del MSI en uno o varios puntos a lo largo del forecast. Estos puntos son introducidos por el usuario junto con los de tendencia del oleaje. Si alguno de esos puntos se encuentra dentro de la malla de detalle, se dará su tendencia tanto de oleaje como de MSI.

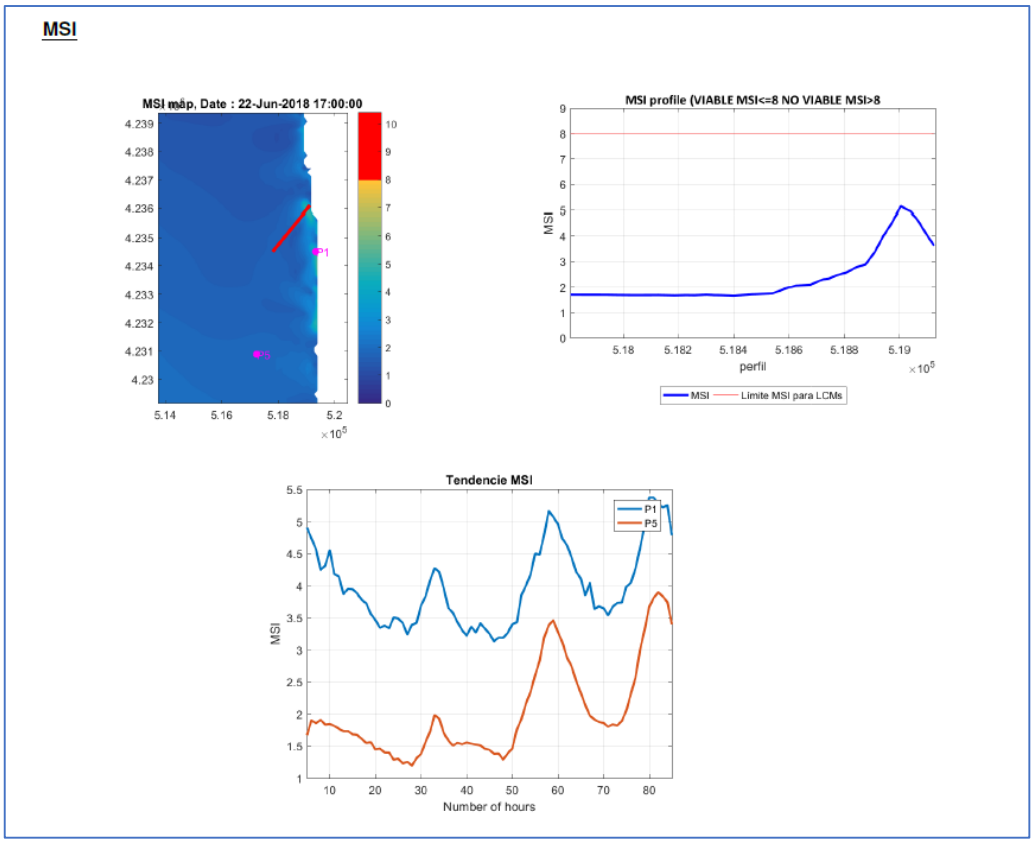


Figura 37: Productos de MSI en el informe PDF.

6.3. Parámetros en la zona de rompientes

La información se proporciona de dos formas distintas. Como tendencia a lo largo del periodo forecast calculado en la que se aportan valores medios y para un instante concreto determinado por el usuario, y que es aquel para el que se aporta la información de los apartados anteriores.

Primero se indica la anchura y longitud de la zona de rompientes, esta última siempre será la longitud que se haya definido para la malla de detalle. A continuación, el tipo de rotura con el tanto por ciento que se produce de cada una de ellas. Y por último, parámetros del oleaje, valores máximos, mínimos y medios de la altura de ola en rompientes, su periodo y dirección.

6.4. Nivel del mar

Este es el último apartado del informe, en él se lee el valor de marea introducido por el usuario en el Excel de forzamiento, se pinta y se determina en qué instantes son la bajamar y la pleamar, su valor y su instante temporal indicando todo ello en una tabla resumen.

SEA LEVEL

DATE	TIME	HEIGHT(m)	H/L
19/06/18	13	1.113	L
19/06/18	20	3.527	H
20/06/18	02	1.037	L
20/06/18	14	1.286	L
20/06/18	21	3.383	H
21/06/18	03	1.166	L
21/06/18	10	3.138	H
21/06/18	16	1.366	L
21/06/18	22	3.303	H
22/06/18	04	1.215	L
22/06/18	11	3.174	H
22/06/18	17	1.324	L

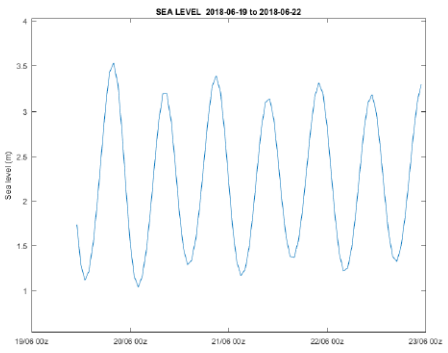
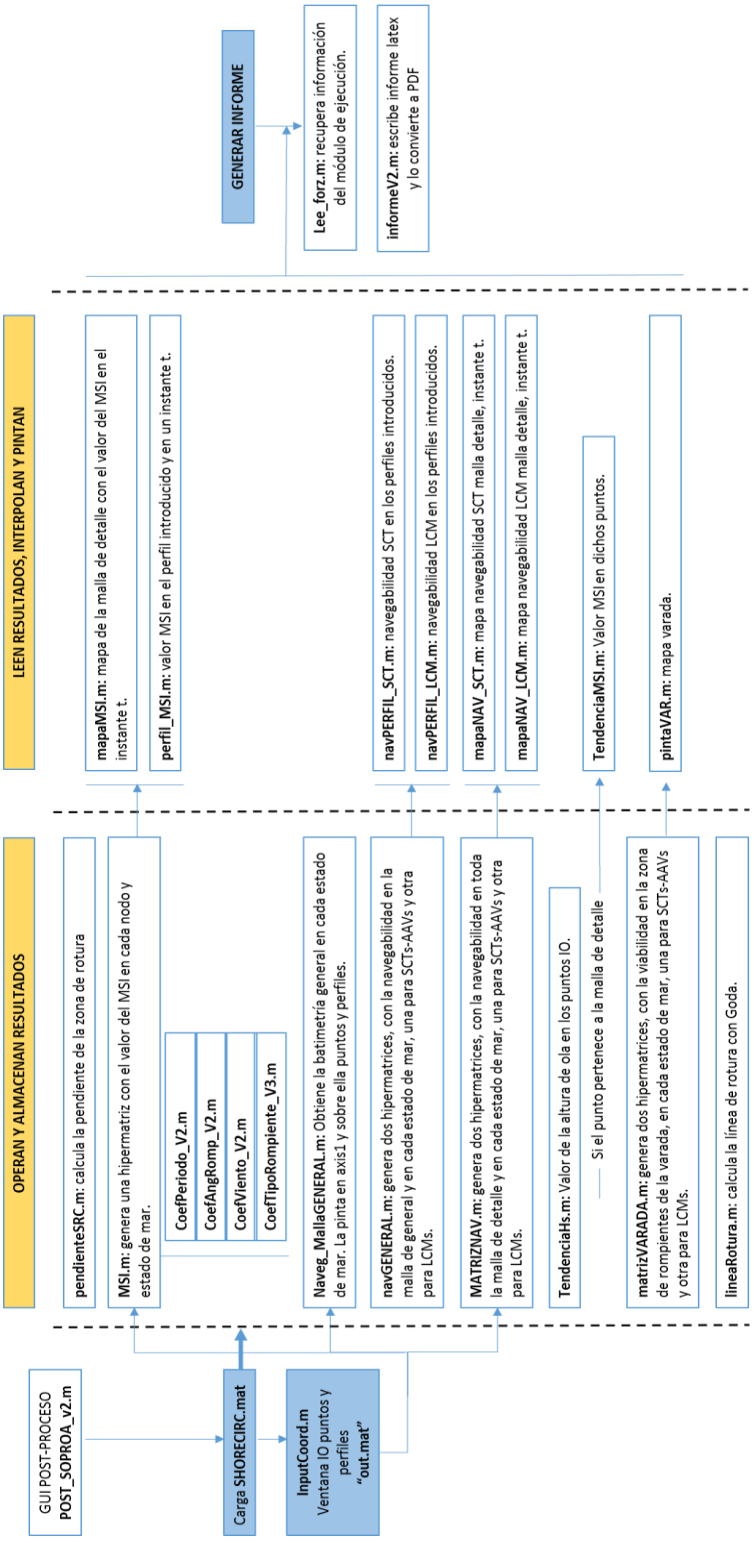


Figura 38: Tabla y gráfico del nivel del mar.

3.2.3.5. ESTRUCTURA GUI POST-PROCESO

A continuación, se describen los scripts que generan los productos anteriormente presentados.



4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para que la herramienta sea fiable, es necesario garantizar que los resultados que la herramienta aporta son adecuados. Para hacer esta comprobación se han simulado dos casos de referencia clásicos o benchmark, uno de campo y otro a escala de laboratorio. Los casos seleccionados son aptos para validar la herramienta y someter el sistema a una prueba de uso real.

4.1. Caso benchmark. Luc Hamm (1990)

Se han simulado dos experimentos llevados a cabo por Luc Hamm (1990). Se llevaron a cabo en un tanque de 30 m por 30 m, multidireccional. El primer ensayo consiste en una playa con batimetría recta y paralela de pendiente 1:30, el segundo tiene la misma batimetría, pero con un rip channel cóncavo excavado en la zona central. Se tomaron medidas en 50 de oleaje puntos diferentes y de las corrientes producidas por el rip en 7 puntos a lo largo del perfil central.

En los ensayos se usaron distintos tipos de oleaje, monocromáticos, unidireccional y multidireccional. Es este último el que se ha usado para reproducir los casos en el sistema SOPROA ya que la herramienta usa la dispersión direccional a la hora de ejecutar la propagación.

La batimetría para el rip channel se ha representado según la expresión analítica siguiente (Noda,1974):

$$Zf(x,y) = 0.1 - \frac{X}{30}\left[1 + 3\exp\left(-\frac{X}{3}\right)cos^{10}\left(\frac{\pi y}{30}\right)\right]$$

Con $X = 18 - x$

Variando *x* entre 0 y 18 metros e *y* entre -15 y +15 metros.

La disposición final del experimento propuesto por Hamm queda de la siguiente manera:

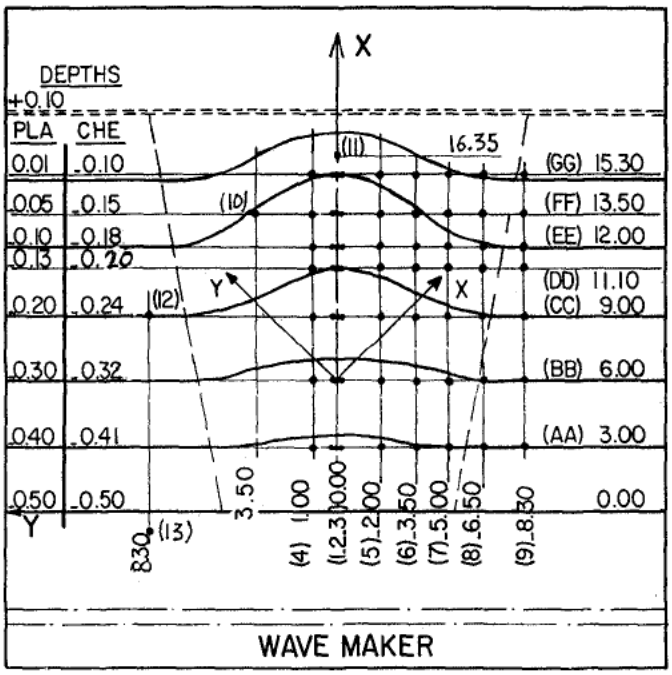


Figura 39: Esquema aportado por Hamm de la batimetría y localización de la instrumentación. (Imagen obtenida de la publicación "Directional nearshore wave propagation over a rip channel", de Luc Hamm).

La condición de oleaje que se ha decido simular es de:

- Hs = 40 mm
- Tp = 1.976 s
- Gamma = 3.3
- n = 6

Correspondiendo gamma y n a los parámetros del espectro JONSWAP, donde n indica la dispersión angular. El espectro generado tiene la forma:

$$S(f,\theta) = S_\gamma(f)cos^n\theta$$

Para poder hacer un mejor estudio de los resultados se ha decidido escalar los valores propuestos por Hamm, tanto de batimetría como de condiciones de oleaje.

Se ha tomado una escala de 1:100 quedando por tanto las condiciones de oleaje así:

- Hs = 4 m
- Tp = 19.76 s

Además, para la definición del espectro JONSWAP, en el forzamiento del SWAN es necesaria la dispersión angular en grados, por lo que entrando en la tabla que proporciona el manual de usuario del SWAN se obtiene la equivalencia de 21.2º para n=6.

Table A.1: Directional distribution.

MS	DSPR (in °)
1.	37.5
2.	31.5
3.	27.6
4.	24.9
5.	22.9
6.	21.2
7.	19.9
8.	18.8
9.	17.9
10.	17.1
15.	14.2
20.	12.4
30.	10.2
40.	8.9
50.	8.0
60.	7.3
70.	6.8
80.	6.4
90.	6.0
100.	5.7
200.	4.0
400.	2.9
800.	2.0

Figura 40: Cuadro de equivalencia de la dispersión direccional perteneciente al manual de usuario del SWAN.

En cuanto a la batimetría, al escalarla queda un dominio de 3 km por 3 km. Se ha tomado la decisión de hacerla más ancha, quedando de 60 km por 30 km, ya que la zona central es la de interés y no es posible reproducir de forma exacta las condiciones de contorno supuestas idealizadas en estos ensayos en cuanto a la posible reflexión en las paredes del tanque.

4.1.1. Batimetría plana y paralela.

La batimetría que se propone para la ejecución del caso es la siguiente:

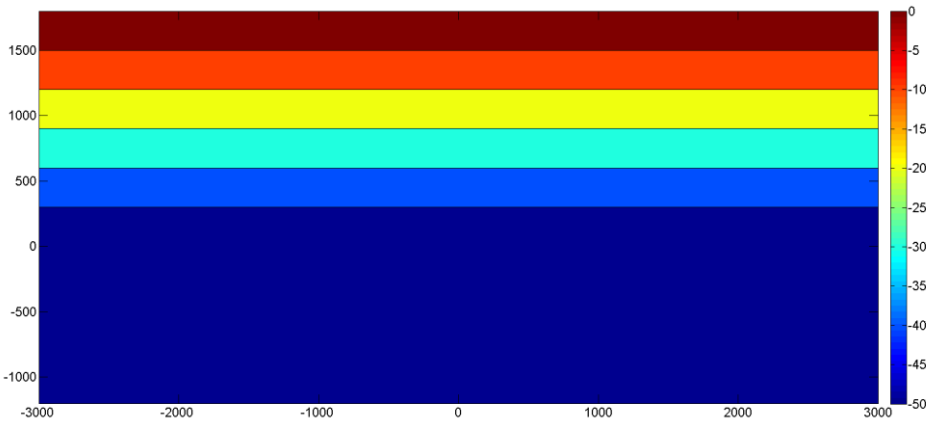


Figura 41: Vista en planta de la batimetría recta y paralela.

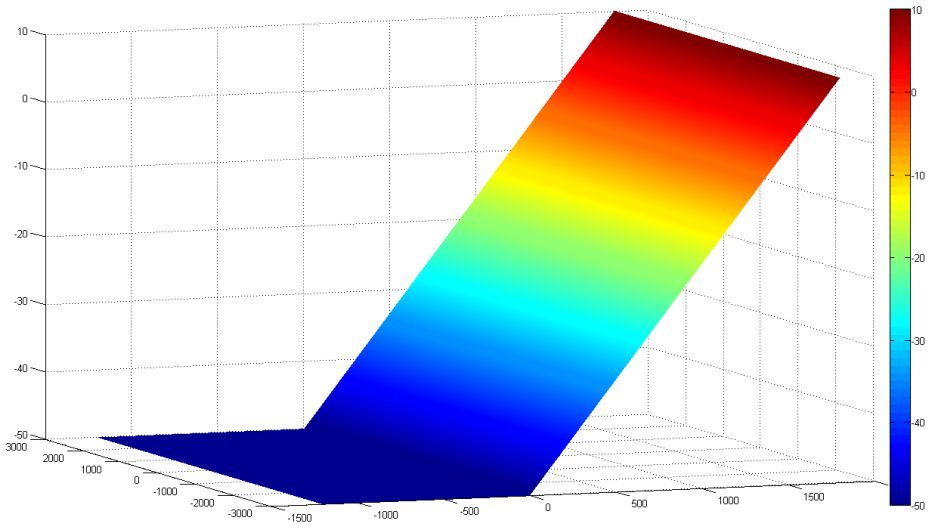


Figura 42: Vista 3D de la batimetría recta y paralela.

Como se indicaba en la introducción del ensayo, la batimetría tiene una pendiente 1:30 hasta una profundidad de 50 metros.

Las mallas tomadas para la ejecución del SWAN y del SHORECIRC quedan reflejadas en la siguiente figura

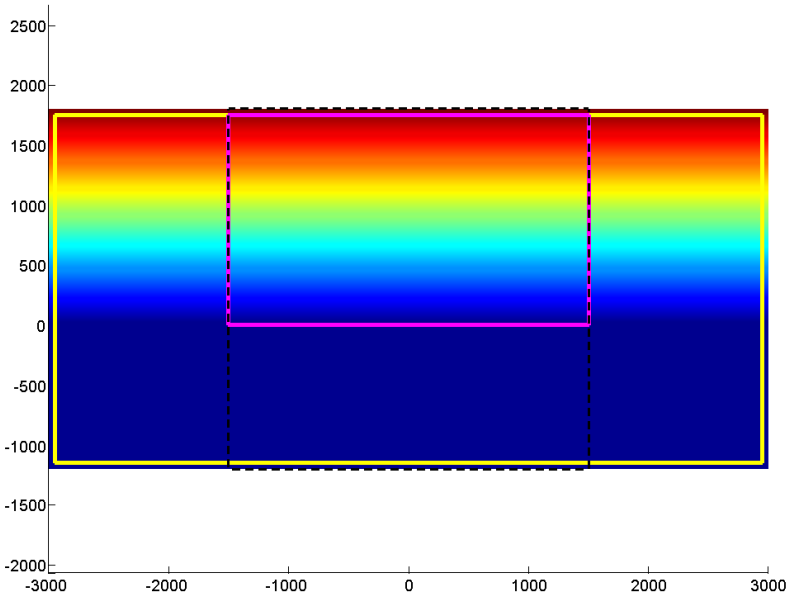


Figura 43: Esquema de definición de mallas.

El recuadro amarillo de la figura 43 corresponde con la malla general, se ha usado una resolución de 100x100 metros, el rosa a la malla detalle, la usada por el SHORECIRC para la obtención de corrientes, la resolución de 30 metros. Por último, con el recuadro en línea discontinua negra se representa lo que sería el tanque de oleaje en el que Hamm llevo a cabo los ensayos a la escala usada de 1:100. Como se puede ver la malla de detalle cubre la zona de interés, dentro de ella se encuentran todos los resultados obtenidos por los sensores de los ensayos.

La malla usada del SHORECIRC es irregular, siguiendo en el eje perpendicular a la línea de costa, una ley logarítmica calculada a través de un vector de 0 a 1 de n elementos que luego se normaliza en función de las coordenadas de la malla. Mediante el exponente b se puede controlar lo acusado de la variación en la resolución de dicho vector, es decir, cuanto mayor sea el exponente, más acusado es el cambio de resolución desde las máximas profundidades hasta la costa.

$$y = \log(0{,}1, n)\text{^}b$$

Se han tomado unos valores de n=40 y b=1, ya que tras algunos ensayos preliminares se comprobó que era la que mejor se ajustaba.

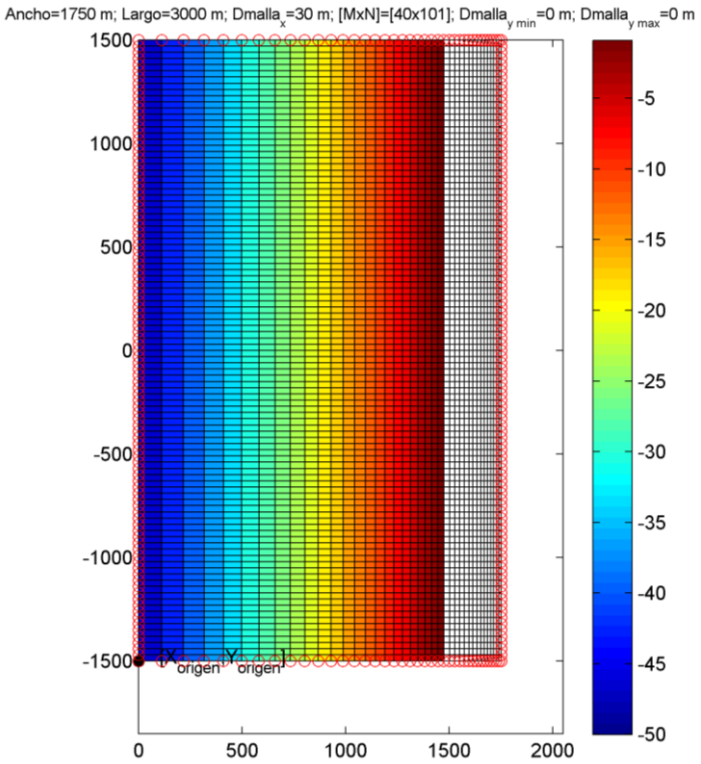


Figura 44: representación de la malla SHORECIRC para la batimetría recta y paralela.

El forzamiento se ha introducido por 7 puntos, 5 de ellos que corresponderían con la generación de las palas del ensayo, equiespaciados 1500 metros y los otros 2, uno en cada contorno lateral para garantizar la adecuada entrada del oleaje por los costados de la malla. En todos los puntos se introducen las mismas condiciones de oleajes, expuestas anteriormente.

Una vez ejecutado el módulo acoplado (SWAN + SHORECIRC), del SOPROA, se obtienen los mapas de altura de ola y corrientes en la malla de detalle para poder tener una

primera idea del comportamiento de estas variables. A continuación, se muestra un caso de cada una de ellas.

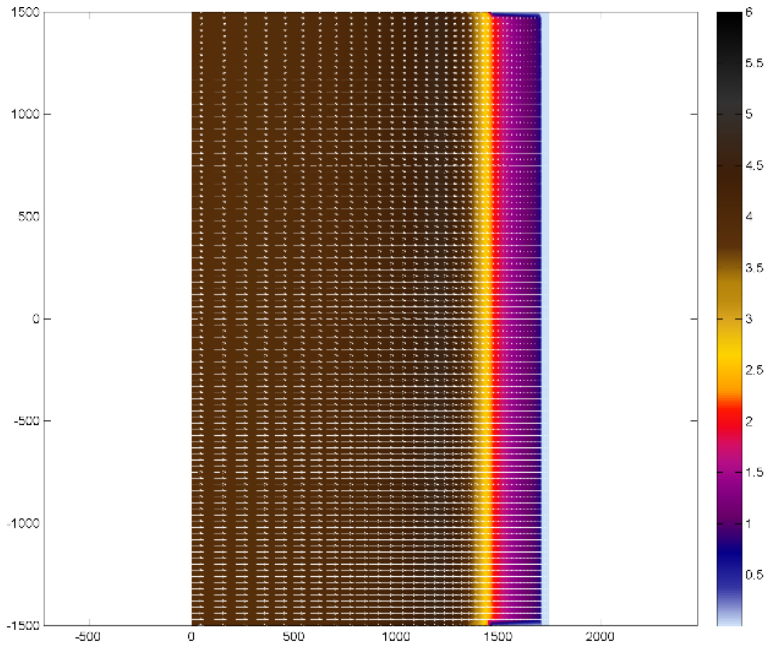


Figura 45: Mapa de altura de ola obtenido para un estado de mar..

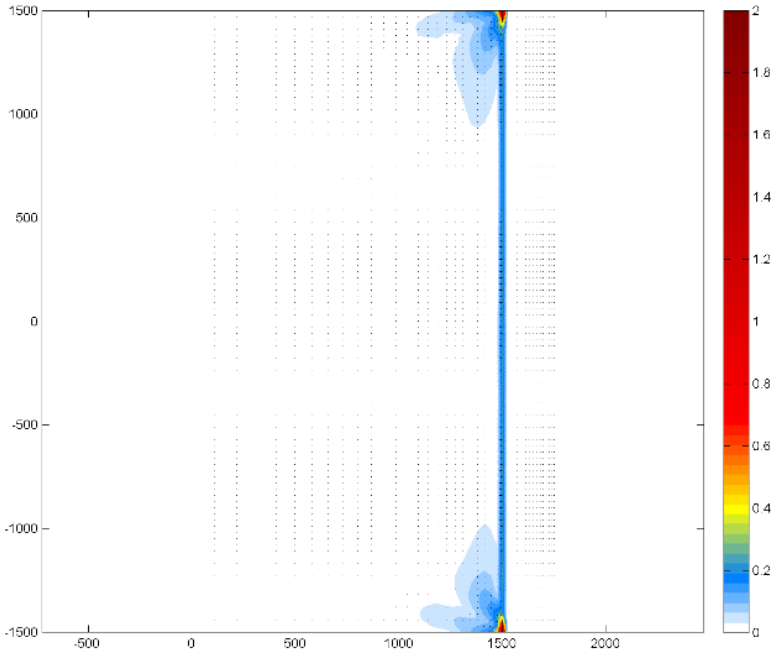


Figura 46: Mapa de corrientes obtenido para un estado de mar.

Tras ver los mapas, se puede obtener como primera conclusión, que el modelo propaga adecuadamente el oleaje y las corrientes parece que guardan un buen sentido físico, ya que al ser la batimetría recta y paralela y el oleaje incidente perpendicular a la línea de costa, la rotura es ortogonal a la costa, y por lo tanto las corrientes a lo largo de ella deben ser constantes y prácticamente nulas.

Se puede apreciar que en las esquinas de la malla se ve afectada la corriente, este es debido a la introducción de los espectros en el acoplamiento entre ambos modelos y lo que es para cada uno de ellos el límite exacto de lo que es agua y tierra, produciendo un gradiente de energía. Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de diseñar el dominio y localización de la malla de detalle, debiendo situar siempre lo más centrada posible la zona de interés o de estudio, que es la zona donde la malla está estabilizada y no se ve afectada por estas posibles inestabilidades.

Posteriormente, para poder validar se lleva a cabo la comparación de resultados obteniendo los valores a lo largo del perfil central y así compararlos con los que obtuvo Hamm. En este caso solo se podrá comparar la altura de ola, las corrientes únicamente de forma visual.

El resultado de altura de ola significante se puede ver en la figura 47

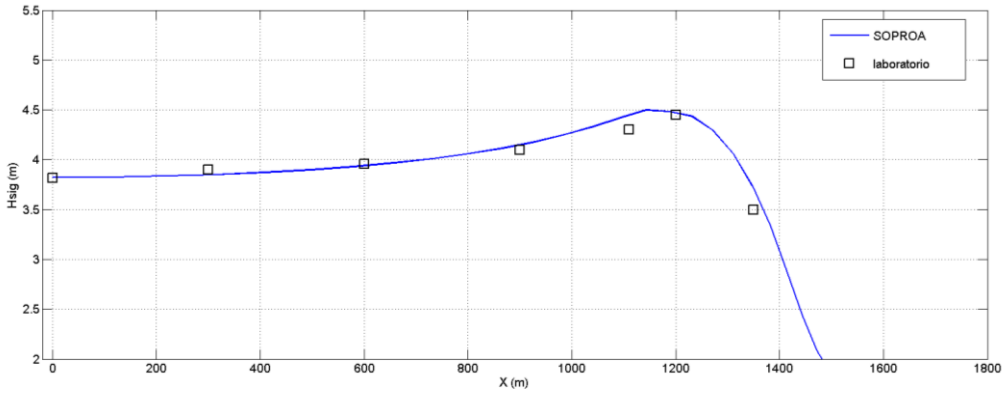


Figura 47: Comparación de resultados entre los obtenido por Hamm (cuadrados negros) y los del sistema SOPROA (línea azul).

En la figura 47 se representan los resultados de altura de ola significante obtenidos por el sistema SOPROA (línea azul) y los valores obtenidos en el ensayo de Hamm (cuadrados negros). Se puede ver que el ajuste es bueno, el sistema simula perfectamente la altura de ola para este caso. Hay que tener en cuenta que no hay apenas interacción ola-corriente ya que por ser la batimetría recta y paralela la generación de corrientes es prácticamente nula.

En la figura 48, se ven las corrientes generadas en el perfil central, puede apreciarse que su valor es mínimo y que son justo en la zona de rotura. No obstante, es posible que esta corriente sea irreal y producida por el efecto del gradiente lateral de oleaje generado desde los contornos, y que solamente afecta a una línea de la malla.

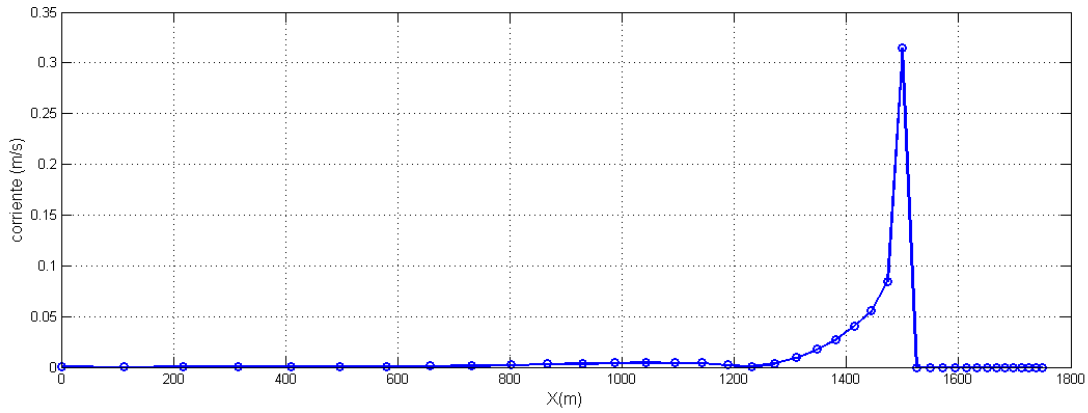


Figura 48:Módulo de la corriente a lo largo del perfil central.

4.1.2. Rip channel

Para este ensayo Hamm usa la misma batimetría que en el anterior, pero excavando en la zona central un canal para provocar un rip current. Para generar dicha batimetría se ha usado la fórmula de Noda (1974) que se exponía en la introducción de esta sección (ver figura 49).

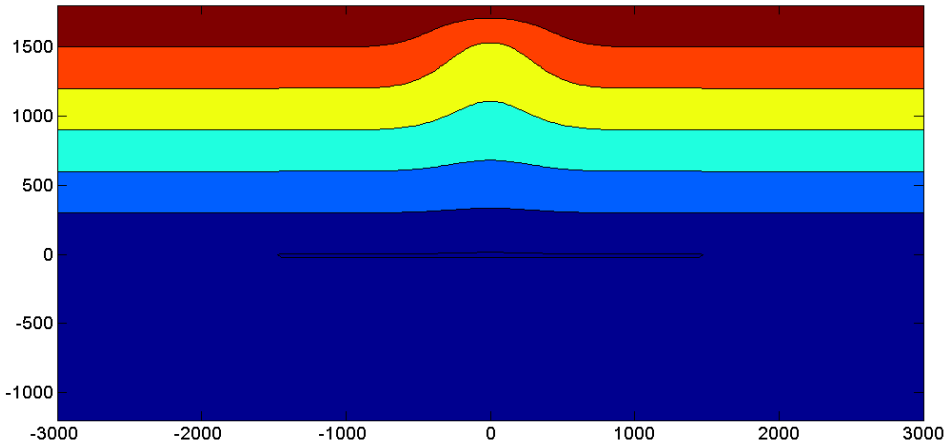


Figura 49: Vista en planta de la batimetría con rip channel.

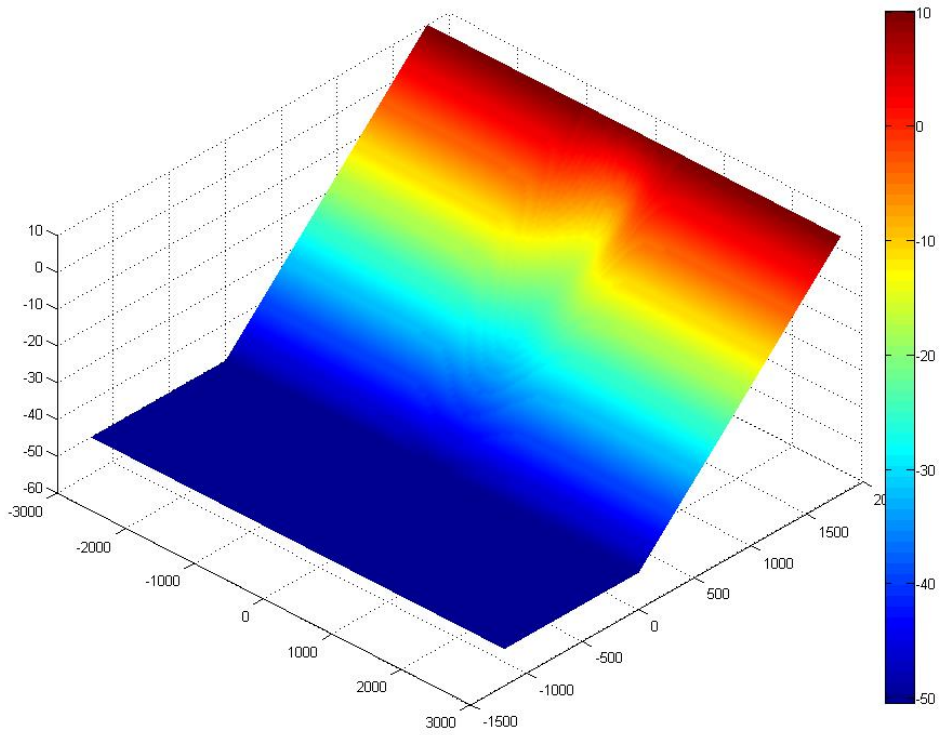


Figura 50: Vista 3D de la batimetría con rip channel.

Las condiciones de mallado para este caso son las mismas que para el anterior, quedando en este caso la malla de detalle que se muestra en la figura 51.

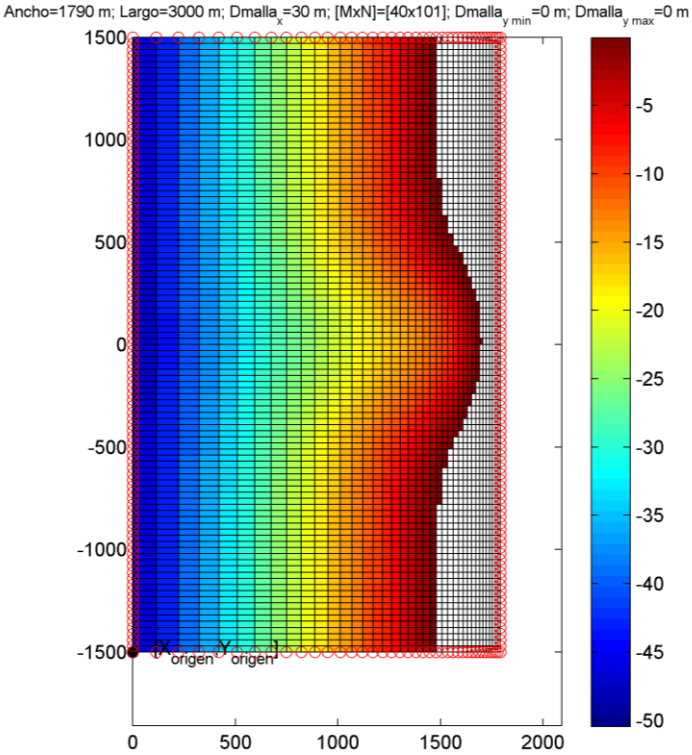


Figura 51: representación de la malla SHORECIRC para la batimetría con rip channel).

Las condiciones del forzamiento de oleaje también son las mismas que para el caso de batimetría recta y paralela, que eran:

- Hs = 4 m.
- Tp = 19.76 s
- Gamma = 3.3
- n = 6, lo que equivale a una sigma = 21.2º.

A continuación, se muestra el mapa de altura de ola obtenido para este ensayo:

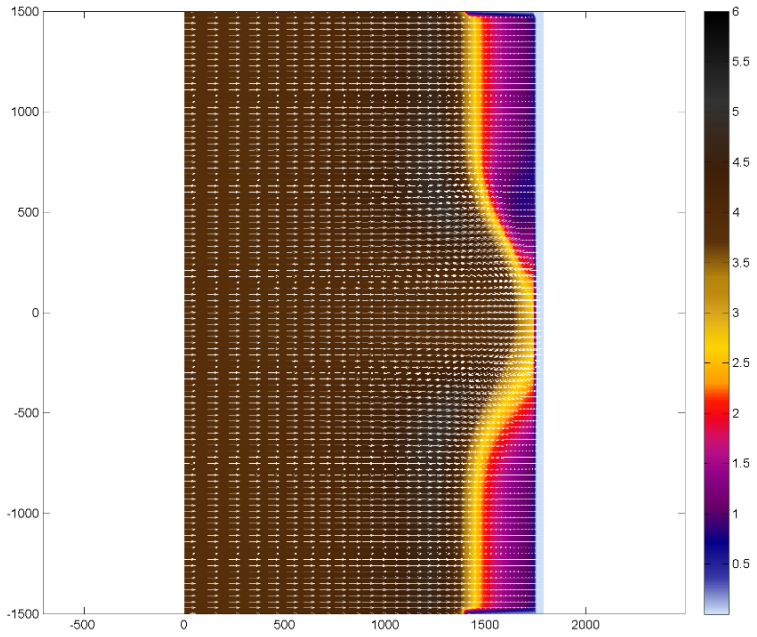


Figura 52: Mapa de altura de ola obtenido.

En el mapa de altura de ola, vemos que en la zona central la altura de ola es menor que en los extremos, esto es debido al efecto del rip channel. Al tener una mayor profundidad, el oleaje se asomera menos, pero por otro lado al ir la corriente en sentido contrario puede provocar el peralte de la ola. Por ello, y gracias a esta compensación producida por la interacción oleaje-corriente, aunque sea mayor en los extremos la diferencia no es demasiada.

En la figura 53, se muestran dos cortes transversales para poder ver este detalle mejor, uno del perfil central y otro fuera del rip channel.

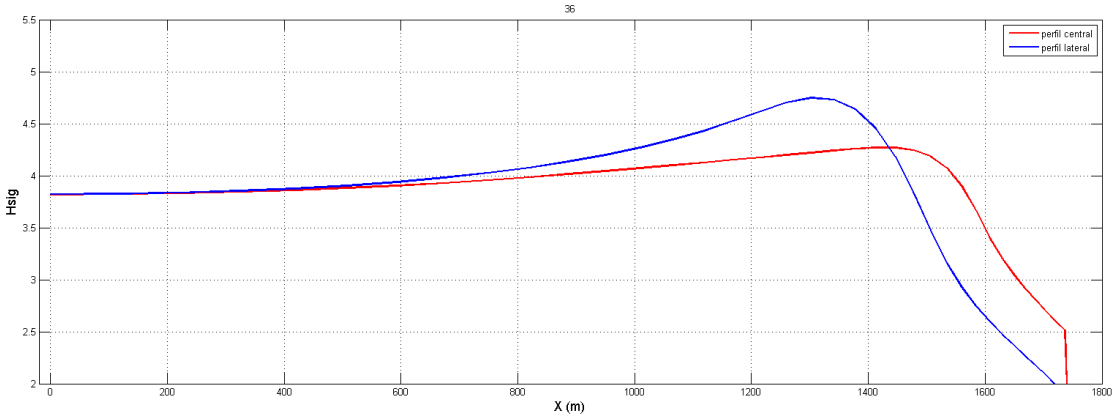


Figura 53: Diferencia de altura de ola en el perfil central y en uno lateral.

En cuanto a las corrientes, en la figura 54 se muestra el mapa de resultados, que como se indicaba anteriormente en este caso nos servirá para ver si el comportamiento dinámico 2DH de las mismas es cualitativamente realista, ya que no hay datos de laboratorio en este ámbito espacial con los que compararlas. El valor que se muestra con la gama de colores es el módulo de las corrientes en metros por segundo (m/s). En la figura 54 se aprecia que el modelo de corrientes logra generar lo esperado, una marcada corriente de retorno con valores alrededor a 1 m/s, que viaja y discurre a lo largo del rip cannel, mostrando simetría y coherencia con el comportamiento teórico esperado.

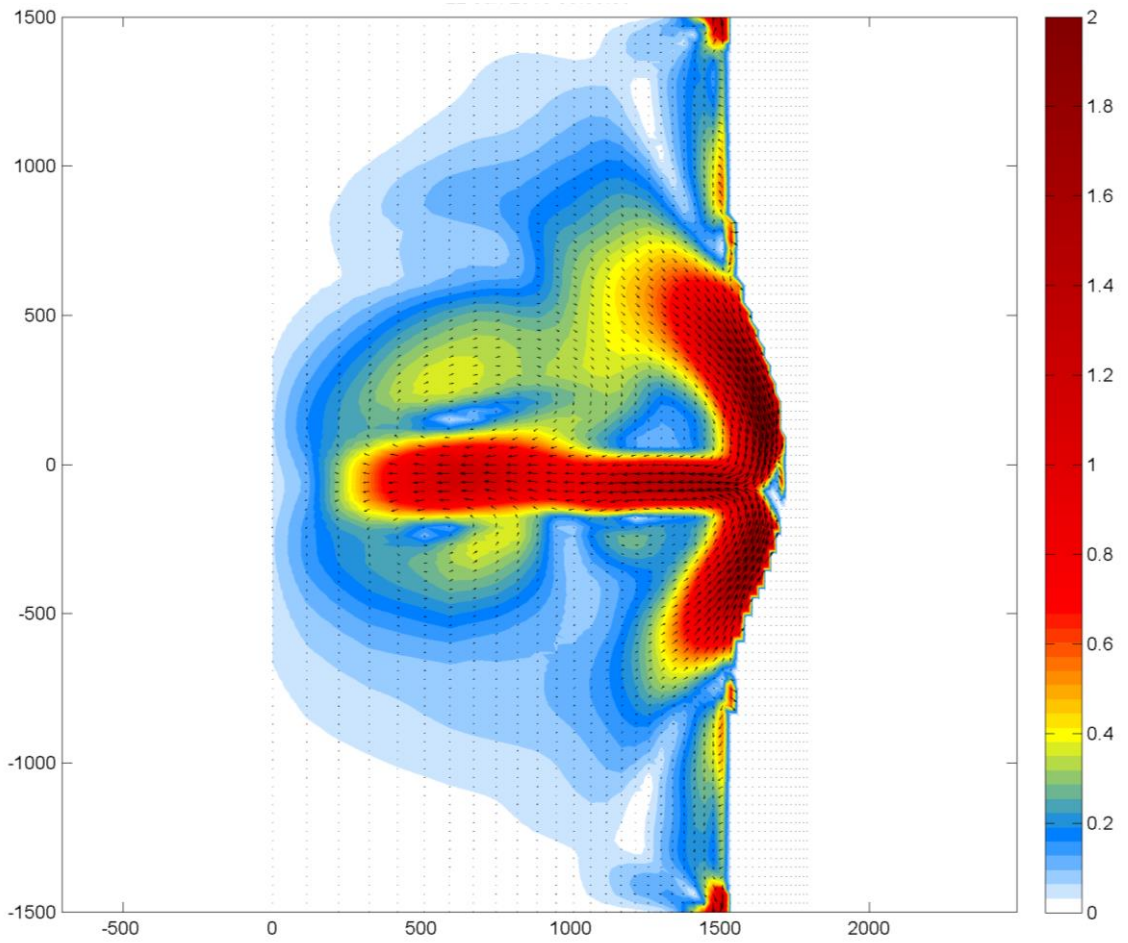


Figura 54: Corrientes provocadas por el rip channel central.

Por último, en la figura 55 se muestra la comparativa de resultados tras la ejecución de la altura de ola significante, así como el valor de la corriente en el perfil central (la publicación original no cuenta con datos medidos para este corte de corrientes).

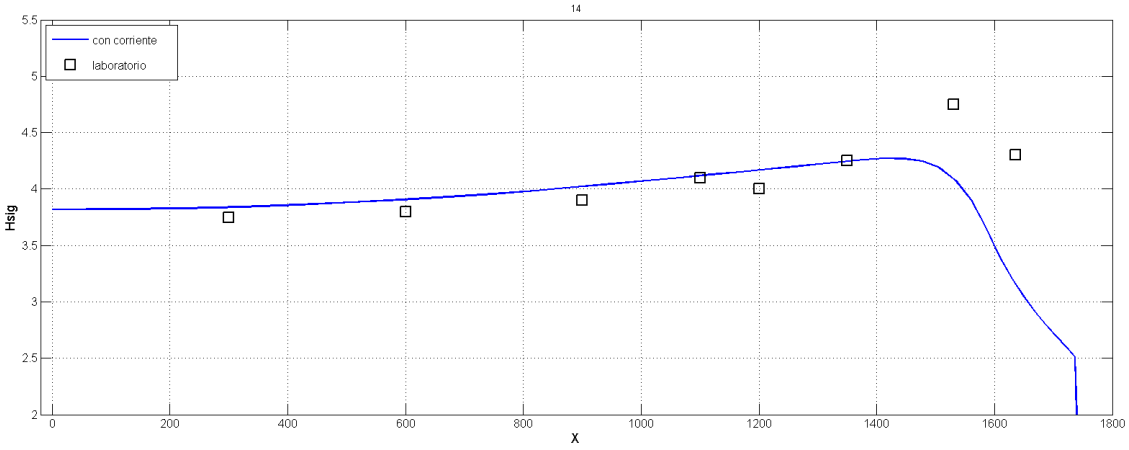


Figura 55: Comparación de altura de ola significante en el perfil central

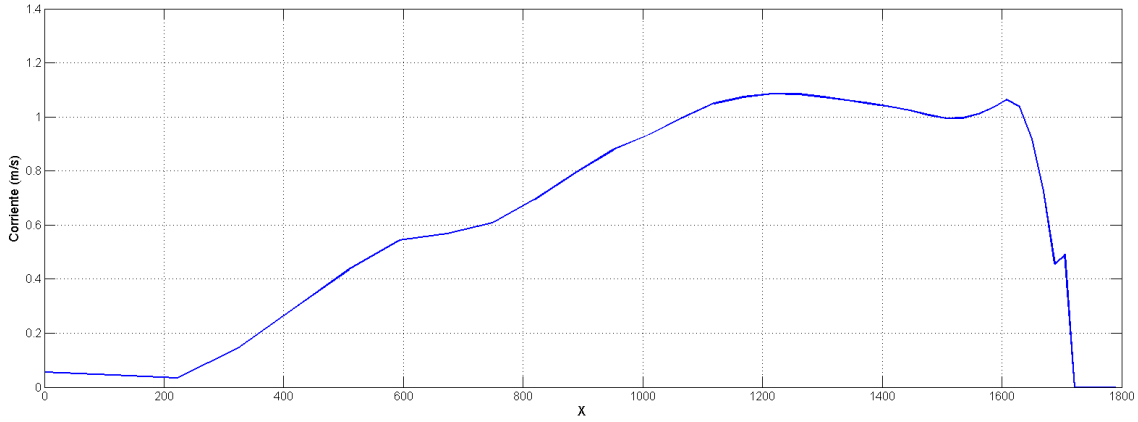


Figura 56: Valor de la corriente a lo largo del perfil central.

En la figura 55, se puede observar que el modelo numérico de oleaje se asemeja adecuadamente a las mediciones en laboratorio hasta la zona anterior a la rotura. El modelo parece no alcanzar el asomeramiento adecuado justo en la rompiente (alrededor a 1500 m). Este infra-valor calculado se pude deber a la acción simultánea (en menor o mayor medida) de estas situaciones: una errónea interacción del oleaje con las

corrientes; una infravaloración de las corrientes; y/o a una temprana activación de la rotura numérica por parte del modelo. Sin embargo, y en este caso particular, es posible que el efecto del oleaje reflejado desde las paredes del tanque de oleaje (modelo físico) fomente una sobre-elevación de este en la zona central (punto de confluencia del frente incidente y los dos reflejados desde cada pared lateral), mientras que el modelo numérico considera estos contornos como abiertos al infinito.

Tras la revisión de estos resultados, se puede concluir que el modelo logra asemejar adecuadamente la realidad física de la compleja interacción del oleaje con las corrientes. No obstante, se intuye necesario ahondar en un mejor ajuste de los parámetros del modelo, en especial, del modelo de rotura de la herramienta SWAN (tarea recogida como futura línea de desarrollo). Sin embargo, esta versión del sistema SOPROA se cree suficientemente robusta como primera herramienta de apoyo al grupo naval, para tener un mejor conocimiento de su comportamiento, mejorando sustancialmente los métodos con los que hasta ahora contaban.

4.2. DELILAH

Para realizar una validación con ensayos de campo, se ha escogido el caso DELILAH, Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Cross-shore Hydrodynamics, este clásico ensayo fue llevado a cabo por la FRF (Field Research Facility), y el CERC (Coastal Engineering Research Center) durante los días 1 al 21 de octubre de 1990 en la playa de Duck, Carolina del Norte, EEUU. Se realizaron medidas hidrodinámicas continuas de oleaje, corrientes, batimetrías, meteorología y, además, se utilizaron imágenes de vídeo para medir set up y ondas largas en la línea de orilla. Estos ensayos representan uno de los conjuntos de datos de campo más completos para validar modelos, incluyendo eventos de erosión, sedimentación, formación y migración de

barras. También es de utilidad para modelos hidrodinámicos, ya que dispone de medidas de la distribución transversal de la corriente longitudinal.

La figura 57 muestra la localización de la playa. Se observa que existe en toda la costa una barrera natural de arena, estando en la parte norte de ella la playa de Duck.

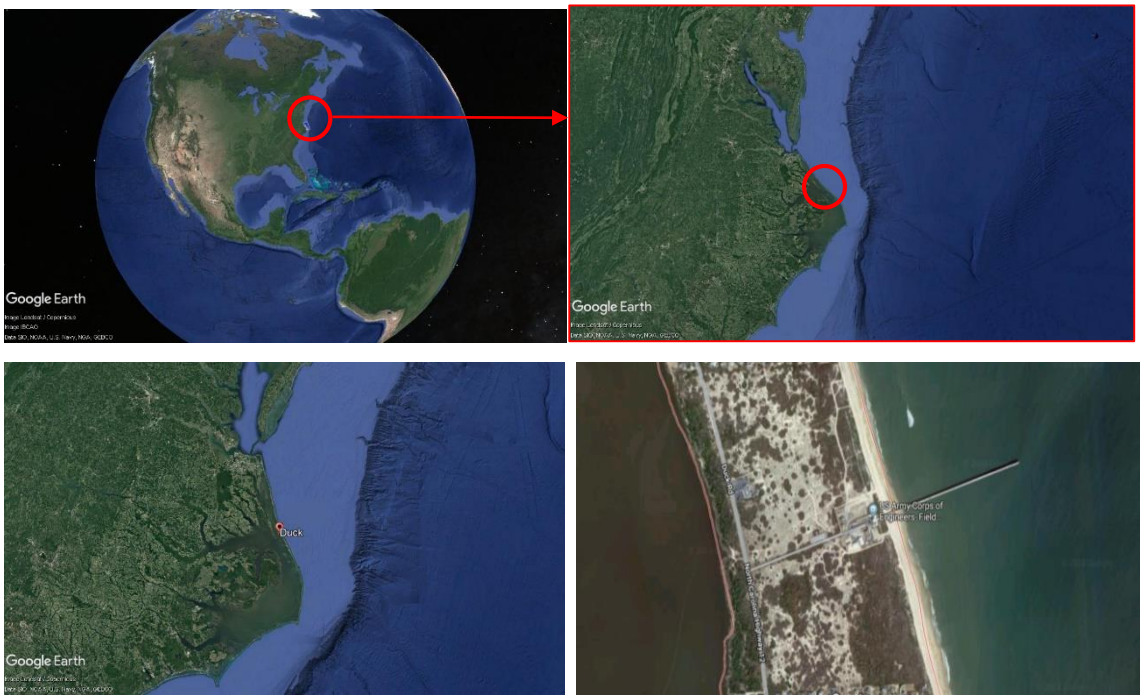


Figura 57: Localización playa de Duck, California del Norte, EEUU

Para conocer las condiciones generales que se dan en la zona, se muestra en las figuras 58 y 59, publicadas por el FRF, la altura de ola media, que va desde 1 metro en los meses de invierno a los 0.5 en los de verano y la dirección del oleaje, que cubre un abanico desde el norte hasta el este, siendo la más frecuente los 40º, cuadrante noreste.

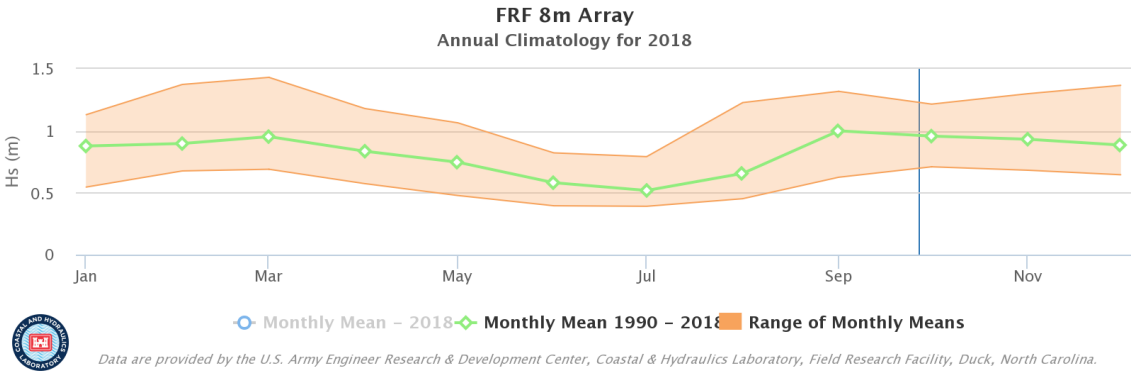


Figura 58: Imagen aportada por el FRF de la media de altura de ola anual.

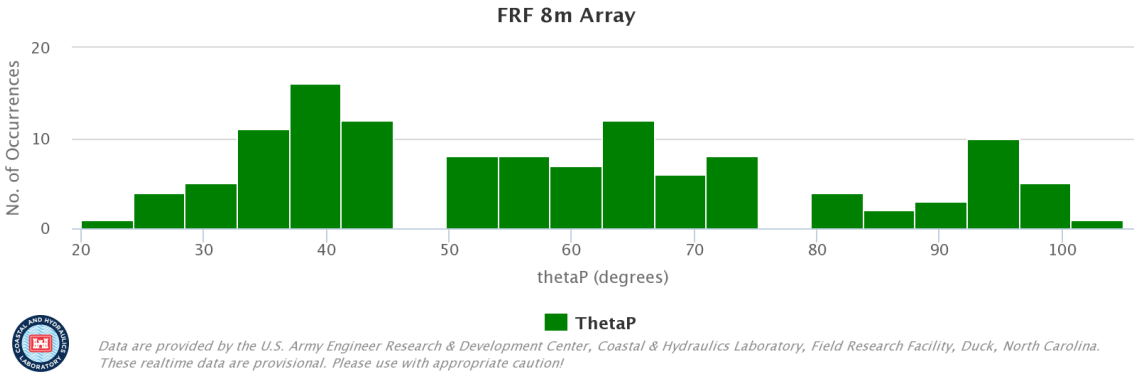


Figura 59: Imagen aportada por el FRF de la ocurrencia del ángulo de incidencia.

En el caso de validación que nos ocupa, el DELILAH resulta un ensayo interesante y completo ya que aporta información de altura de ola y corrientes. Lo más delicado es la batimetría que cambia día a día por lo que ha sido necesario usar distintos ficheros que se adapten a la situación batimétrica existente en el día del que se han simulado los datos. Aun así, más adelante se podrá apreciar la gran importancia de esta, ya que los resultados son mejores cuando comparamos resultados de horas más tempranas ya que la batimetría se aproxima más a la real, variando luego rápidamente en campo, pero no en el modelo, ya que el módulo de sedimentos no está activando, siendo esta una futura línea de investigación.

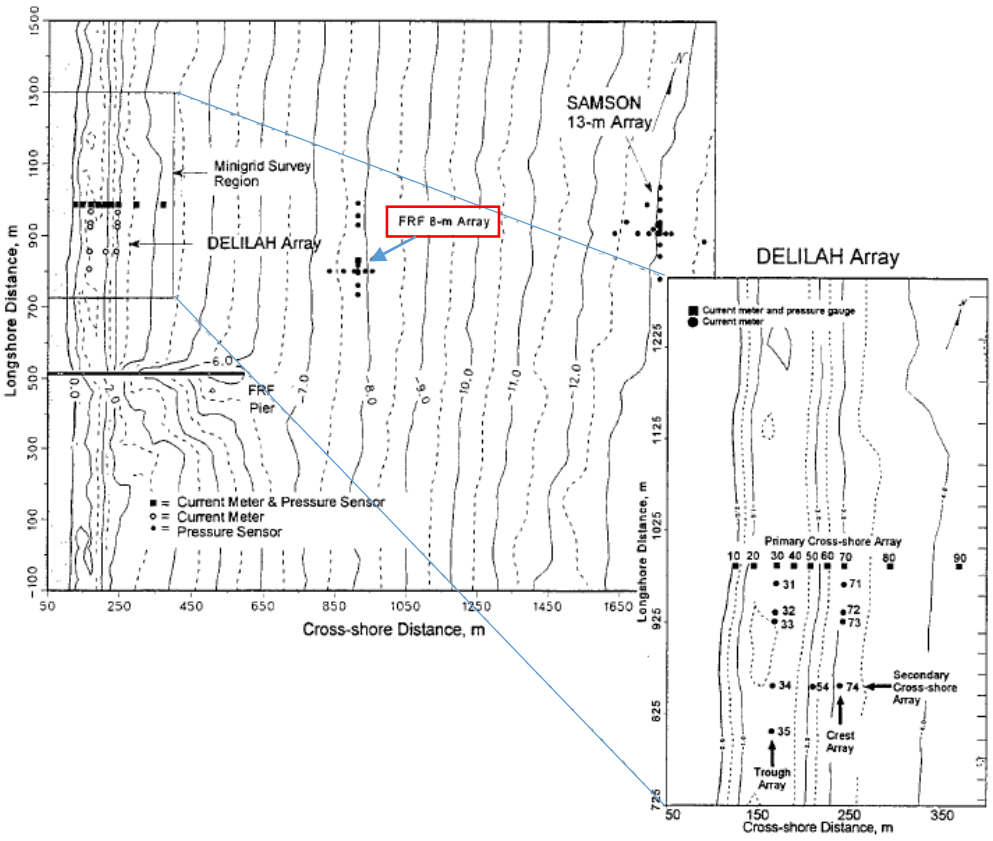


Figura 60: Localización de la instrumentación para el ensayo DELILAH.

Para el forzamiento es necesario conocer los valores de altura de ola, periodo, dirección de la ola, marea, viento y dirección del viento. Todos ellos se aportan en la página web del FRF y cada uno de ellos se obtiene de distintos sensores.

Los datos de altura de ola y periodo se han obtenido de los registrados por el grupo de sensores "*8 m Array*" (señalados en la figura 54 mediante un recuadro rojo), situados aproximadamente a un kilómetro de la orilla, a la altura de la cota -8m y que llevan registrando datos desde 1987.

En cuanto a los del viento son los registrados por un anemómetro situado al final del muelle a una altura de 19.4 metros y que está en funcionamiento desde 1988.

Por último, los datos de marea son los aportados por el *NOAA Tide Gauge*, estación que tienen allí situada en el FRF y que lleva dando servicio desde 1981.

El conjunto de datos a lo largo del mes de octubre de 1990 es el siguiente:

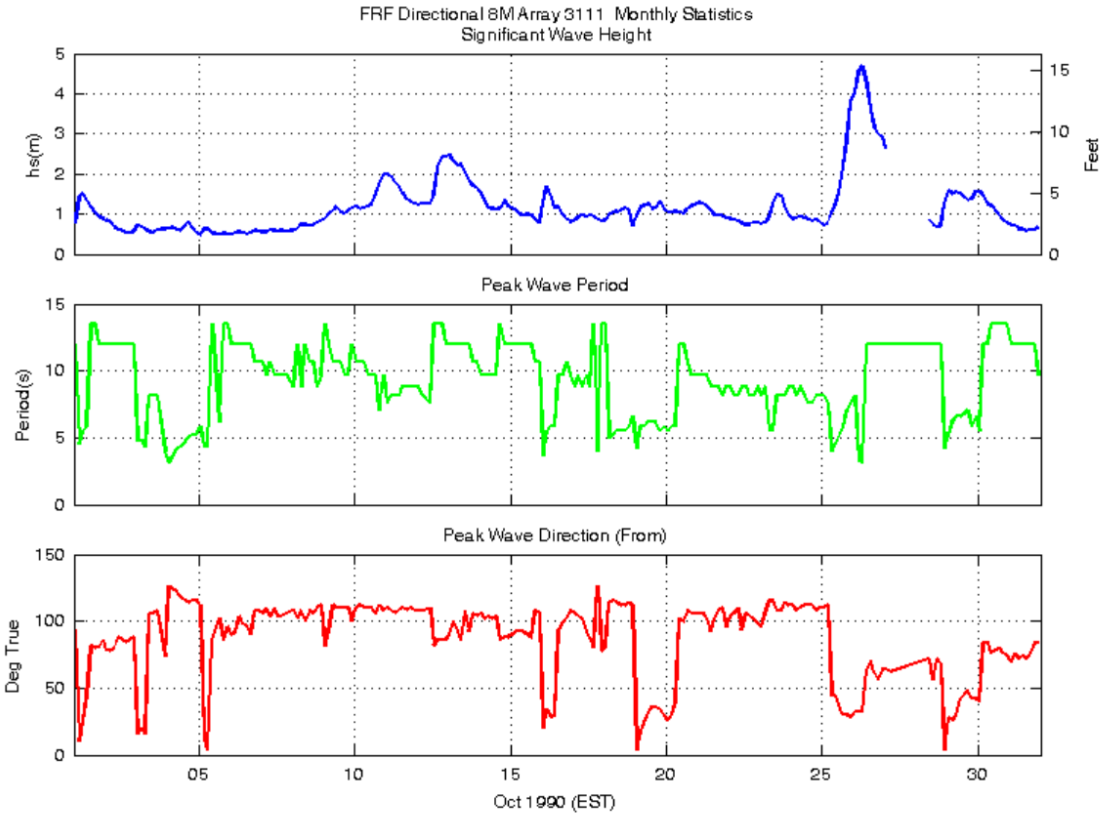


Figura 61: Serie temporal de datos aportados por el FRF.

La serie tiene zonas no homogéneas en las que faltan datos en horas puntuales, por lo que se ha decidido usar los datos de los días 10 y 11 ya que durante ese periodo la serie tiene todos los datos y además se tienen resultados de altura de ola y corriente en los sensores de la costa en esos días.

La serie de los datos horaria, comprendida entre esos dos días y usada para realizar la validación es:

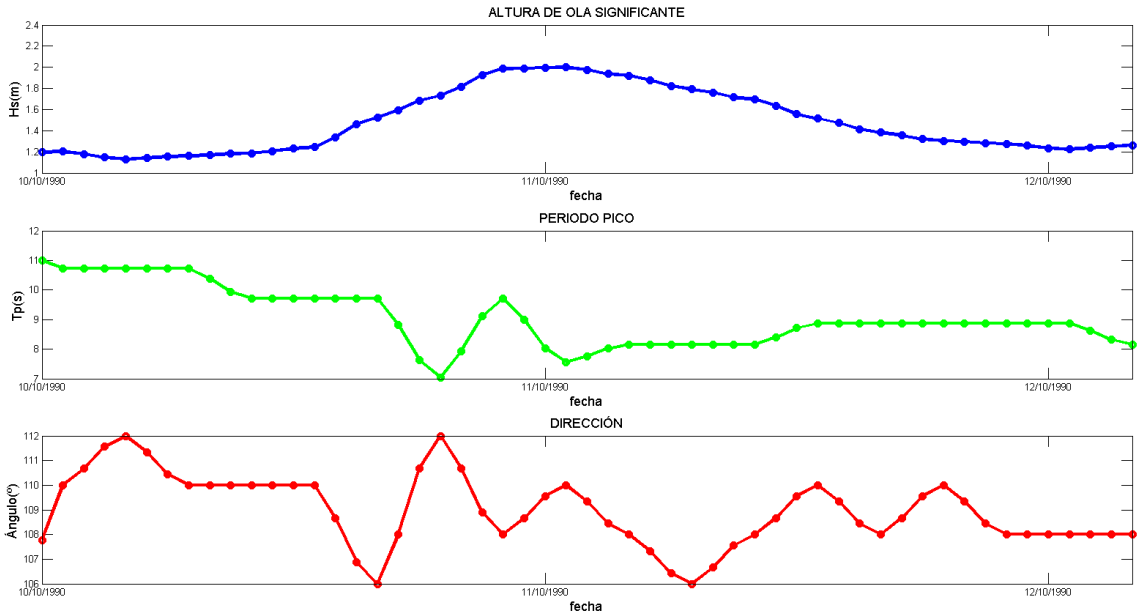


Figura 62: Serie temporal usada para la simulación.

Vemos que para octubre de 1990 la altura de ola es superior a la media histórica para este mismo mes que se veía en la figura 58, llegando hasta los 2 metros y que la dirección tampoco es la más frecuente, estando entre los 100 y 112º. El experimento que llevaron a cabo se hizo este mes concreto ya que se produjo un temporal, que al venir de esa dirección genera fuertes corrientes en la costa por la orientación que ésta tiene (que a continuación se detallará), además del movimiento de sedimentos que ello provoca.

Para la obtención de la batimetría ha sido necesaria su digitalización a partir de los planos que tiene publicados la FRF en el documento "*1990 DELILAH Nearshore Experiment: Summary Report*" realizado por el cuerpo de ingenieros de la Armada Americana.
En la figura 54 se mostraba la batimetría general, en ella se indican los sensores que están situados en campo y de los cuales obtendremos la información para comparar con los obtenidos por el modelo. Los sensores se encuentran en el detalle de la batimetría que se ve a la derecha (Primary cross-shore array). Esta imagen se ha utilizado para la digitalización de la zona general, modificando en cada caso ejecutado, la batimetría del recuadro de detalle, siendo las que se muestran a continuación,

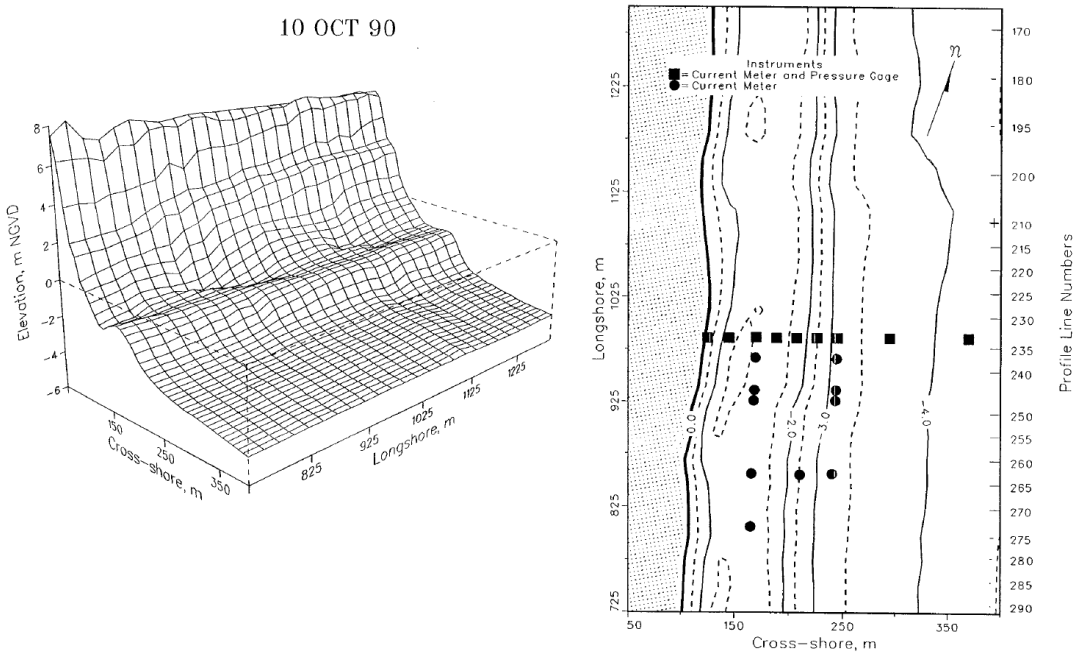


Figura 63: Batimetría día 10 de octubre de 1990.

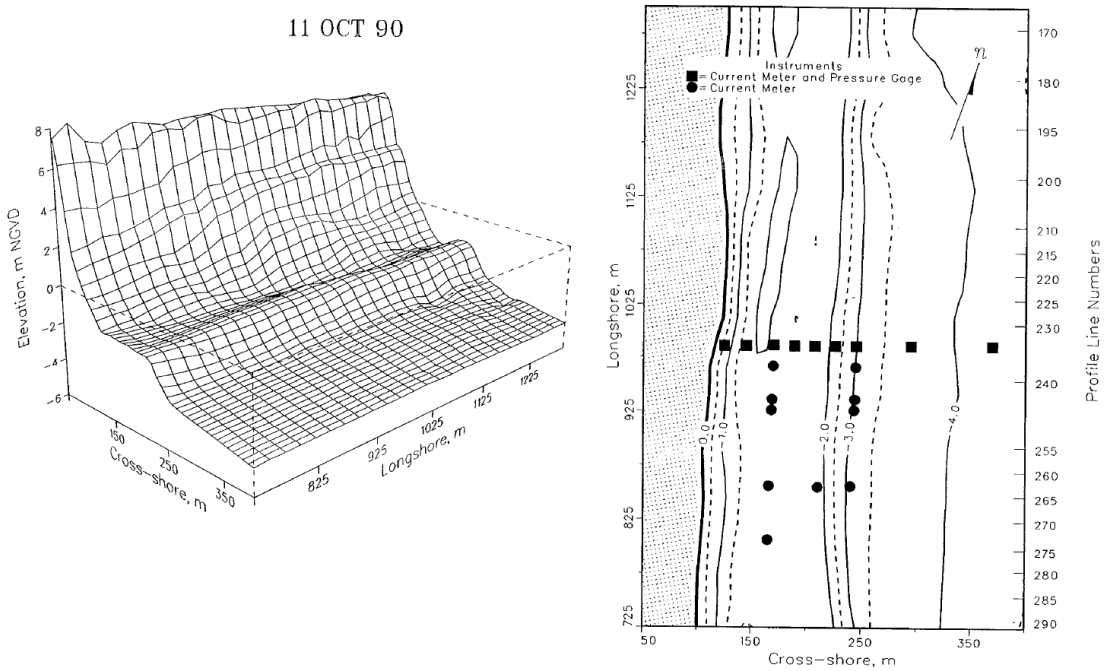


Figura 64: Batimetría del día 11 de octubre de 1990.

En estas dos imágenes se puede apreciar el acusado movimiento de sedimentos que se produce en esta costa. Las líneas batimétricas -1 y -2 se separan y aparece una barra que según pasan los días se vuelve más pronunciada y se mueve. Es especialmente relevante en la zona de los sensores de los que se obtiene la información por lo que tiene que estar muy bien representada. Posteriormente se mostrará la importancia de esto.

Las batimetrías generales introducidas en el modelo quedan de la siguiente forma (ver figura 65).

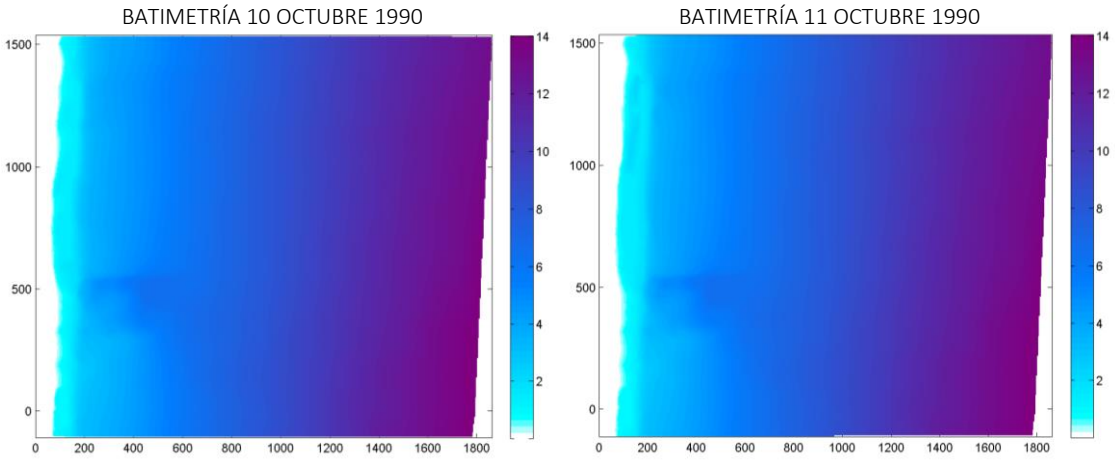


Figura 65:Batimetría de los días 10 y 11 ya digitalizada.

En la figura 65 se muestra la batimetría con la orientación que se ve en el reporte aportado por el FRF, pero es necesario referenciarla al norte para que tenga coherencia con la referencia del oleaje.

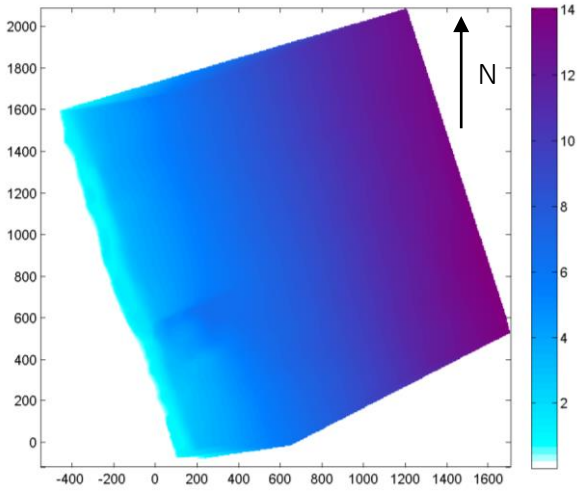


Figura 66: Batimetría orientada al norte.

Para el montaje del modelo se ha usado una malla general con resolución de 30 metros, haciendo que corte lo más cerca posible a la línea batimétrica -8 que es donde se encuentran los puntos de medición de datos, localización del "*8m array*". Se hará la hipótesis de que, al ser un dominio no muy extenso, se puede considerar que la situación de oleaje y viento del punto de medición, se da también en las zonas cercanas.

En cuanto la malla de detalle, se ha dimensionado con el mismo largo que la general ya que, aunque la zona de interés sea aproximadamente en los 1000 metros, entre los 300 y 500 metros hay un rip channel que puede afectar mucho a las corrientes y que es importante tener en cuenta, por lo que se ha introducido en la malla de detalle para no perder información. Al igual que en el caso de apartado anterior (caso benchmark de Luc Hamm), la malla de detalle sigue la misma ley logarítmica, es irregular en el eje perpendicular a la costa y regular en el paralelo a ella, teniendo en este caso una resolución de 15 metros.

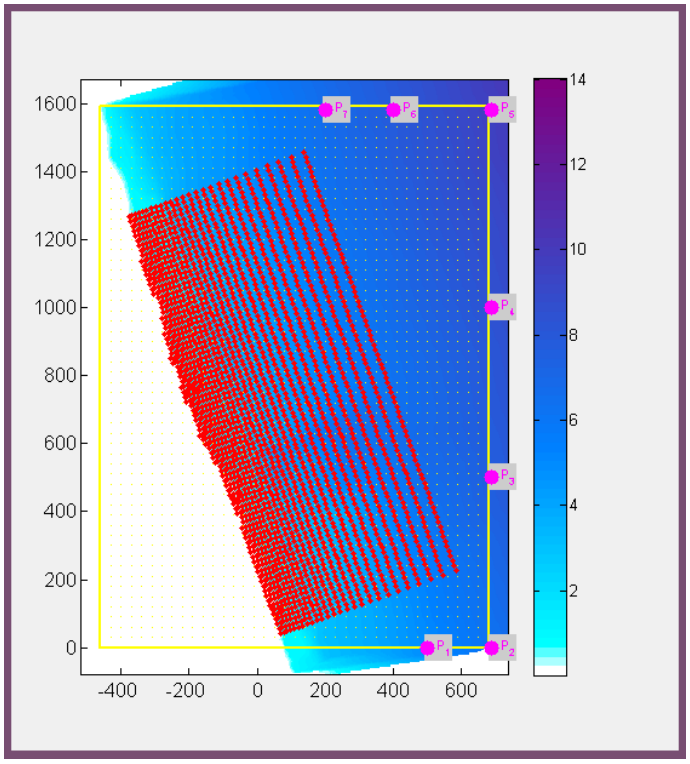


Figura 67: Montaje general del caso.

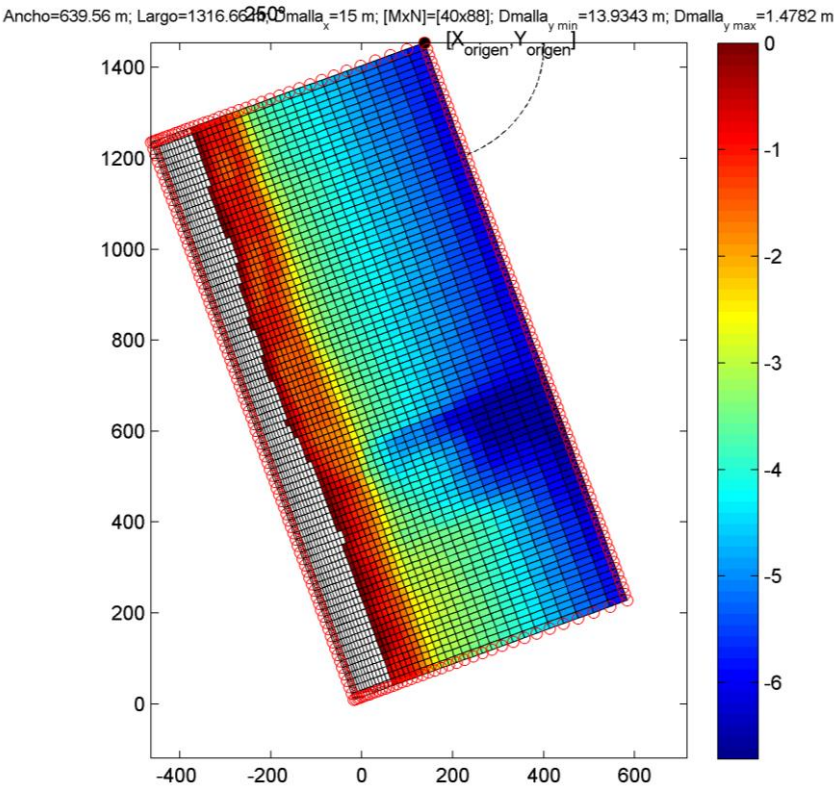


Figura 68: Malla de detalle del SHORECIRC, para el caso del día 10.

Tras ejecutar el caso para el día 10, se analizar los resultados obtenidos para las 16:00 y 22:00 horas y posteriormente se hará lo mismo para el día 11 a las 16:00.

A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los instantes, los mapas de altura de ola y corriente y los gráficos comparativos para posteriormente entrar en su discusión.

- DÍA 10 DE OCTUBRE DE 1990 A LAS 1600 EST

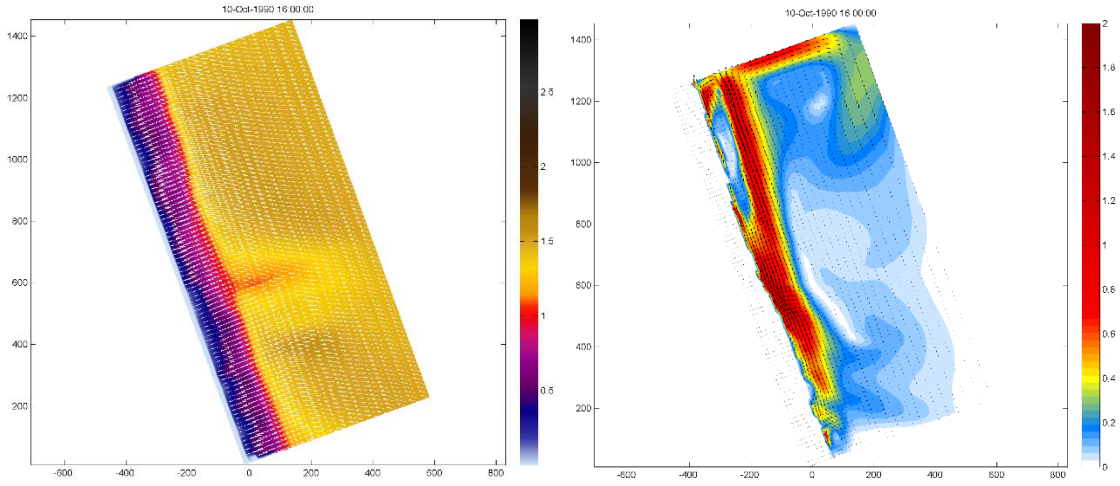
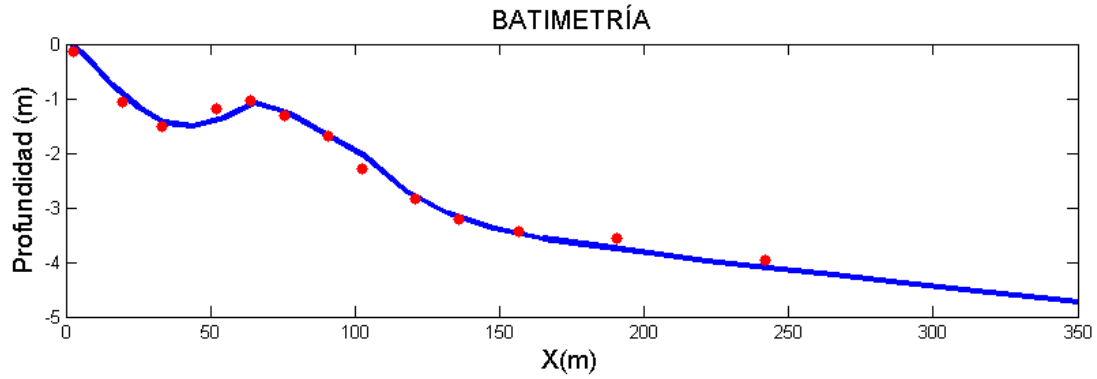
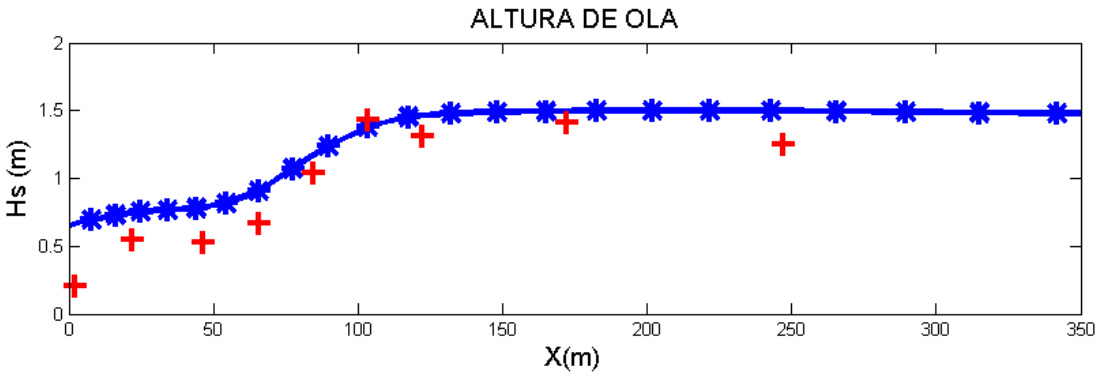


Figura 69: Mapas de altura de ola y corrientes para el día 10 a las 16:00





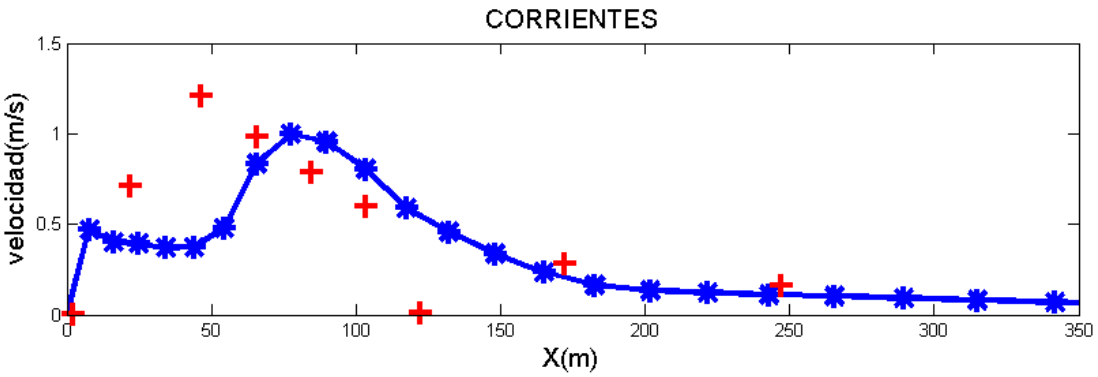


Figura 70: Comprobación de la batimetría y comparación de resultados de altura de ola y corrientes. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

De la figura 70 se puede comentar que, en general las predicciones del modelo son adecuadas tanto para Hs como para las corrientes de rotura. Se observa que las corrientes son infravaloradas en su punto máximo. Esto puede ser debido a que la batimetría no se corresponde correctamente con la real a pesar de que en ese perfil concreto sí. Para demostrar esto, se muestra una comparación de los perfiles batimétricos para este día aportados por el FRF y los de la batimetría usada. La localización de los perfiles está indicada mediante números y su referencia se puede ver en las figuras 56 y 57, en el eje derecho del detalle de la batimetría.

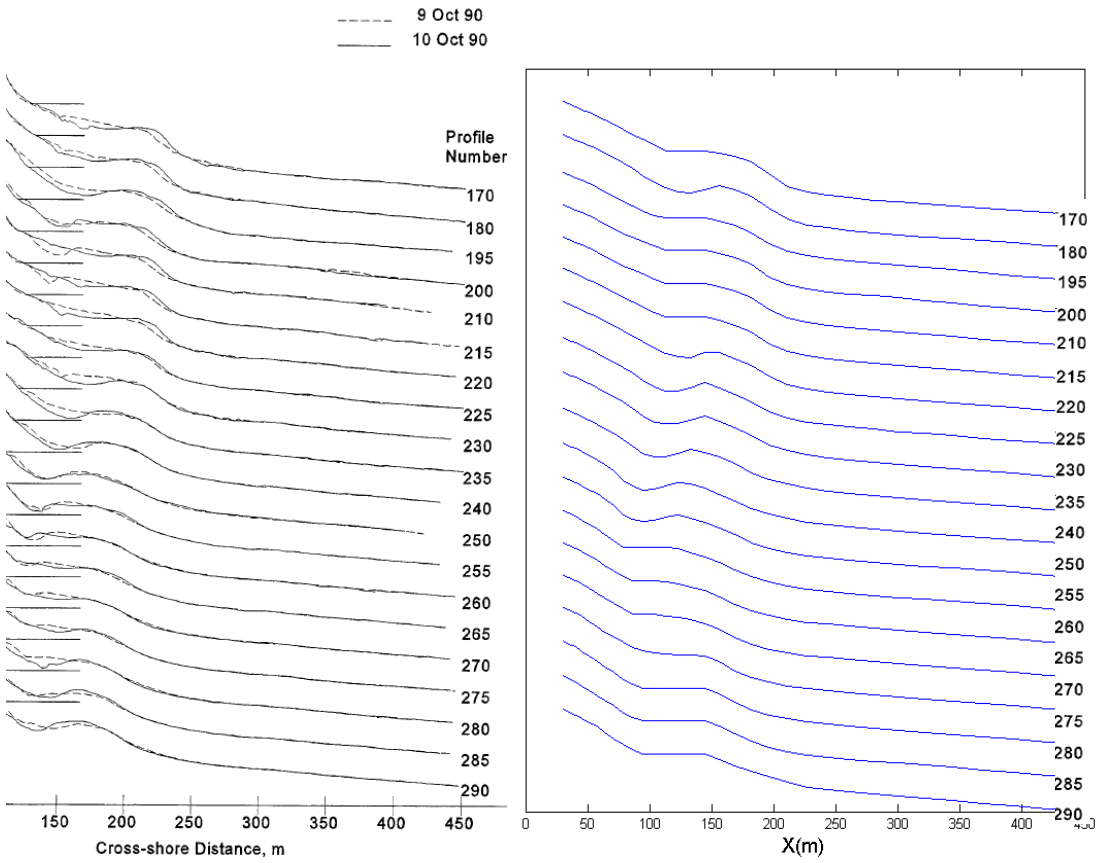


Figura 71: Comparación de distintos perfiles batimétricos.

En los perfiles se puede apreciar que los inferiores, que corresponden con la zona más al sur, no tienen la calidad adecuada ya que no representan la formación de la barra, esto puede provocar que la generación de corrientes que se mide en los sensores se vea afectada.

Aun así, se puede mostrar como el modelo es capaz de obtener picos de corriente como se ve en la figura 72 en la que en un perfil cercano al de la medición de la instrumentación, las corrientes se ajustan muy bien, no lo hace así la batimetría.

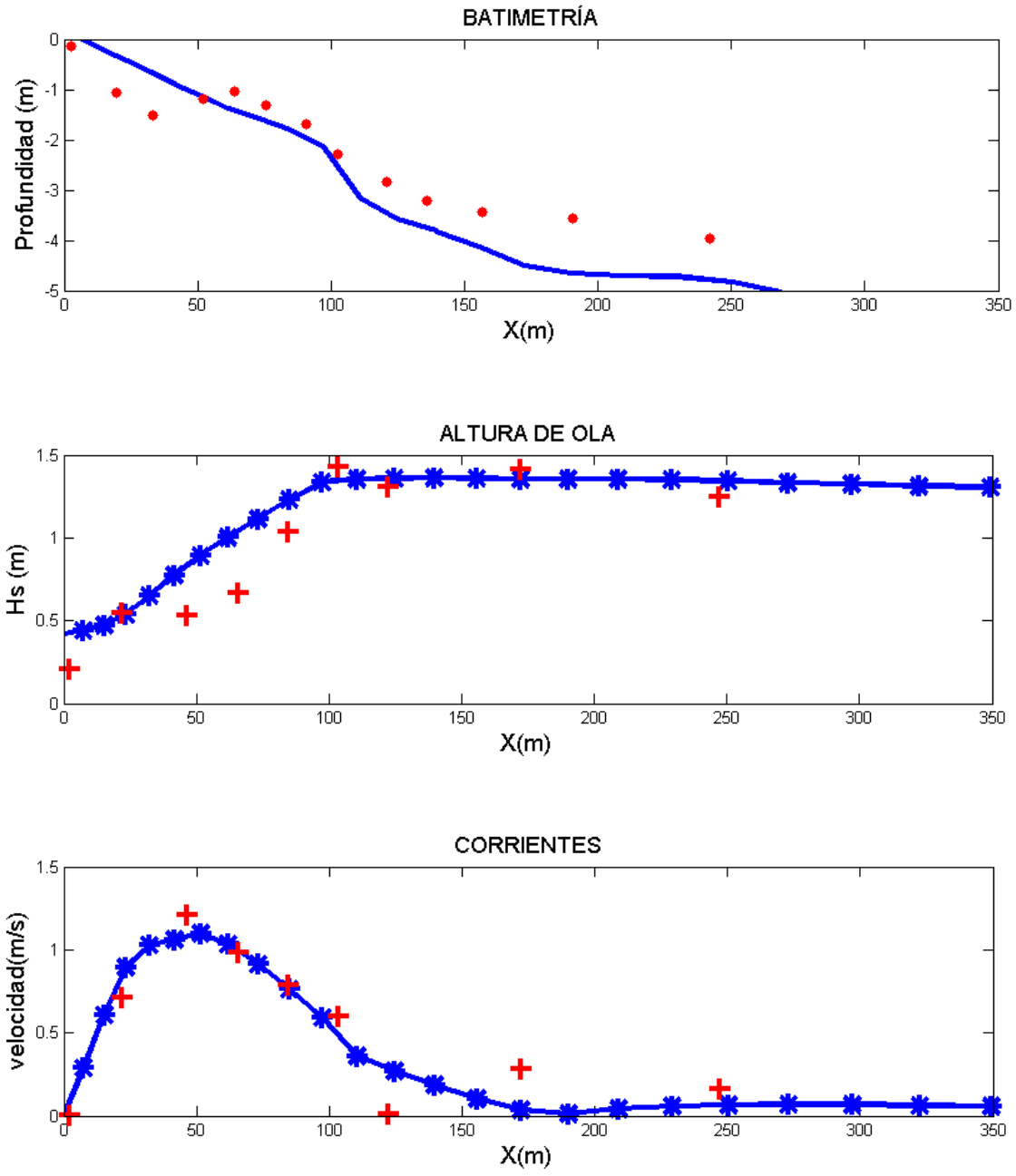


Figura 72: Valores de altura de ola y corriente en un perfil cercano. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

- DÍA 10 DE OCTUBRE DE 1990 A LAS 2200 EST
-

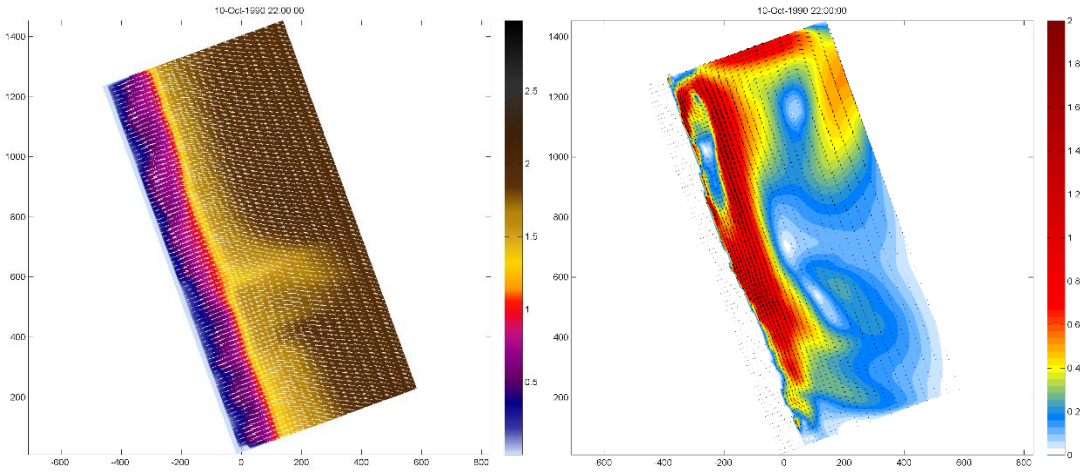
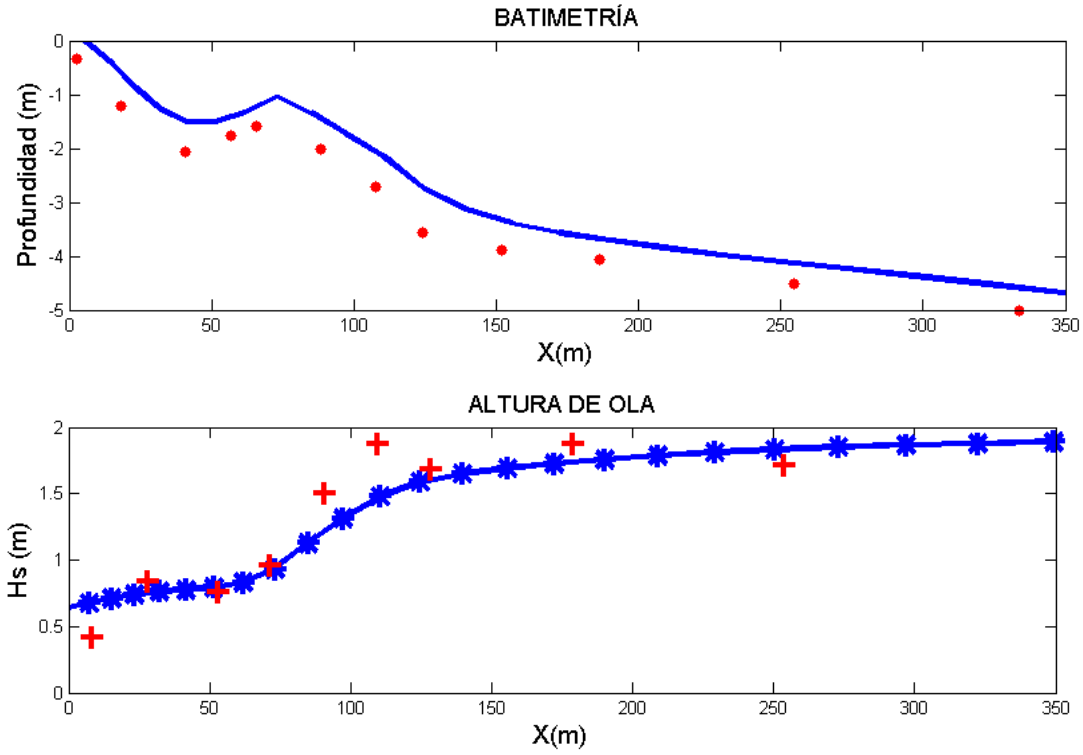


Figura 73: Mapas de altura de ola y corrientes para el día 10 a las 22:00



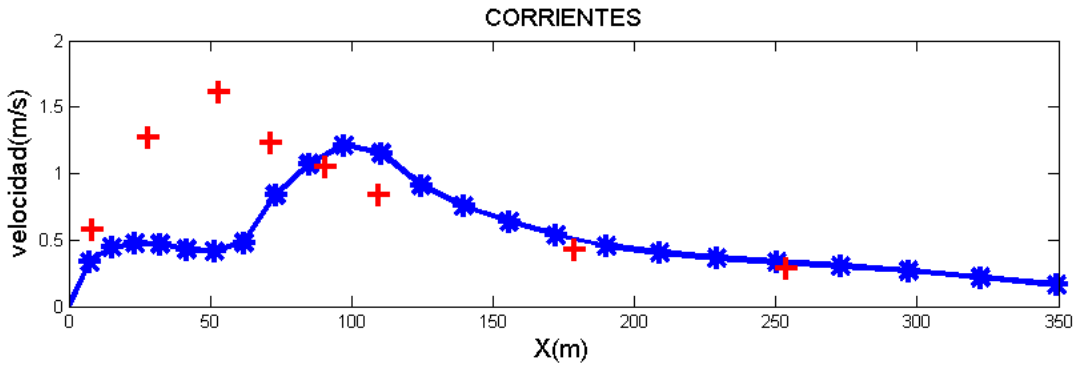
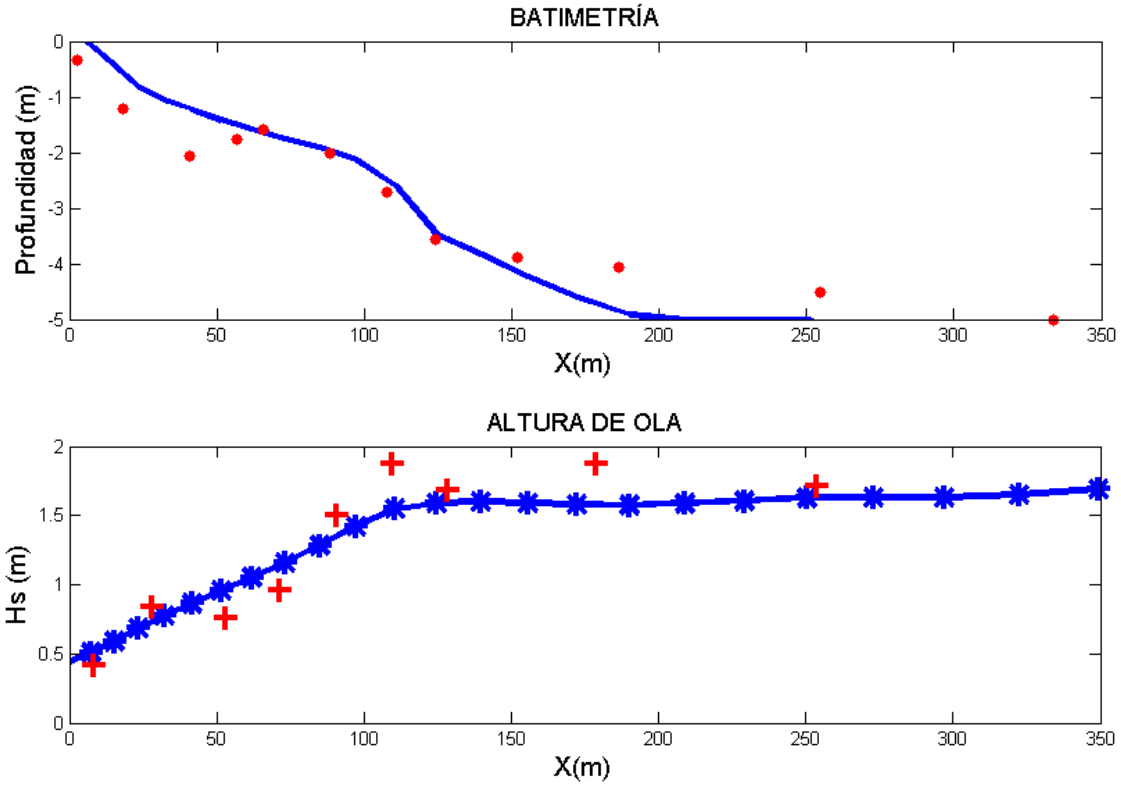


Figura 74: Comprobación de la batimetría y comparación de resultados de altura de ola y corrientes. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

En la figura 74 se muestran la misma ejecución que los anteriores, y los resultados aportados corresponden al mismo perfil, se puede ver como se ha visto modificada la batimetría por lo que los resultados según van pasando las horas pueden verse más afectados. Al igual que pasaba en el caso de las 16 horas la altura de ola se ajusta bastante bien, pero no lo hacen así las corrientes, aunque también existe un perfil cercano en el que si se ajustan.



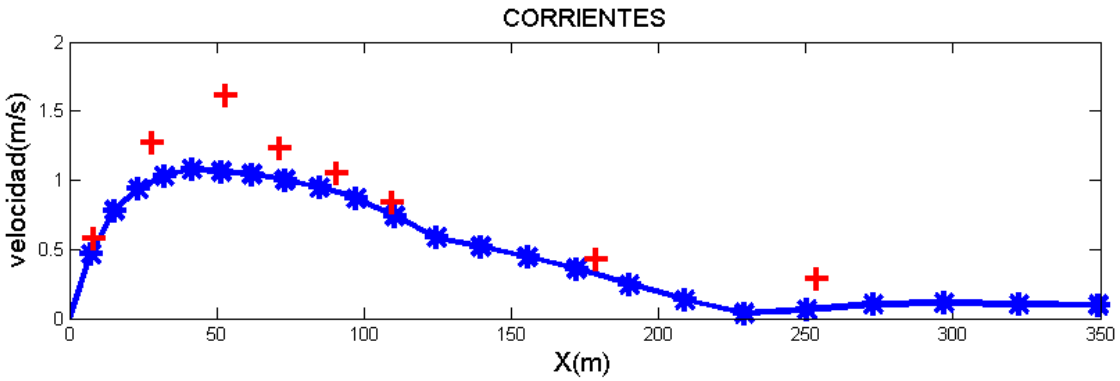


Figura 75:Altura de ola y corrientes en un perfil cercano. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

- DÍA 11 DE OCTUBRE DE 1990 A LAS 1600 EST

Para realizar esta ejecución se ha usado la batimetría del día 11, como ya se ha explicado anteriormente, obteniendo los siguientes resultados, que siguen en la línea de los del día 10.

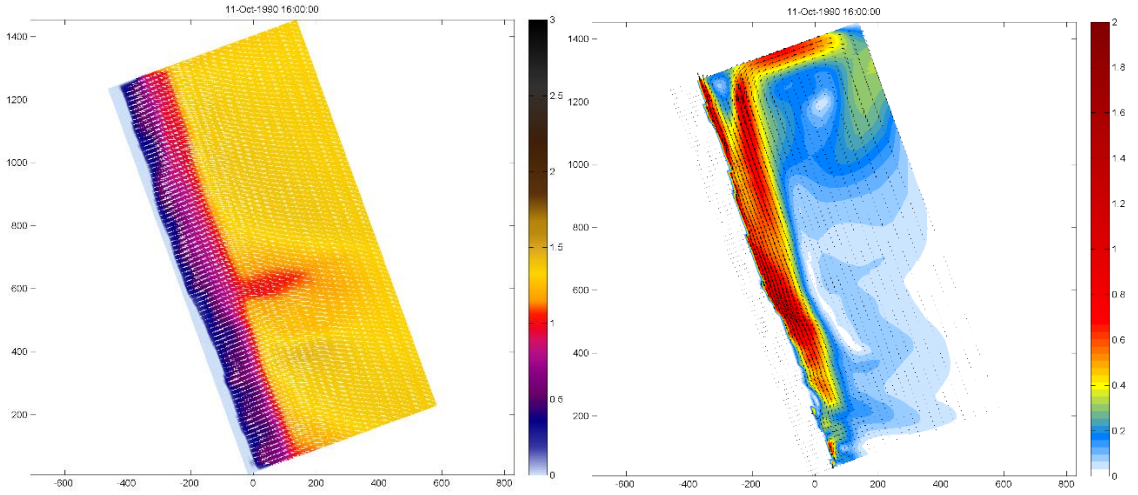


Figura 76: Mapas de altura de ola y corrientes para el día 11 a las 16:00

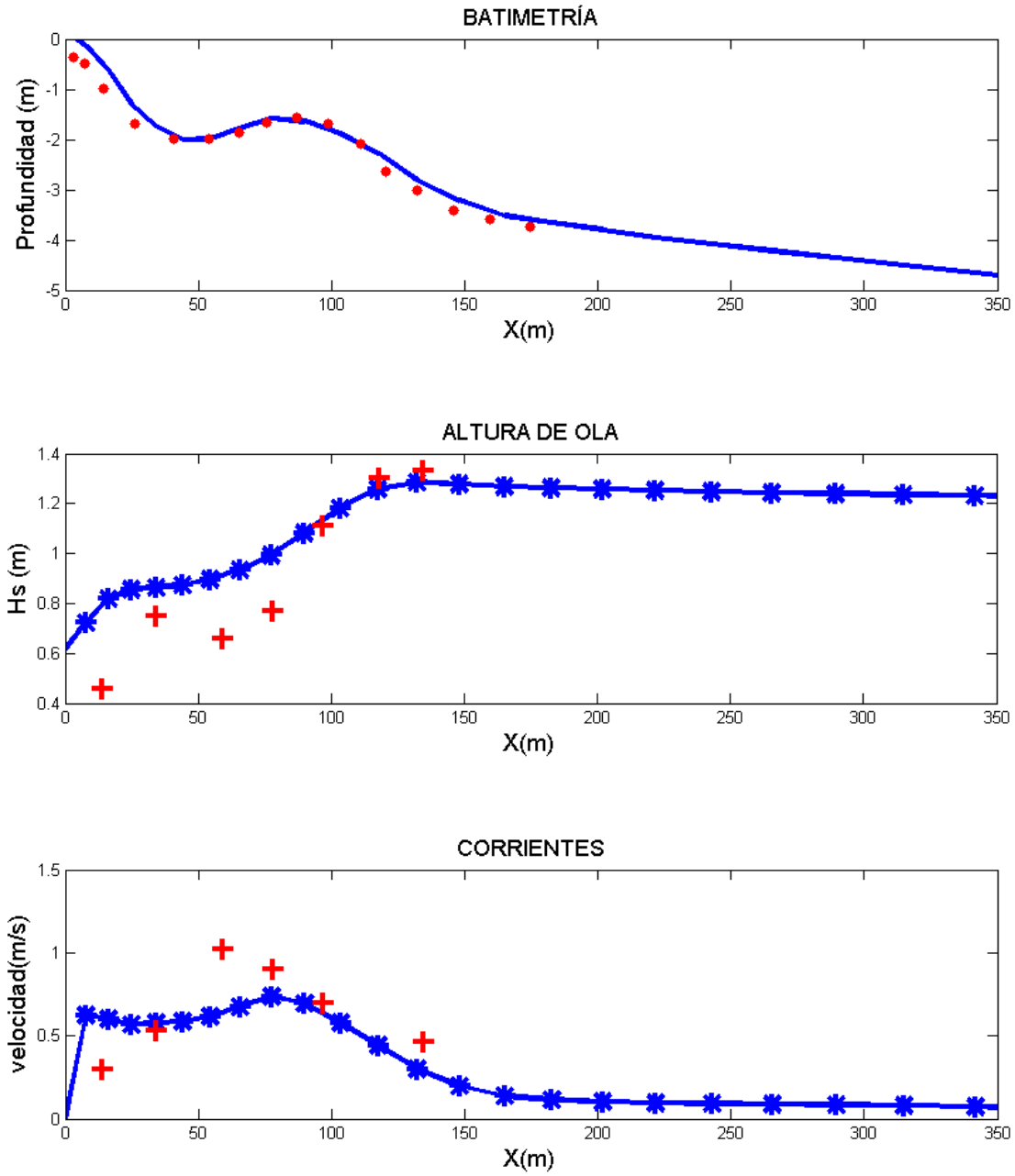


Figura 77: Comprobación de la batimetría y comparación de resultados de altura de ola y corrientes. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

Este día la barra es más pronunciada que en el anterior en la zona donde están situados los sensores de la medición. La primera rotura al encontrar la barra la realiza correctamente, pero el asomeramiento posterior no tanto, esto puede ser debido a que

las corrientes no alcanzan los valores medidos en la realidad, previo al peralte y rotura última.

En la comparativa que se muestra a continuación (ver figura 78), al igual que se ha hecho en el resto de casos de un perfil cercano, las corrientes se ajustan mejor y provocan también una disminución más pronunciada en la altura de ola. Como se puede apreciar y se comentaba en los casos anteriores, la batimetría no reproduce correctamente la realidad.

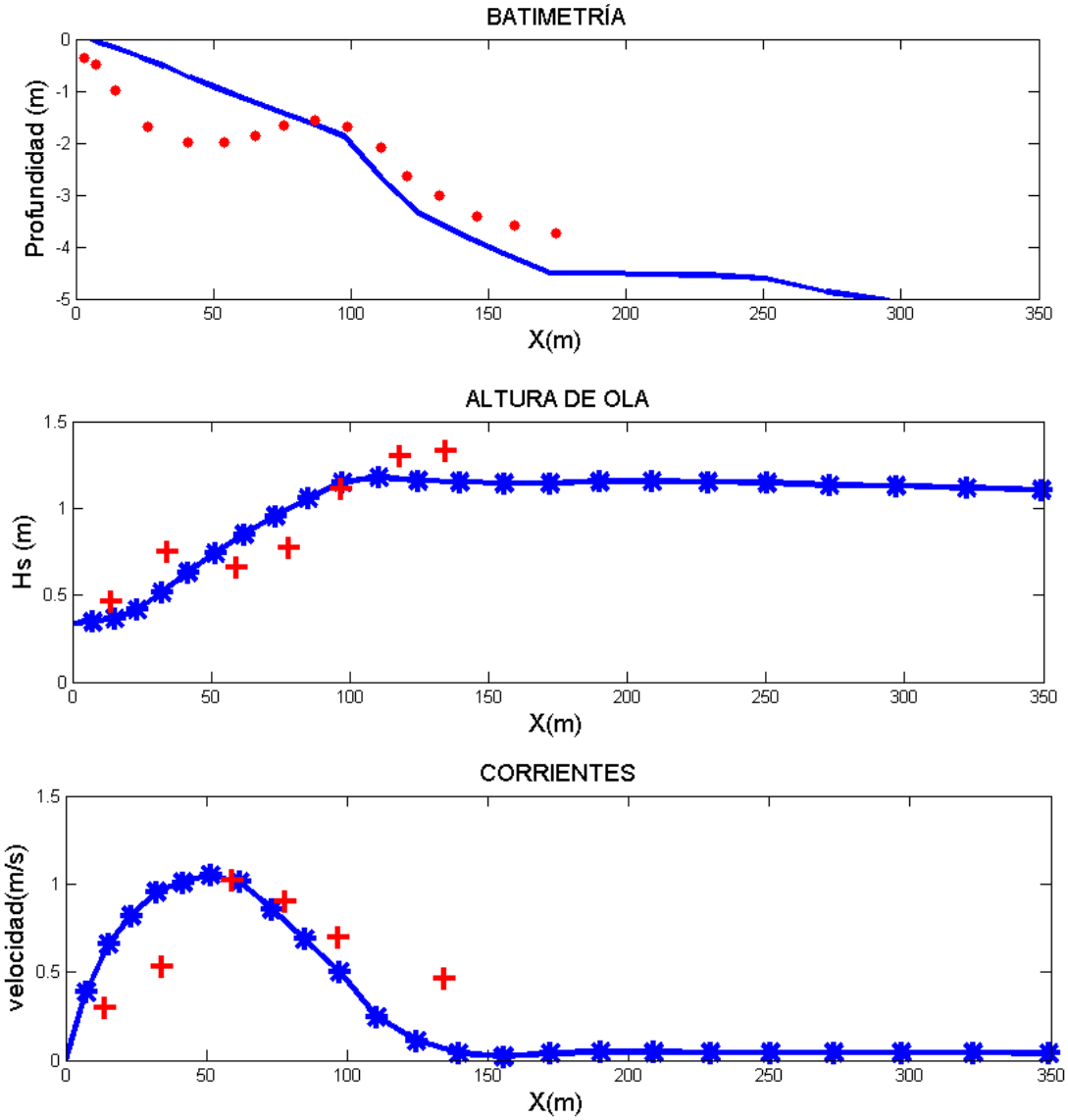


Figura 78: Altura de ola y corrientes en un perfil cercano. En rojo datos DELILAH, y en azul SOPROA.

Las conclusiones que se obtiene tras este ensayo, son primeramente la importancia de la batimetría, que ya se ha demostrado y comentado, también que el modelo es capaz de obtener buenos resultados, pudiendo considerarse válidos para el sistema.

La altura de ola significante es la variable que mayor peso tiene en el cálculo del MSI, de la navegabilidad y de la varada y es una variable que el modelo resuelve bien. Se ha observado tras los experimentos de validación realizados, que el modelo tiende a sobre-estimar el oleaje, lo que supone estar del lado de la seguridad siendo esta diferencia de unos 10 o 20 centímetros.

Otra conclusión importante que se obtiene es, que los valores se ajustan mejor a la realidad si existe la interacción con la corriente. Esto se puede ver en la siguiente figura, en la que se compara el resultado de la altura de ola que se obtiene ejecutando únicamente el SWAN (figura 79) con la obtenida por el sistema SOPROA (figura 80).

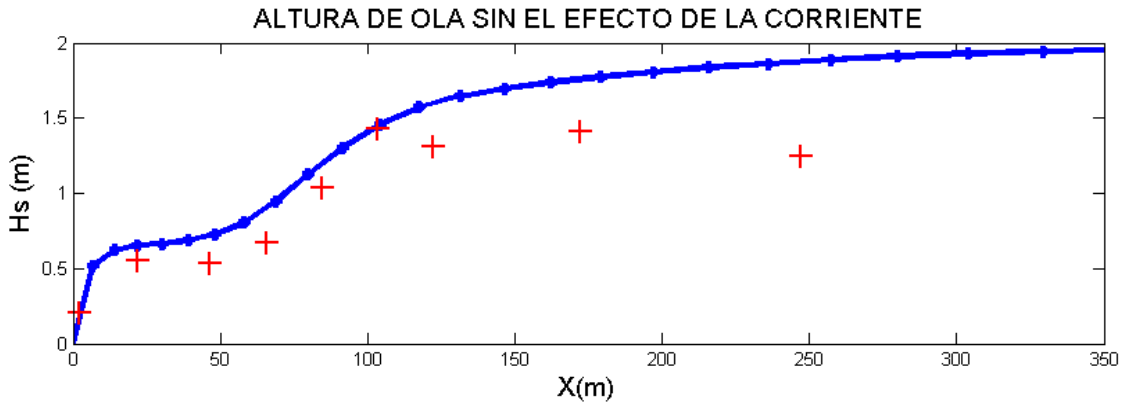


Figura 79: Altura de ola obtenida por el SWAN.

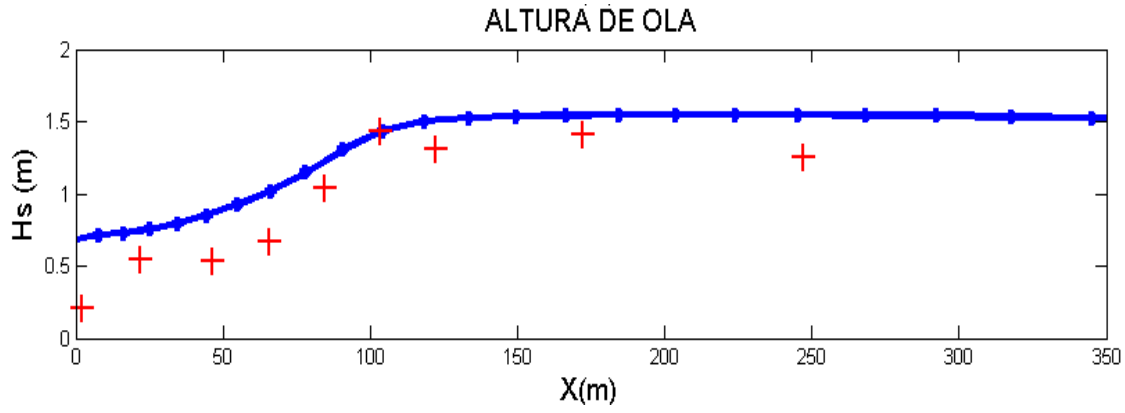


Figura 79: Altura de ola obtenida por el sistema SOPROA.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas tras este estudio son:

- La metodología de tres módulos diferenciados que permita intercambiar en ellos herramientas o realizar actualizaciones de las existentes sin que el método cambie, hace que la herramienta pueda ir mejorando fácilmente con pequeños cambios.
- El módulo de ejecución, formado por el acoplamiento SWAN-SHORECIRC, realiza correctamente los procesos físicos que tienen lugar en la costa.
- Para que los resultados obtenidos se correspondan lo máximo posible con la realidad, es fundamental la calidad de la batimetría.
- El tiempo de simulación de la herramienta depende del dominio de estudio y principalmente de la resolución con la que se definan la malla general y la malla de detalle.
- El módulo de post-proceso cumple la función de aportar la información necesaria a los oficiales METOC de una forma sencilla, intuitiva y rápida.

Por tanto, con este trabajo, como se indicaba al comienzo del documento, se cumple con el objetivo del desarrollo de un sistema operacional de ayuda al desembarco anfibio, que sea robusta, integrada, eficiente, intuitiva, portable, re-localizable e interactiva que ayude a los oficiales METOC a tomar decisiones previamente y durante las operaciones de desembarco anfibio.

6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El desarrollo de la primera versión del sistema SOPROA, supone un avance en el conocimiento predictivo de los productos para el desembarco anfibio, derivados de las variables METOC. No obstante, este sistema puede seguir desarrollándose mediante:

- Estudio de los parámetros del modelo SWAN y del modelo SHORECIRC, así como las combinaciones entre ellos para obtener los resultados más reales posibles.

- Estudio del módulo de sedimentos de modelo SHORECIRC, ya que, si se consigue un buen resultado del movimiento de sedimentos, la batimetría puede ajustarse mejor a la realidad según avanzan los días de predicción y, por tanto, obtener un oleaje y unas corrientes más realistas.

- Hacer un estudio de tiempo computacional que requiere la ejecución, en función de la resolución de las mallas y el número de estados de mar, para ofrecer al usuario una recomendación en el montaje y así optimizar la herramienta.

7. REFERENCIAS

1. Delft University of Technology. “SWAN Technical documentation” (2006)

2. Delft University of Technology. “SWAN user manual” (1993-2018)

3. Fengyan Shi, Ib A. Svendsen, and James T. Kirby. “CURVILINEAR SHORECIRC User’s Manual” (1999)

4. Fengyan Shi, James t. Kirby, Tian-jian (Tom) Hsu, Jia-Lin Chen and Ryan Mieras. “A hybrid TVD solver for the nearshore community model documentation and user’s manual” (2013)

5. Gabriel Díaz Hernández y Beatriz Rodríguez Fernández “Manual para el uso de la herramienta GUIH-SWAN” (2017)

6. Ib A. Svendsen, Kevin Haas, and Qun Zhao. “Quasi-3D Nearshore Circulation Model SHORECIRC Version 2.0” (2001)

7. Jia-Lin Chen, Fengyan Shi, Tian-Jian Hsu, James T. Kirby. “NearCoM-TVD — A quasi-3D nearshore circulation and sediment transport model” (2014)

8. Luc Hamm. “Directional nearshore wave propagation over a rip cannel: an experiment” (1990).

9. O.R. Sørensen, H.A. Schaffer, P.A. Madsen. “Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations” (1998)

10. T. N. Alejandro Ortega Felipe. “Sistema predicción operacional para movimiento buque-costa” (2016)

11. William A. Birkemeier el al. “1990 DELILAH nearshore experiment” (1990)

12. Y. LARRY HSU. “Improvement and Validation of the Navy Longshore Current Model” (2000)

13. Y. Larry Hsu. “Software desing document for the Navy Standard Surf Model” (2002)

14. Y. Larry Hsu. “Validation Test Report for the Navy Standard Surf Model” (2002)

15. Yunfeng Chen, Fengyan Shi and James T. Kirby: “Coupling of Wave and Circulation Models for Predicting Storm-Induced Waves, Surges, and Coastal Inundations” (2010)

ANEXO 1. MANUAL DE USUARIO Y APLICACIÓN EN UN CASO REAL

En este apartado se presenta el manual de usuario redactado para facilitar el uso de la herramienta. Se explicará mediante el montaje de un caso real que consiste en el estudio de las condiciones de navegabilidad, varada y desembarco durante las maniobras llevadas a cabo por la Armada Española, en julio de 2018, en la playa de Raposa, al sur de Portugal.

Una vez finalizado el manual, se incluye un apartado, "*Comparación de resultados, Portugal",* que no pertenece al manual y en el que se comparan los resultados obtenidos por la herramienta con los que obtuvieron el IHM y el GNP durante las maniobras.

MANUAL DE USUARIO

SISTEMA SOPROA

Contenido

PASO 0: Instalar el MCR y ejecutar el programa IH_SOPROA.exe 101

PASO 1: Crear un proyecto nuevo 102

PASO 2: Leer un archivo de batimetría 104

PASO 3: Definición de las mallas. 107

PASO 4. Definición de los puntos de salida de resultados (puntos de control) 116

PASO 5: Seleccionar forzamiento y ejecutar 117

PASO 6: Abrir un proyecto pre-existente 122

PASO 7: Realizar el post-proceso 123

PASO 8: Generar informe 133

La herramienta SOPROA es una GUI mediante la cual se lleva a cabo la ejecución y el post-proceso de oleaje, viento y corrientes con el fin de obtener productos de navegabilidad, varada y desembarco que sirvan de ayuda para las operaciones de desembarco anfibio. El módulo de ejecución está formado por el acoplamiento del modelo de propagación SWAN (Booij et al. 1990) con el modelo de corrientes SHORECIRC (Svendsen et al. 2000). Con el objeto de facilitar el uso de la herramienta, se ha redactado el presente manual, donde se muestran los pasos a seguir para el uso de la GUI mediante la aplicación a un caso real.

Este caso forma parte de las maniobras llevadas a cabo por la Armada Española durante el mes de julio de 2018, al sur de Portugal.

PASO 0: Instalar el MCR y ejecutar el programa IH_SOPROA.exe

El fichero MCR es necesario instalarlo la primera vez que se vaya a ejecutar el programa y sirve para las librerías necesarias por el programa MATLAB (que no será necesario tener instalado) en el ordenador donde se quiera ejecutar el programa IH_SOPROA.exe. También es necesario instalar el programa MiKTeX que viene en el zip, es el encargado de poder obtener el informe PDF.

Al ejecutar el exe se abre la portada del programa (ver figura 81), la ventana negra que se ve es una ventana de control de programas y no debe ser cerrada mientras la GUI permanezca abierta.

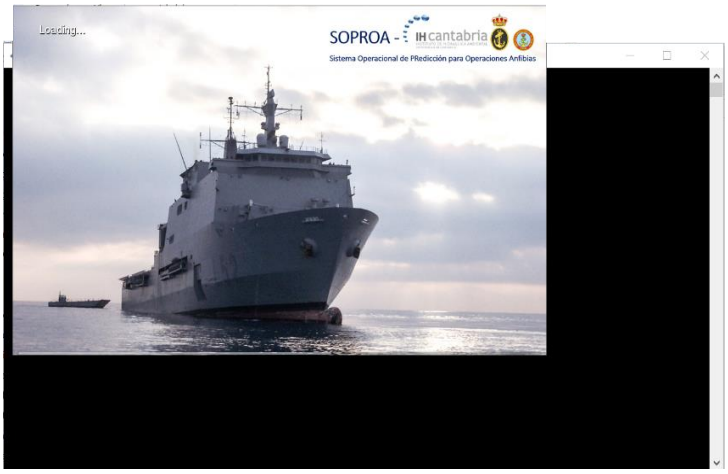


Figura 80: Ventana de portada del programa.

PASO 1: Crear un proyecto nuevo

Tras la imagen de la figura 81, aparece la siguiente ventana, en la que seleccionaremos nuevo para crear un proyecto de cero.

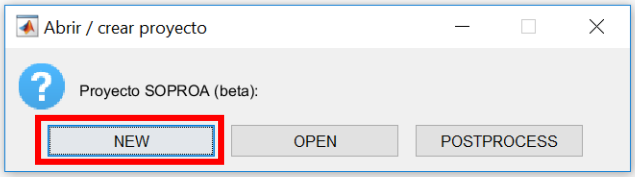


Figura 81: Sub-ventana para crear, abrir o post-procesar un proyecto.

Crea una nueva carpeta en tu directorio, ponle un nombre corto, sin espacios ni caracteres "especiales" y selecciónala.

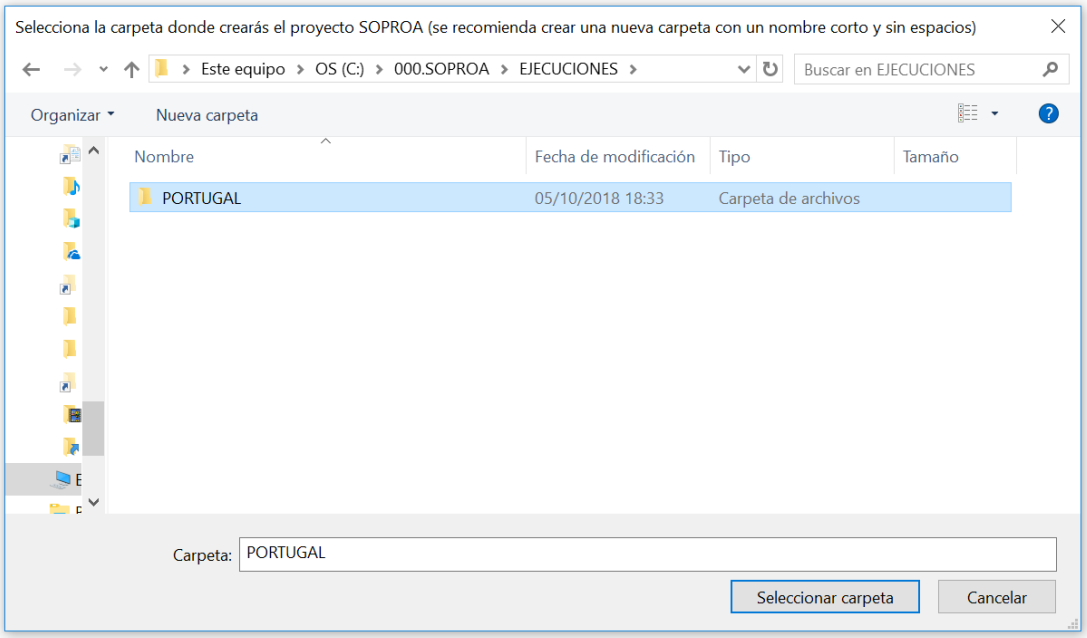


Figura 82: Crear una carpeta nueva y seleccionarla.

Dicha carpeta será la raíz del nuevo proyecto generado. Para este caso se le ha puesto el nombre "PORTUGAL". Al crear la carpeta y darle aceptar, pasan dos cosas:

1. Dentro de la carpeta creada, "PORTUGAL", se generan las sub-carpetas que se muestran a continuación, donde se irán guardando todos los datos, batimetrías, mallas, etc. Más adelante se irán detallando.

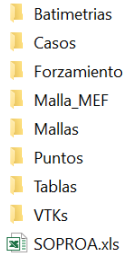


Figura 83: Sub-carpetas del proyecto.

IMPORTANTE: el fichero SOPROA.xls se emplea para gestionar el proyecto, las carpetas y archivos más importantes que lo conforman, se recomienda no abrirlo ni modificarlo. Además, este archivo es el que se usa para abrir un proyecto pre-existente.

2. Se abre la ventana general del módulo de ejecución de la GUI, como nombre de proyecto se pondrá por defecto el nombre de la carpeta generada y no se puede modificar.

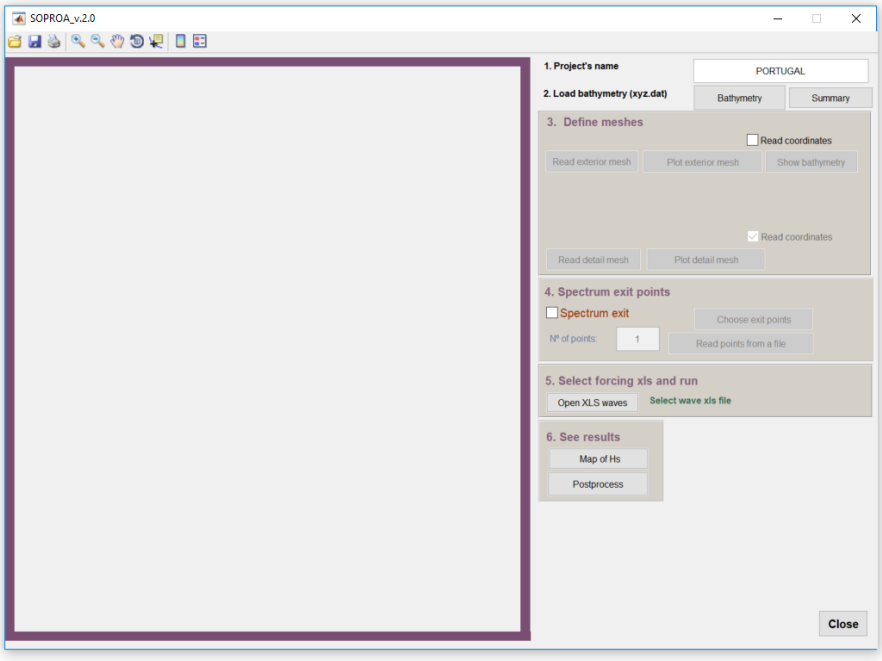


Figura 84: Ventana general de la GUI SOPROA.

PASO 2: Leer un archivo de batimetría

La batimetría se carga pulsando el botón resaltado en rojo en la figura 86, de la ventada principal antes presentada.

- El archivo de batimetría debe tener el siguiente formato:
- Formato ASCII.
- Extensión .dat
- Tres columnas con las coordenadas X, Y, Z respectivamente.
- Z representa la batimetría (mar con valores positivos y tierra negativos).
- Solo información numérica, no admite texto.

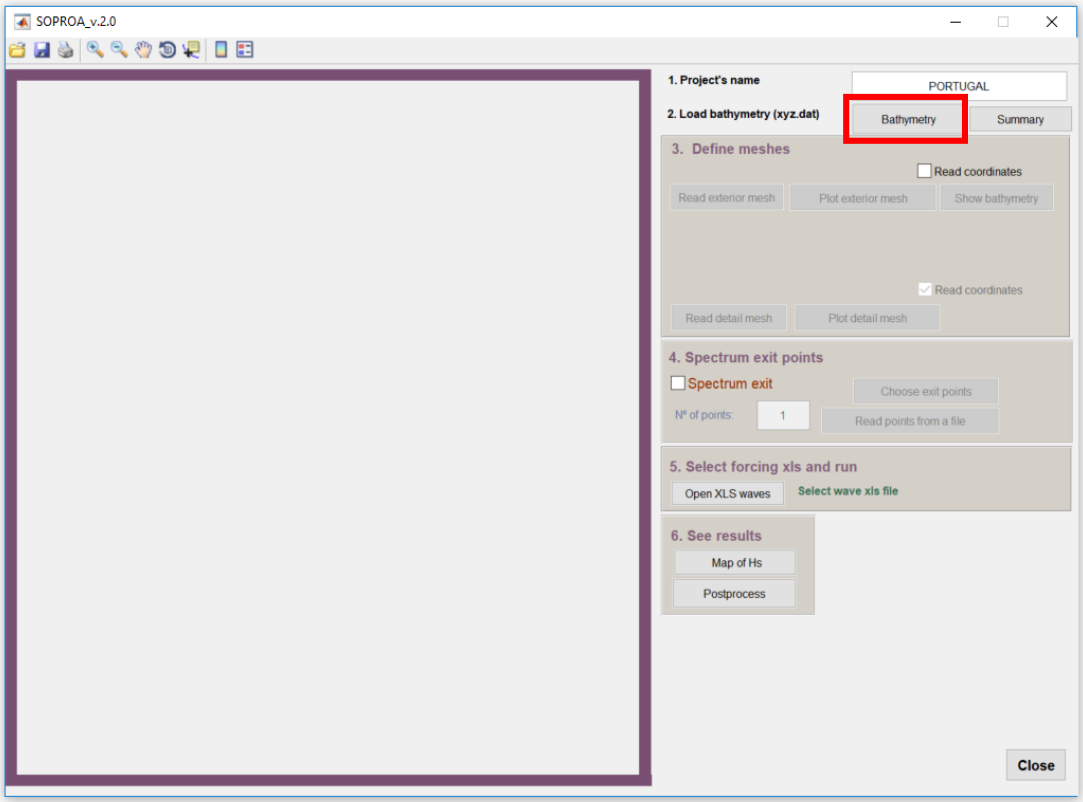


Figura 85: Ventana general de la GUI, marcado en rojo el botón para cargar batimetría.

Al seleccionar el botón “Batimetría”, se busca en el archivo, se selecciona y se abre. Para este caso se empleará el fichero “Bati_Portugal.dat”.

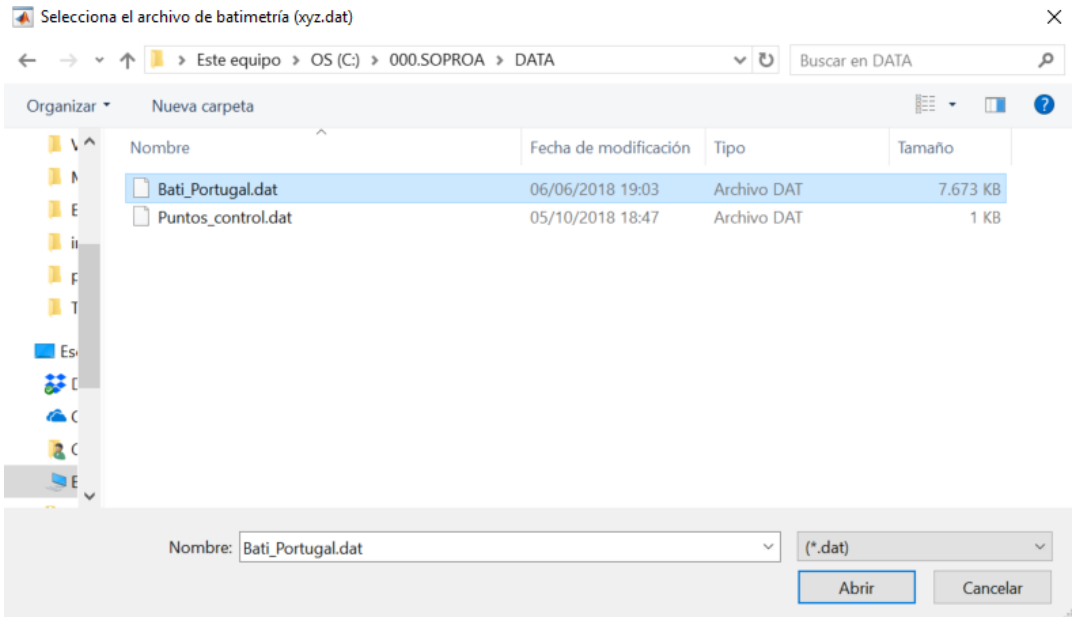


Figura 86: Selección del archivo de batimetría del proyecto.

Al cargar la batimetría se abre una sub-ventana en la que es necesario indicar si las coordenadas batimétricas están en UTM o geográficas (LON-LAT). En esta versión del SOPROA las coordenadas siempre deben ser UTM.

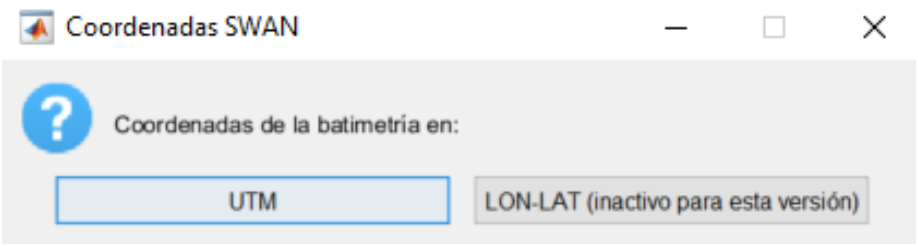


Figura 87: Selección del sistema de coordenadas de la batimetría.

Una vez cargada la batimetría, se muestra en la GUI una imagen de la misma con leyenda de escala de colores que indica la profundidad máxima y mínima de la misma.

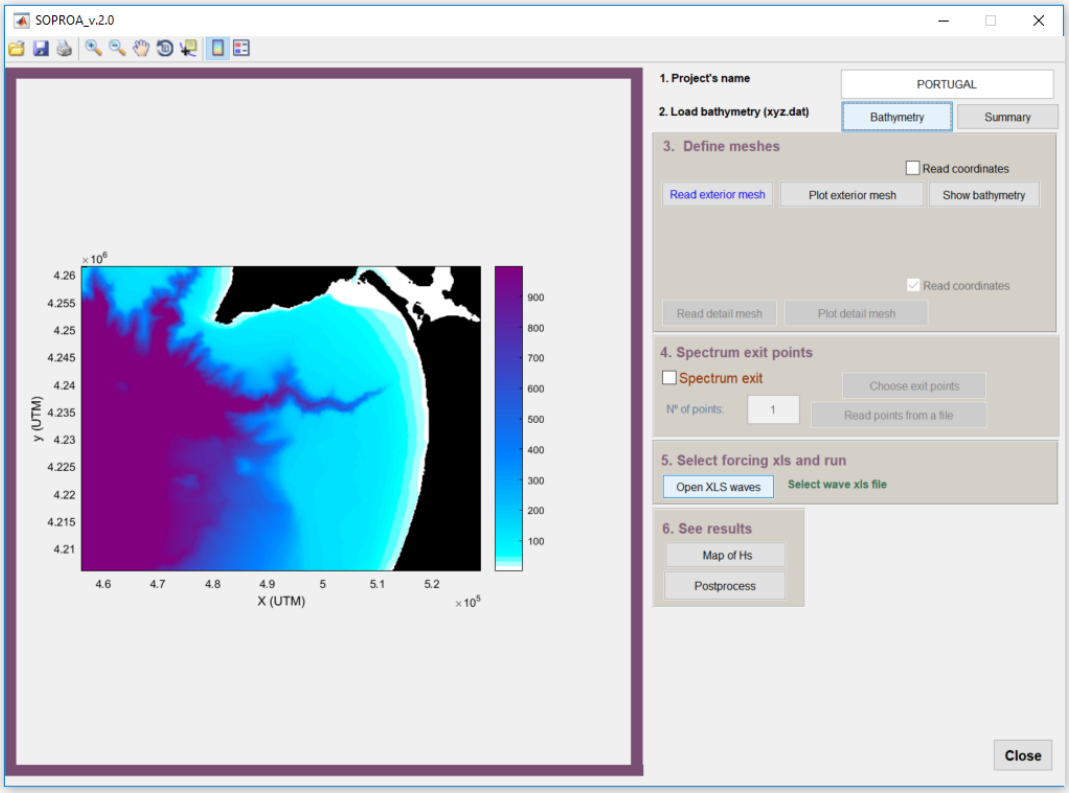


Figura 88: Ventana general de la GUI con la imagen de la batimetría cargada.

Nota: al abrir la batimetría, el fichero leído se copia en la sub-carpeta “Batimetrías” (ver sub-carpetas en la figura 84).

PASO 3: Definición de las mallas.

En este paso se definirán las mallas numéricas que consistirá en una malla general y otra de detalle embebida en la anterior.

1. Malla general

Para definir la malla general hay tres opciones.

1.1. Dibujar la malla por pantalla: se selecciona con el cursor las dos esquinas opuestas de la misma (para ello seleccionar el botón resaltado en rojo en la figura 90).

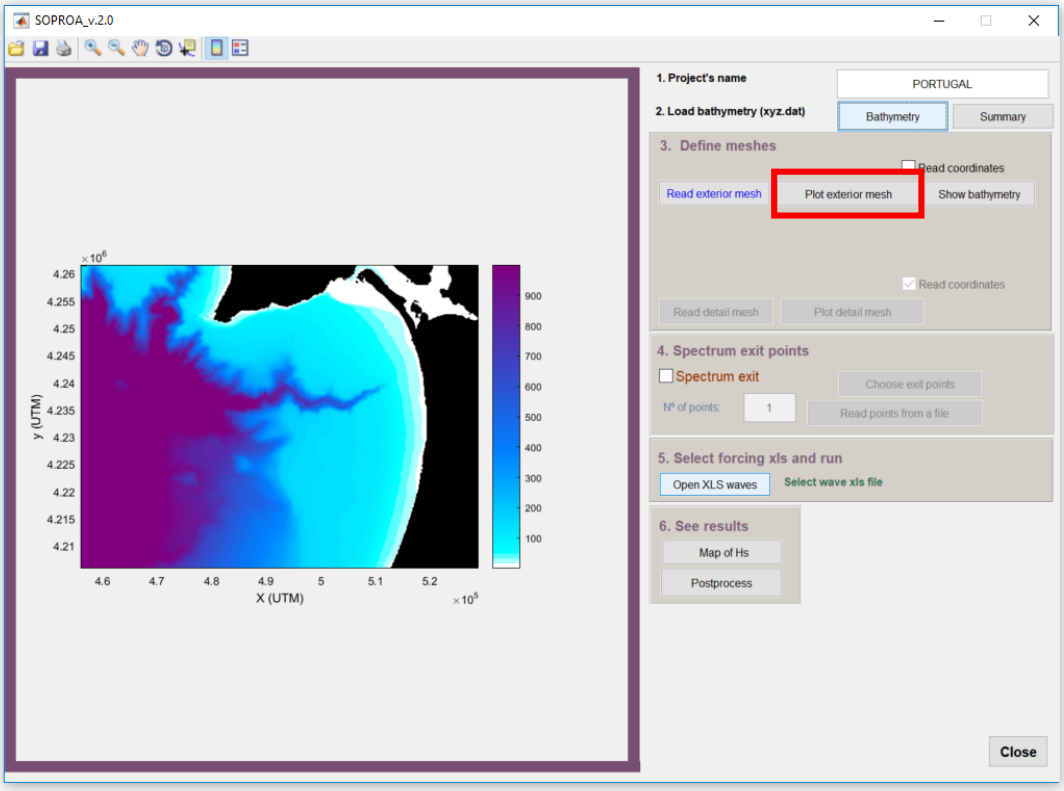


Figura 89: Ventana general de la GUI. Definición de la malla general por pantalla.

Una vez definidos los límites de la malla, aparece la siguiente ventana, donde se define la distancia entre nodos, es decir, la resolución de la malla.

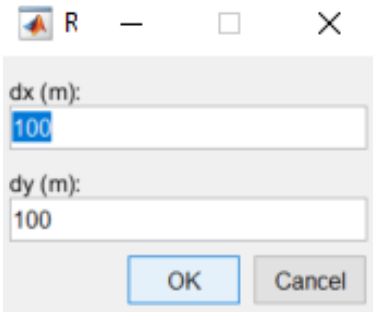


Figura 90: Definición del tamaño de las celdas de la malla general.

Para el caso que se está realizando se usará una resolución de 200x200 metros.

1.2. Dibujar la malla a partir de las coordenadas de sus esquinas: Para ello es necesario saberlas previamente y marcar la casilla "Leer coordenadas" antes de presionar el botón "Dibujar malla exterior".

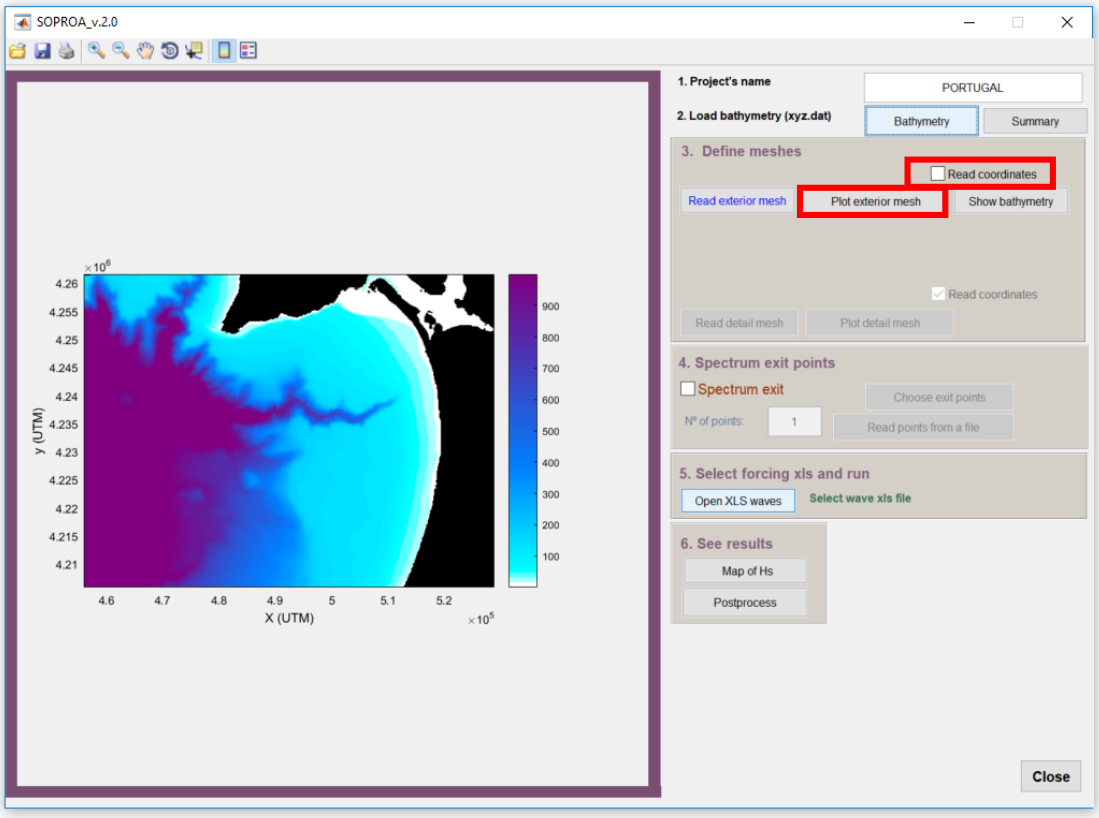


Figura 91: Ventana general de la GUI. Definición de la malla general a partir de las coordenadas de sus esquinas.

Aparecerá la siguiente ventana, en las que se introducen las coordenadas de las cuatro esquinas de la malla.

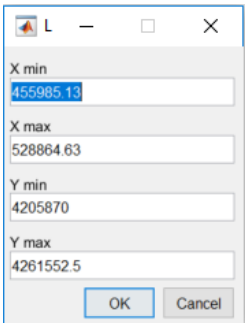


Figura 92: Ventana donde definir las coordenadas de las esquinas de la malla general.

A continuación, aparece la sub-ventana para establecer la resolución de la malla que se mostraba en la opción anterior (ver figura 91).

Una vez definida la malla general aparecen las características principales de la misma en la GUI, debajo de los botones para dibujarla. La información que se da es el tamaño de las celdas, número de nodos y dimensión de la malla. Además, aparece sobre la imagen de la batimetría el contorno exterior de la malla y los nodos.

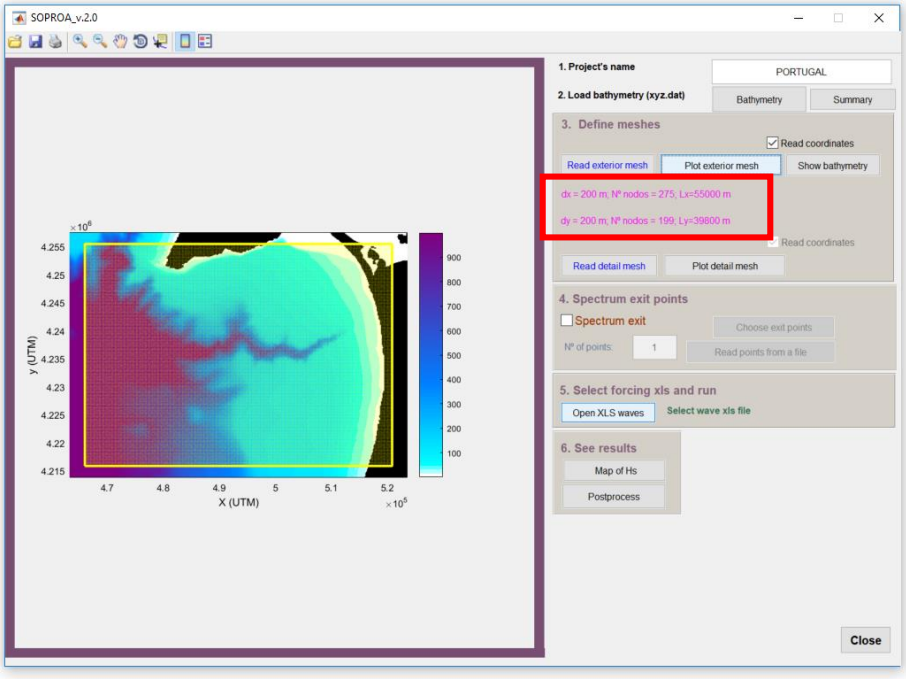


Figura 93: Ventana general de la GUI, con las características de la malla general.

Nota: en cualquiera de las dos opciones mostradas previamente (1.1 y 1.2), al terminar de definir la malla general se guarda en la sub-carpeta "Mallas" el fichero "Malla_general.mat" con las características de la misma (variable R1 que contiene 7 celdas):

- R1{1} = Xmin.
- R1{2} = Ymin.
- R1{3} = Xmax.
- R1{4} = Ymax.
- R1{5} = dx.
- R1{6} = dy.
- R1{7} = 1 (por ser coordenadas UTM).

1.3. Dibujar la malla general a partir de un archivo "Malla general.mat": si previamente se ha creado un fichero a partir de alguna de las dos opciones anteriores o directamente en MATLAB. Para cargarlo hay que pulsar el botón "Leer malla exterior", recuadrado en la figura siguiente.

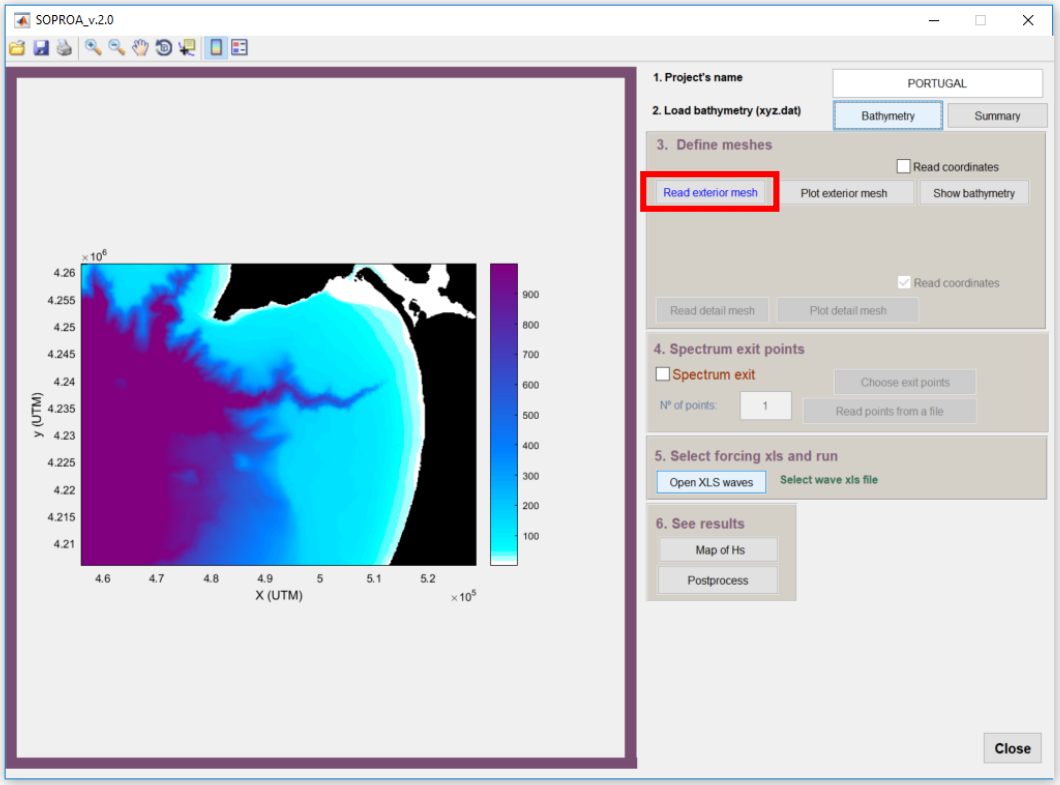


Figura 94: Ventana general de la GUI. Definición de la malla a partir de un archivo "Malla_general.mat".

Finalmente, pulsando el botón "Ver batimetría" aparece el gráfico de la malla general sobre la batimetría, este gráfico es informativo y servirá para saber si la resolución seleccionada es la correcta. Si se presiona este botón, automáticamente se guarda en la carpeta "Mallas" una imagen de la misma, "Batimetria_general.PNG".

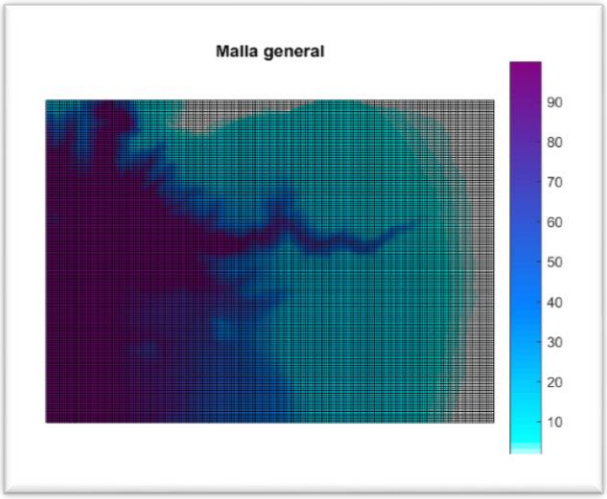


Figura 95: Malla general sobre la batimetría.

2. Malla de detalle

La malla de detalle es una malla curvilínea en la que el tamaño de la celda varía en el ancho del dominio según una ley logarítmica, disminuyendo su tamaño según se acerca a la línea de costa. En la otra dirección, la paralela a la costa, el tamaño de celda se mantiene constante.

Para definir la malla de detalle, hay dos opciones:

2.1. Dibujar la malla a partir de las coordenadas. En este caso, a diferencia de cuando lo definíamos para la malla general, la opción de "Leer coordenadas" está marcada por defecto.

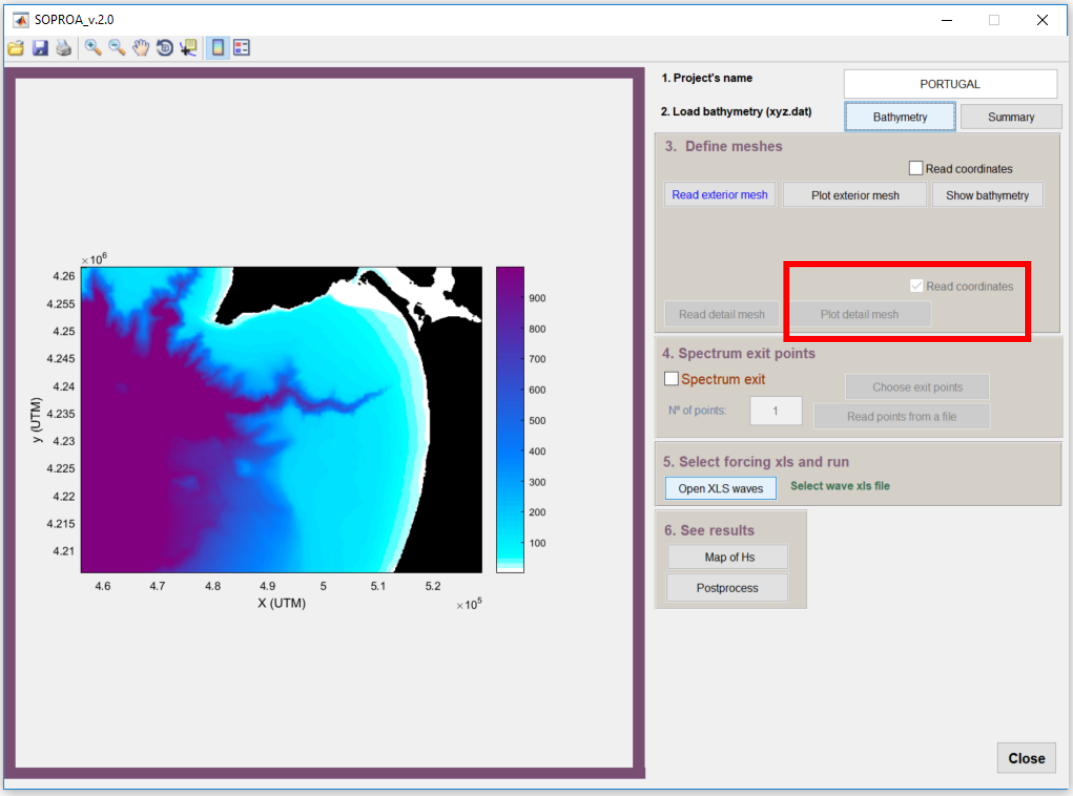


Figura 96: Ventana general de la GUI. Definición de la malla de detalle según sus coordenadas.

Al presionar el botón "Dibujar malla de detalle", se abren dos sub-ventanas que se ven en la figura 98, una de ellas tiene un esquema de los datos que hay que introducir en la otra, estos son, las coordenadas (X,Y) de la esquina inferior derecha de la malla, si esta estuviese situada, vista en planta, con la costa horizontal y la tierra al norte. También el ángulo de la malla en el sentido de las agujas del reloj desde la horizontal. Por último, la definición del ancho y largo de la malla, así como su resolución.

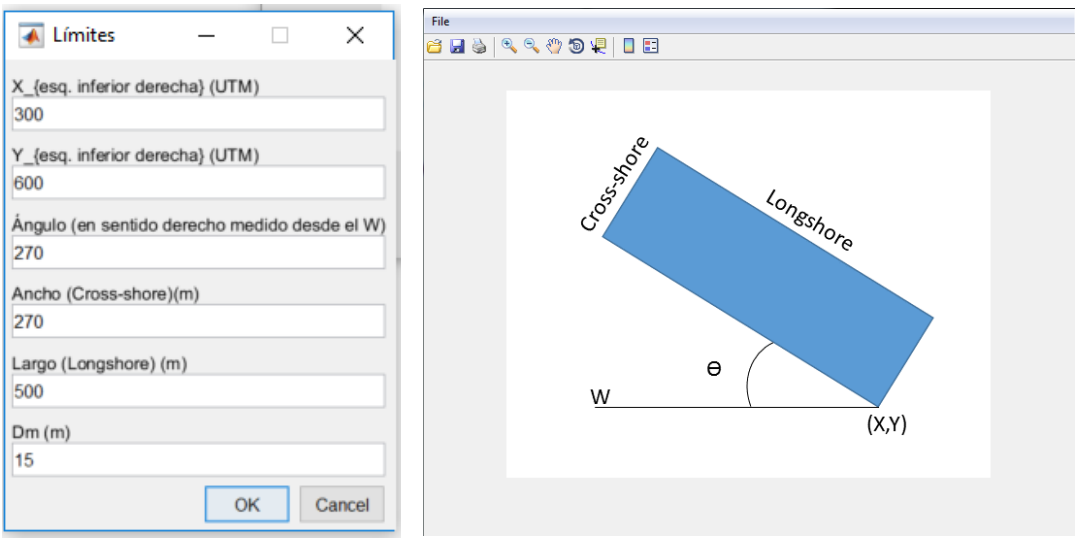


Figura 97: Sub-ventana donde describir la malla de detalle y esquema.

Al presionar el botón "OK", se abrirá otra ventana con la imagen de la malla de detalle sobre la batimetría correspondiente al dominio de detalle introducido (ver figura 100), junto con los demás valores antes introducidos. Esta imagen se guarda automáticamente en la carpeta "Mallas". Además, aparece en rojo, sobre la imagen de la batimetría general de la GUI, el contorno exterior y los nodos de la malla.

También se guardará el fichero "Malla_detalle.mat" con las características de la misma (variable tipo estructura, denominada "R2", que contiene la siguiente información):

- R2.X0 = coordenada X de la esquina inferior derecha.
- R2.Y0 = coordenada Y de la esquina inferior derecha.
- R2.Ang = ángulo de orientación de la malla detalle.
- R2.Largo = largo en metros de la malla de detalle.
- R2.Ancho = ancho en metros de la malla de detalle.
- R2.Dm = resolución en metros de la malla de detalle.
- R2.xb = coordenadas x de cada nodo de la malla detalle.
- R2.yb = coordenadas y de cada nodo de la malla detalle.
- R2.zb = coordenadas z de cada nodo de la malla de detalle.

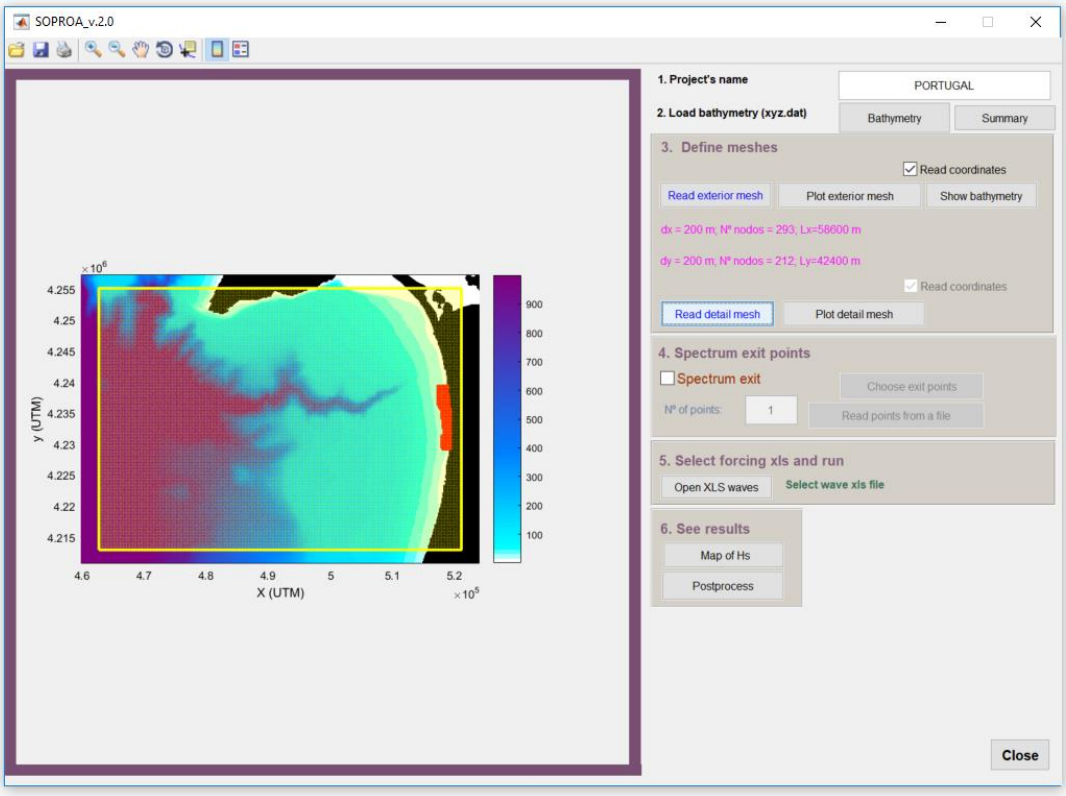


Figura 98: Ventana general de la GUI. Malla de detalle sobre la batimetría general.

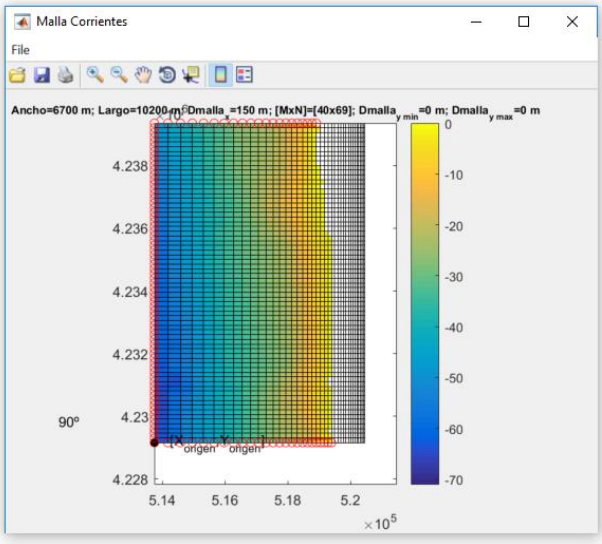


Figura 99: Características de la malla de detalle.

2.2. Dibujar la malla de detalle a partir de un archivo "Malla_detalle.mat", creado previamente como se indica en el punto 2.1. Para realizar esta acción, presionar el botón "Leer malla de detalle", remarcado en la figura 101.

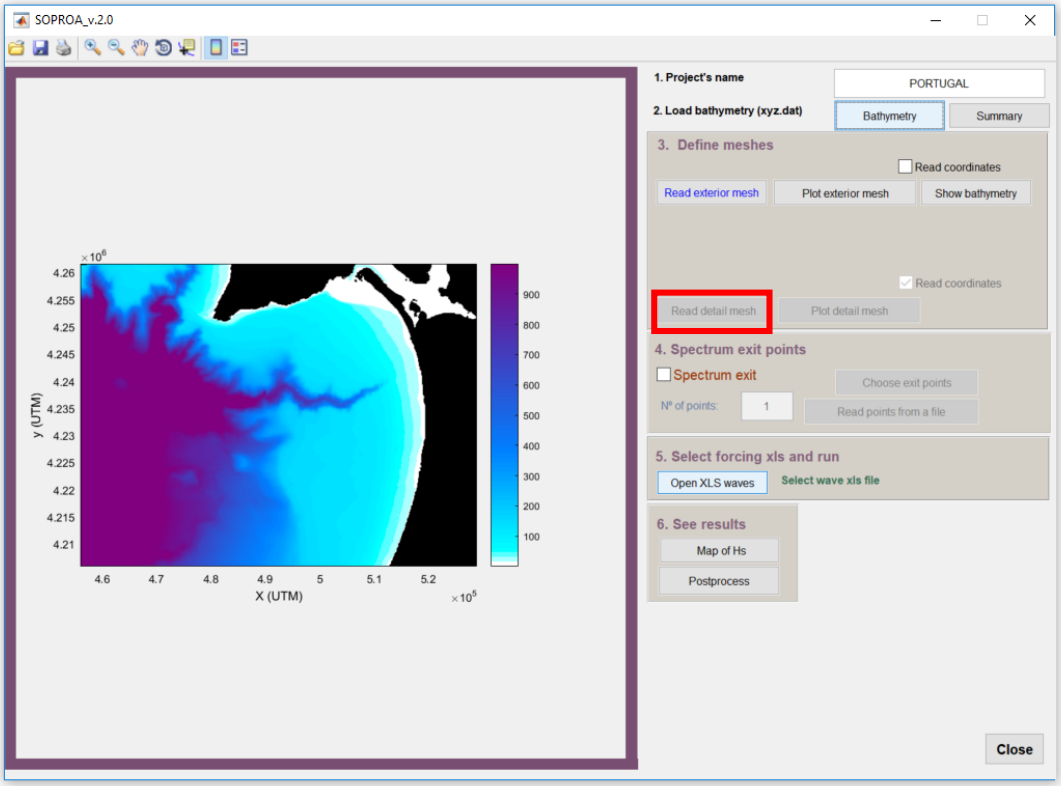


Figura 100: Ventana general de la GUI. Cargar la malla de detalle mediante un fichero "Malla_detalle.dat".

Se abrirá una ventana en la que se debe buscar, seleccionar y cargar el fichero.

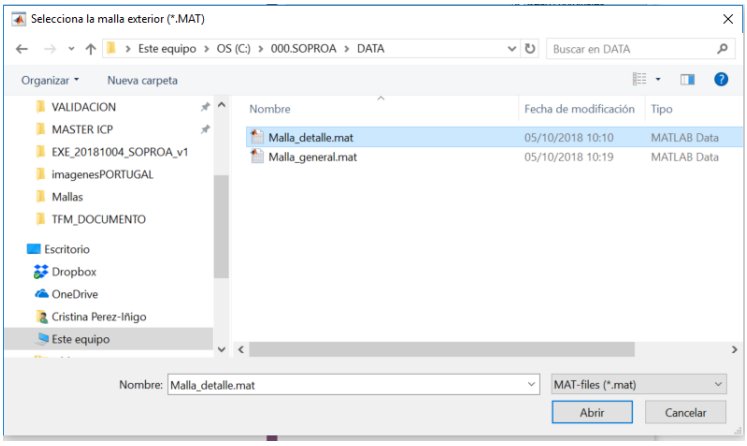


Figura 101: Búsqueda y selección de archivo de definición de la malla de detalle.

Al cargarlo, aparecen las sub-ventanas mostradas en la figura 98, donde se tendrá la opción de modificar alguno de los parámetros que definen la malla de detalle seleccionada.

Tras presionar "OK", se llevará a cabo el mismo proceso que ha sido explicado en el apartado 2.1.

Recomendación: Ver siempre la imagen mostrada en la figura 100 y comprobar que la relación entre ancho y largo de las celdas es lo más homogénea posible, intentando que el ancho no supere el doble del largo.

PASO 4. Definición de los puntos de salida de resultados (puntos de control)

Para establecer los puntos de control, hay que marcar la casilla "Salida de espectros", elegir el número de puntos donde se quiere obtener resultados de espectros y elegirlos o bien mediante el cursor (marcando el botón "Elegir puntos de salida"), o bien a través de la lectura de un fichero .dat (marcando la opción "Lee puntos desde un fichero").

Para obtener resultados en nuestro caso de ejemplo, se leerá un fichero "puntos_control.dat", con el que introduciremos dos puntos de control.

El fichero debe cumplir las siguientes condiciones:

- Formato ASCII.
- Extensión .dat.
- Columnas en orden X Y, separadas por espacio o coma.
- Solo información numérica, no admite texto.

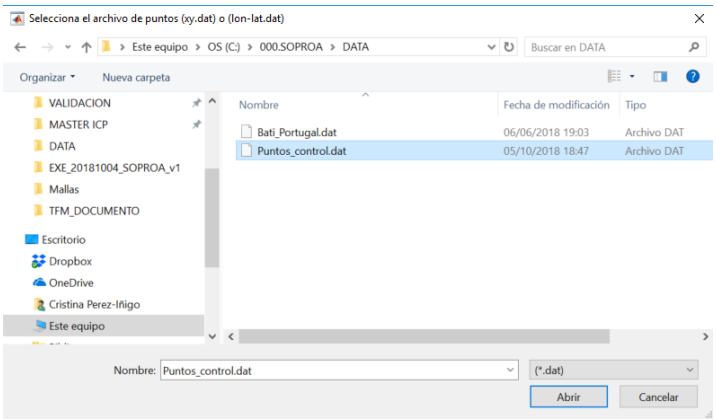


Figura 102: Búsqueda y selección del fichero con las coordenadas de los puntos de control.

PASO 5: Seleccionar forzamiento y ejecutar

Presionar botón “Abrir XLS olas” para seleccionar el fichero del forzamiento que se quiere introducir en la simulación. Dicho fichero debe incluir información sobre la localización de los puntos de oleaje y viento, las características del oleaje, viento y nivel mar, así como algunos parámetros para simular el modelo SWAN, como se describe a continuación:

En el caso que estamos realizando cargaremos el fichero “olas_Portugal.xls”, que contendrá 6 puntos de forzamiento.

Este fichero contiene varias hojas:

- Hoja 1: corresponde a la localización de los puntos de forzamiento, coordenadas X, Y UTM. En el ejemplo del presente manual se tienen 7 puntos de forzamiento.
- Hojas intermedias (tantas como puntos de forzamiento haya): corresponde a la información del oleaje, viento y nivel del mar, incluyendo la fecha [YY MM DD HH mm ss Hs Tp Dir Marea Gama Sigma Wind D_wind ID].
- Última hoja: corresponde a la hoja de variables de simulación, en donde se coloca (1) verdadero y (0) falso para algunos procesos del modelo (QUAD: quadruplets; WCAP: whitecapping; BREA: rotura de oleaje por fondo).

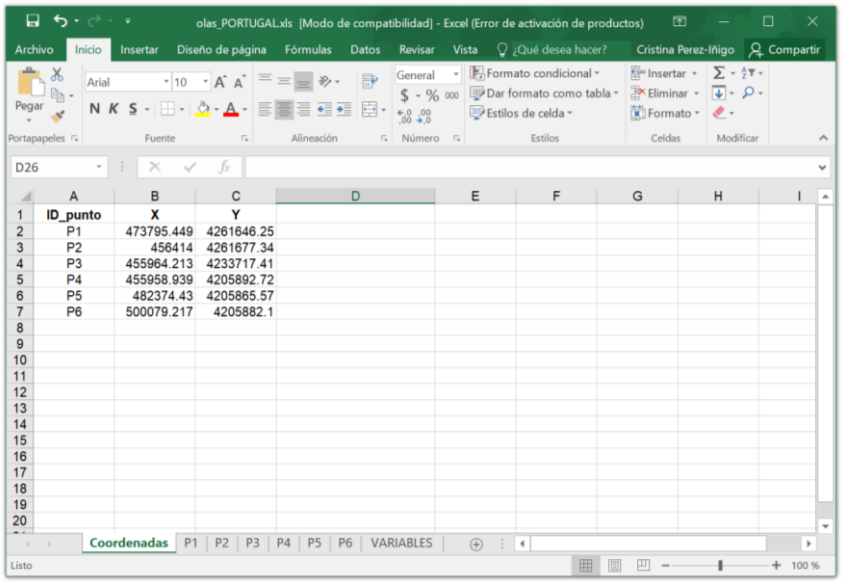


Figura 103: Hoja 1 del fichero denominado "olas_PORTUGALxls". 6 puntos de forzamiento.

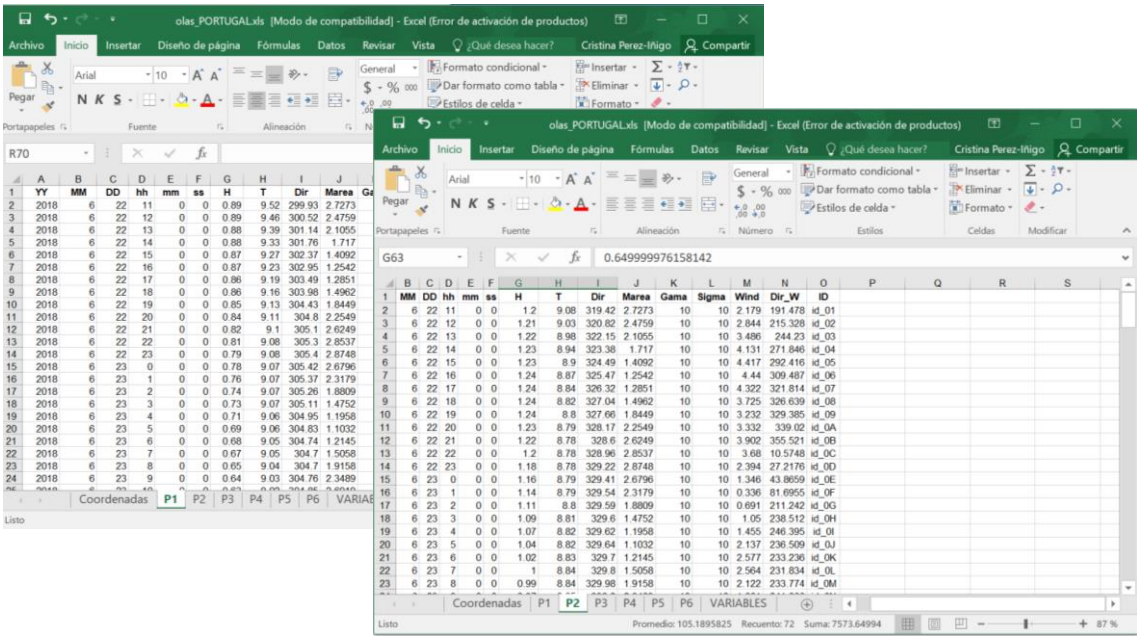


Figura 104: Hoja 2 (P1) y hoja 3 (P3) del fichero denominado "olas_PORTUGAL.xls".

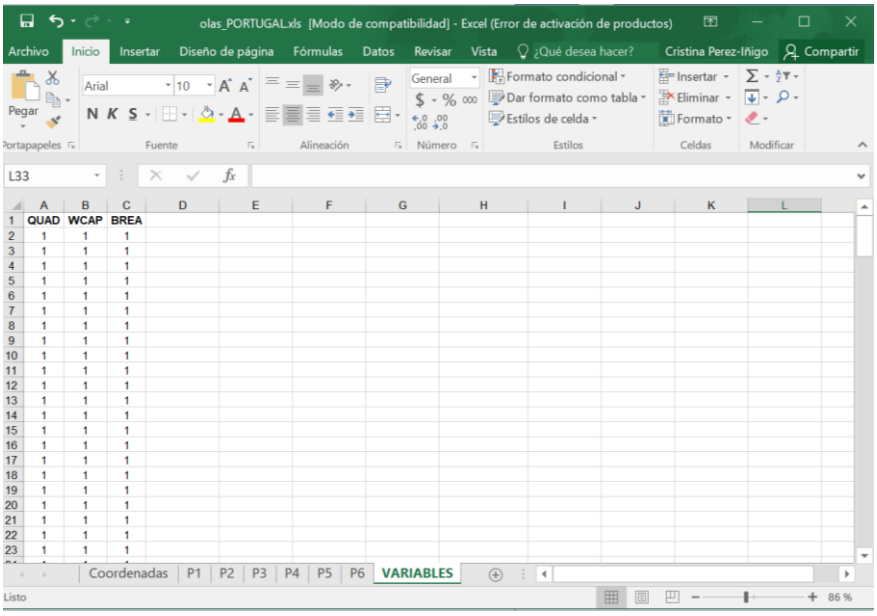


Figura 105: Última hoja (VARIABLES) del fichero denominado "olas_PORTUGAL.xls".

Todos los puntos de forzamiento deben tener el mismo número de estados de mar, estando ordenados de forma horaria. Igual pasa con la última hoja, tiene que tener tantas filas como estados de mar haya.

Recomendación: intentar que la primera hora no este indicada como hora 0, ya que puede producir error.

Al abrir el xls se abrirá una sub-ventana, denominada “Ejecución” y en la ventana general de la GUI se mostrará la localización de los puntos de forzamiento leídos. Además, se guardará automáticamente una copia del xls en la carpeta “Forzamiento” de nuestro proyecto (ver figura 4).

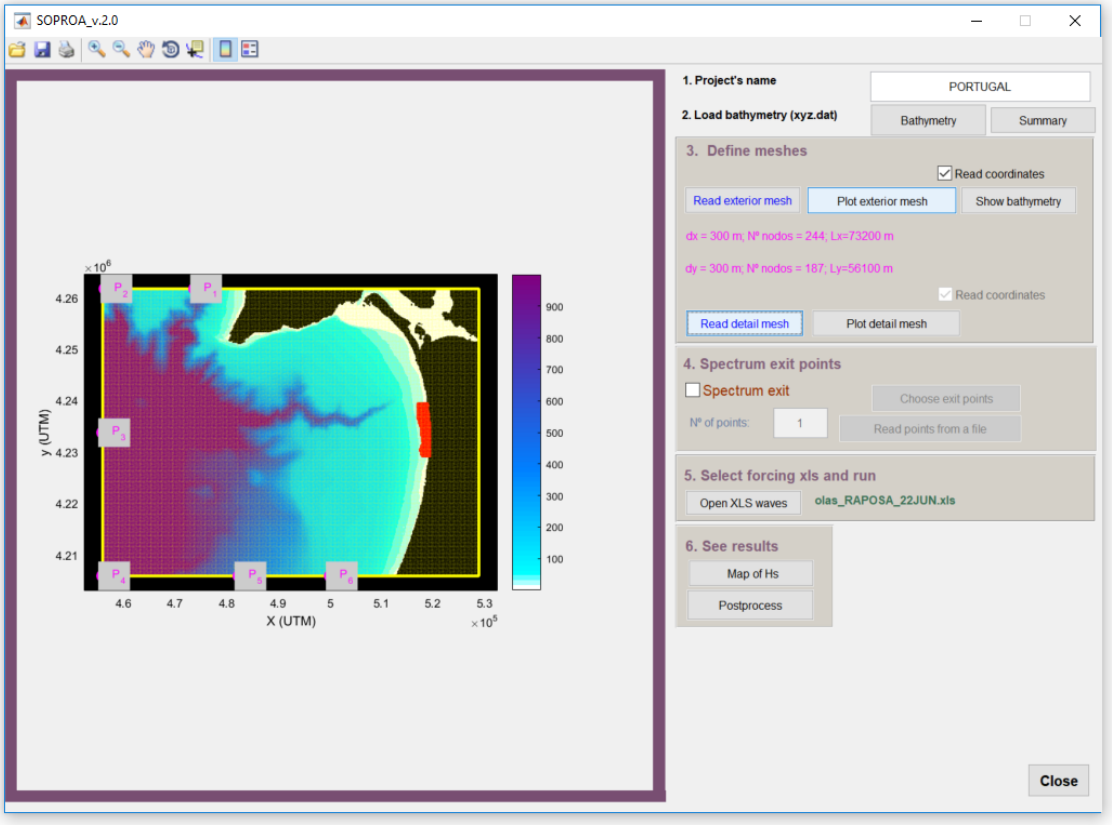
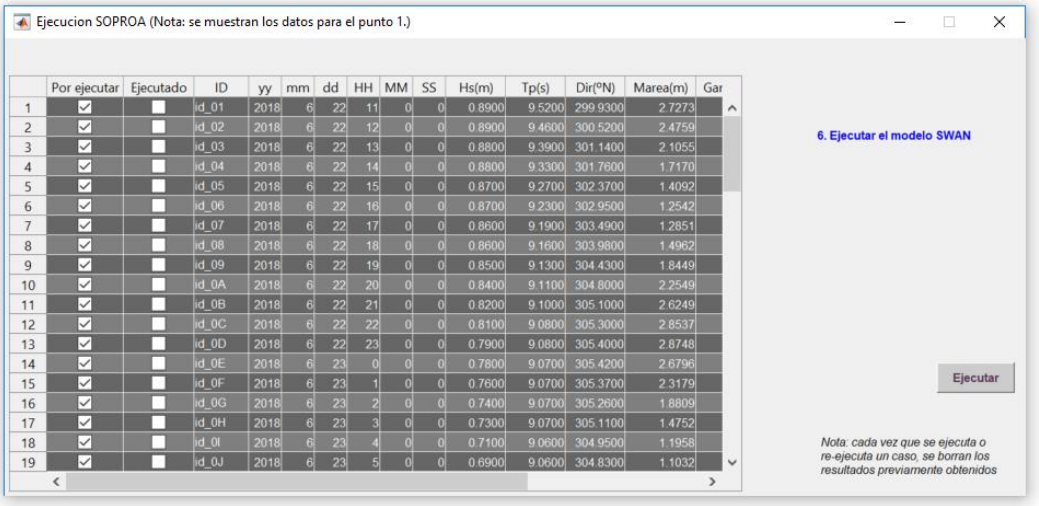


Figura 106: Ventana general de la GUI. localización de los puntos de forzamiento.



	Por ejecutar	Ejecutado	ID	yy	mm	dd	HH	MM	SS	Hs(m)	Tp(s)	Dir(ºN)	Marea(m)	Gar
1	☑	☐	id_01	2018	6	22	11	0	0	0.8900	9.5200	299.9300	2.7273	
2	☑	☐	id_02	2018	6	22	12	0	0	0.8900	9.4600	300.5200	2.4759	
3	☑	☐	id_03	2018	6	22	13	0	0	0.8800	9.3900	301.1400	2.1055	
4	☑	☐	id_04	2018	6	22	14	0	0	0.8800	9.3300	301.7600	1.7170	
5	☑	☐	id_05	2018	6	22	15	0	0	0.8700	9.2700	302.3700	1.4092	
6	☑	☐	id_06	2018	6	22	16	0	0	0.8700	9.2300	302.9500	1.2542	
7	☑	☐	id_07	2018	6	22	17	0	0	0.8600	9.1900	303.4900	1.2851	
8	☑	☐	id_08	2018	6	22	18	0	0	0.8600	9.1600	303.9800	1.4962	
9	☑	☐	id_09	2018	6	22	19	0	0	0.8500	9.1300	304.4300	1.8449	
10	☑	☐	id_0A	2018	6	22	20	0	0	0.8400	9.1100	304.8000	2.2549	
11	☑	☐	id_0B	2018	6	22	21	0	0	0.8200	9.1000	305.1000	2.6249	
12	☑	☐	id_0C	2018	6	22	22	0	0	0.8100	9.0800	305.3000	2.8537	
13	☑	☐	id_0D	2018	6	22	23	0	0	0.7900	9.0800	305.4000	2.8748	
14	☑	☐	id_0E	2018	6	23	0	0	0	0.7800	9.0700	305.4200	2.6796	
15	☑	☐	id_0F	2018	6	23	1	0	0	0.7600	9.0700	305.3700	2.3179	
16	☑	☐	id_0G	2018	6	23	2	0	0	0.7400	9.0700	305.2600	1.8809	
17	☑	☐	id_0H	2018	6	23	3	0	0	0.7300	9.0700	305.1100	1.4752	
18	☑	☐	id_0I	2018	6	23	4	0	0	0.7100	9.0600	304.9500	1.1958	
19	☑	☐	id_0J	2018	6	23	5	0	0	0.6900	9.0600	304.8300	1.1032	

Figura 107: Ventana de ejecución (estados de mar a ejecutar del P1).

En la ventana "Ejecución" se muestra una tabla, en la que ha modo informativo se muestran los parámetros leídos de la segunda hoja del xls, correspondiente al forzamiento del punto 1.

Tras presionar el botón "Ejecutar", comenzará la simulación del caso montado. En la ventana negra aparecerá la evolución de la ejecución.

Sabremos que habrá finalizado cuando la ventana negra muestre lo siguiente:

Figura 108: Indicación de final de ejecución.

Dentro de la carpeta "Casos" se habrá generado una sub-capeta llamada "PREDICCION_MSI_yyyymmdd.HH", siendo yyyymmdd.HH el año, mes, día y hora del primer estado de mar simulado. Dentro de esta carpeta se habrán guardado todos los ficheros usados para la ejecución, así como los resultados derivados de ella (ver figura 110).

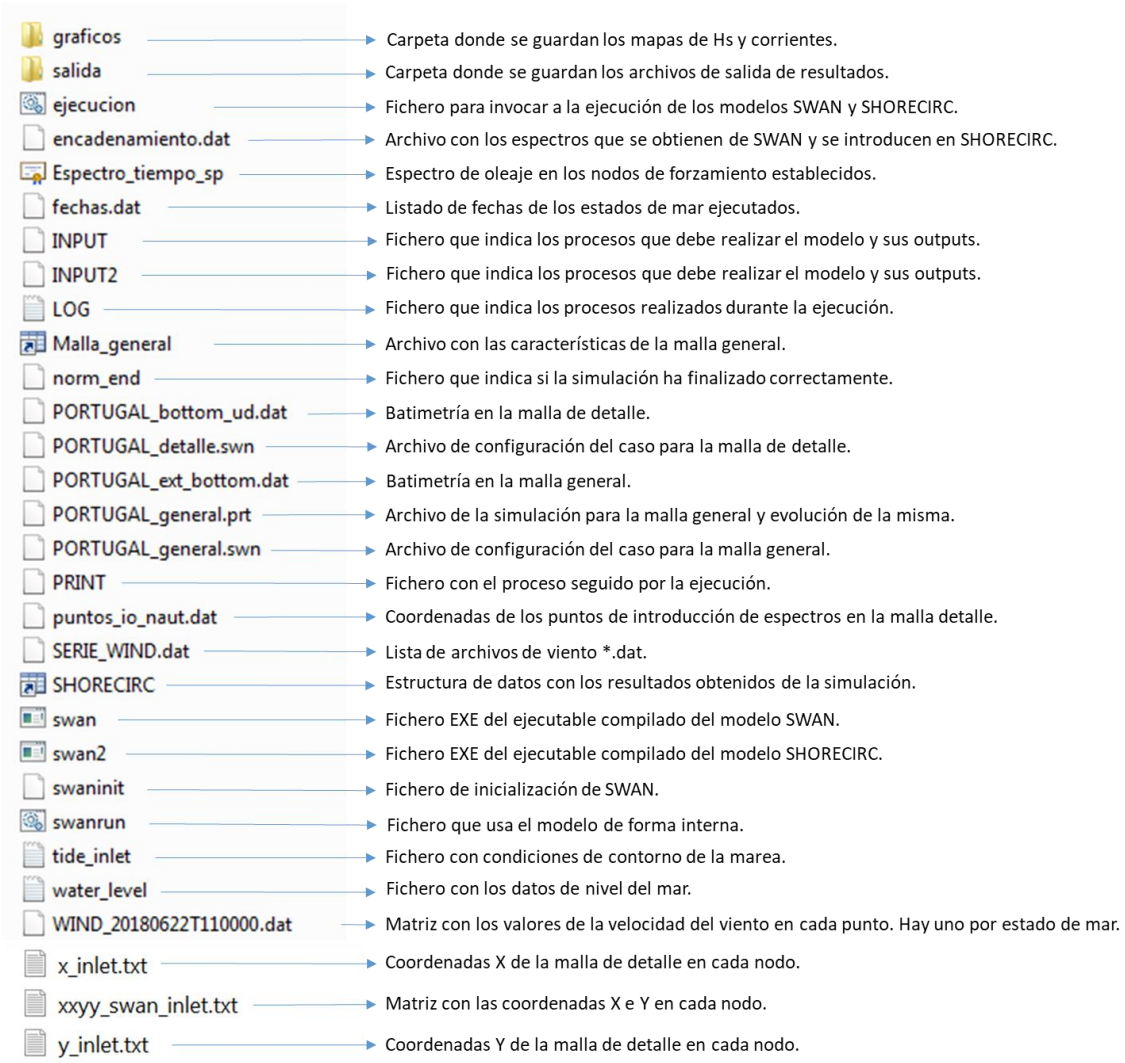


Figura 109: Lista y descripción de los ficheros generados en la carpeta "Casos".

PASO 6: Abrir un proyecto pre-existente

Si se desea recuperar un proyecto terminado o previamente creado, al ejecutar el EXE se debe seleccionar el botón "Abrir".

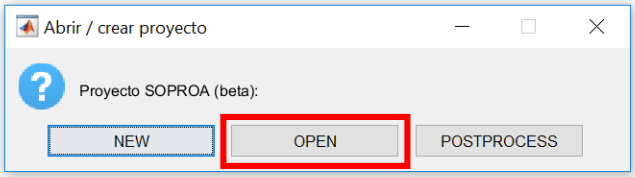


Figura 110: Sub-ventana para crear, abrir o post-procesar un proyecto.

Aparecerá la siguiente sub-ventana, en la que tendremos que seleccionar el fichero SOPROA.xls del proyecto, se cargaran entonces automáticamente la batimetría y las mallas que estuviesen en él guardado.

Se abre una hoja resumen del proyecto en la que aparecen los archivos que contiene cada una de las sub-carpetas.

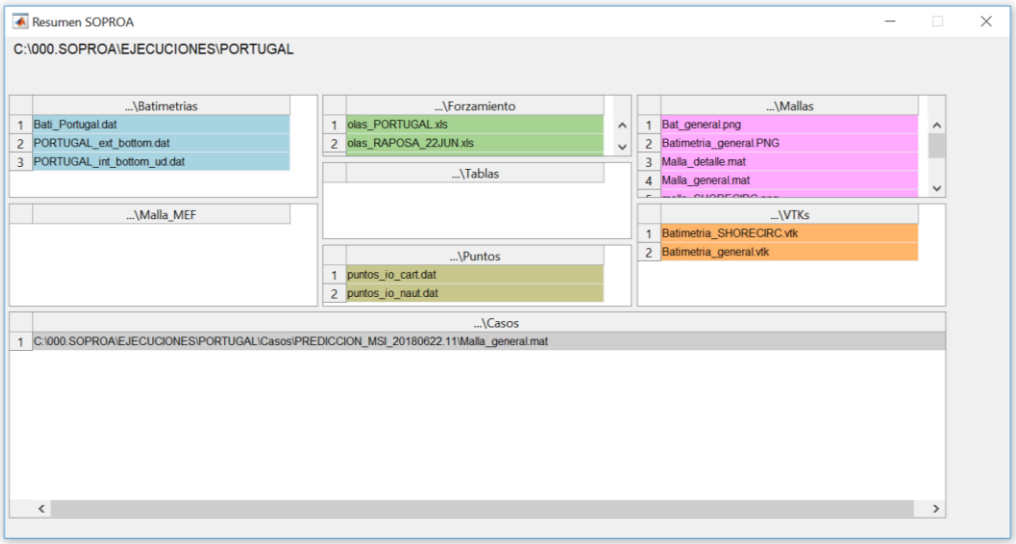


Figura 111: Hoja resumen del proyecto abierto.

Nota: la hoja resumen se puede abrir en todo momento, seleccionando el botón "Resumen" de la ventana general de la GUI.

Será necesario volver a cargar el xls de forzamiento si se quiere realizar la ejecución otra vez siguiendo las indicaciones del paso 5.

PASO 7: Realizar el post-proceso

Existen dos formas de acceder al post-proceso.

1. Desde la ventana general de la GUI presionando el botón "Post-proceso".

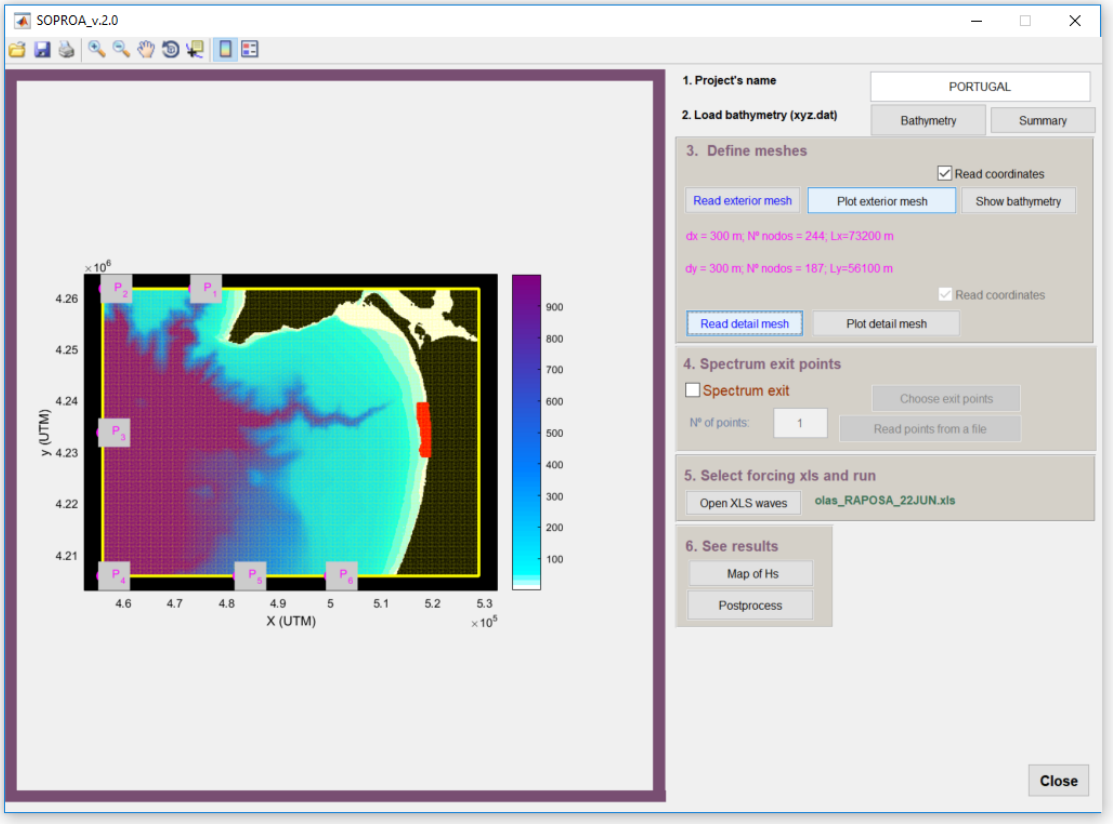


Figura 112: Ventana general de la GUI. Marcado el botón de post-proceso.

2. Al ejecutar el EXE, presionar botón "Post-proceso".

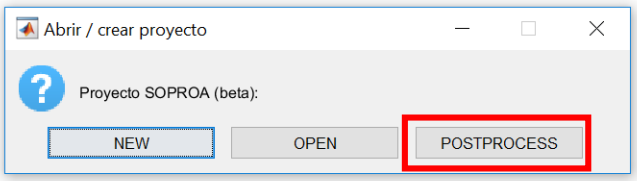


Figura 113: Sub-ventana para crear, abrir o post-procesar un proyecto.

Al acceder de cualquiera de las dos formas indicadas, se abre una nueva interfaz.

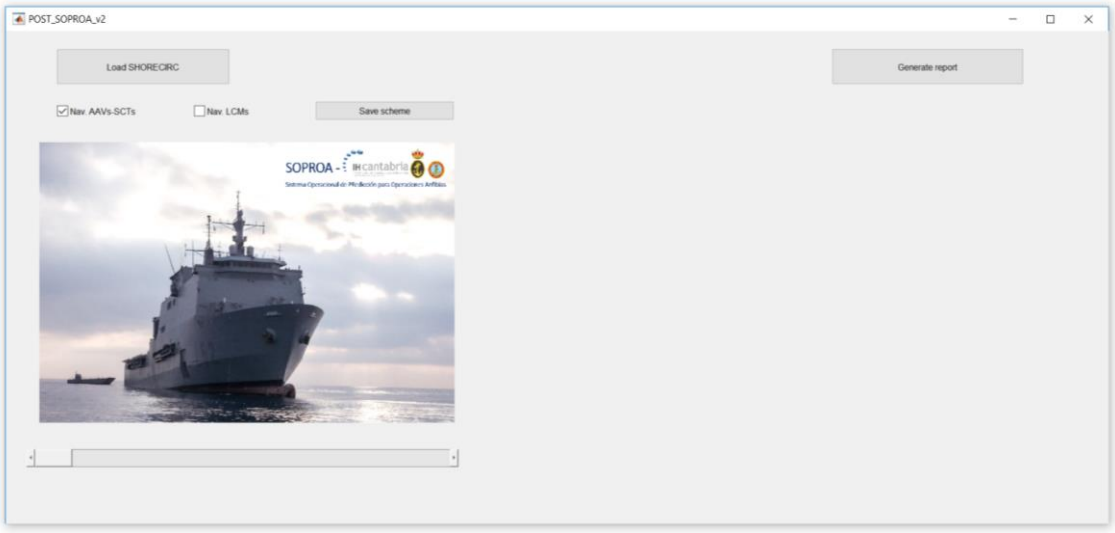


Figura 114: Ventana principal de la GUI de post-proceso.

Lo primero que hay que hacer es cargar los datos necesarios, para ello presionar el botón "Load SHORECIRC". Se abrirá una sub-ventana (ver figura 116) donde buscar y seleccionar el fichero llamado "SHORECIRC.mat", este que vivirá en la carpeta "Casos\PREDICCION_MSI_yyyymmdd.HH".

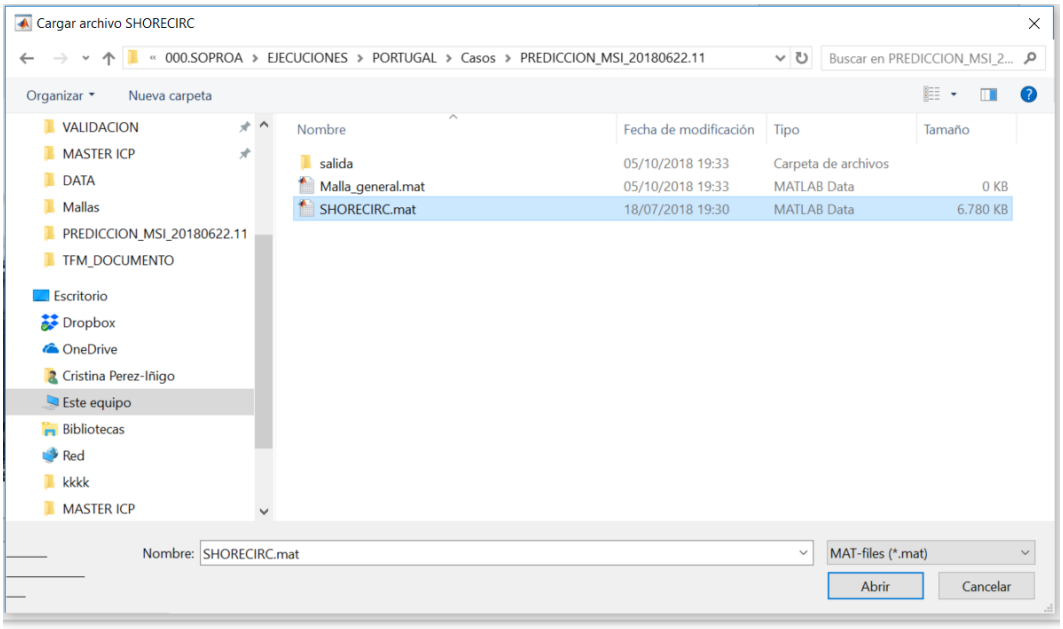


Figura 115: Seleccionar fichero "SHORECIRC.mat" .

El fichero "SHORECIRC.mat" contendrá los resultados numéricos obtenidos en la malla de detalle (variable tipo estructura, denominada "TOT", que contiene la siguiente información):

- TOT.xx = coordenadas X de los nodos de la malla de detalle.
- TOT.yy = coordenadas Y de los nodos de la malla de detalle.
- TOT.Bati = coordenada Z de los nodos de la malla de detalle.
- TOT.t = vector que contiene las horas de los estados de mar ejecutados.
- TOT.Hs = hipermatriz con el valor de la altura de ola en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.Tp = hipermatriz con el valor del periodo pico en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.MOD = hipermatriz con el valor del módulo de la corriente en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.Dir = hipermatriz con el valor de la dirección de incidencia de la ola en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.U = hipermatriz con el valor de la componente x de la corriente en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.V = hipermatriz con el valor de la componente y de la corriente en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.Uw = hipermatriz con el valor de la componente x del viento en cada nodo y en cada estado de mar.
- TOT.Vw = hipermatriz con el valor de la componente y del viento en cada nodo y en cada estado de mar.

Una vez seleccionado el fichero "SHORECIRC.mat" del proyecto que queramos post-procesar se abre una sub-ventana (ver figura 117), en la que se pueden introducir las coordenadas de hasta 10 puntos de interés para ver las tendencias de oleaje, cinco perfiles en los que se darán datos de navegabilidad y uno más para el perfil del MSI.

Por defecto vienen las coordenadas de 4 puntos y 2 perfiles que estarán repartidos por la malla general, si tampoco se introducen coordenadas para el perfil del MSI, este será por defecto el central.

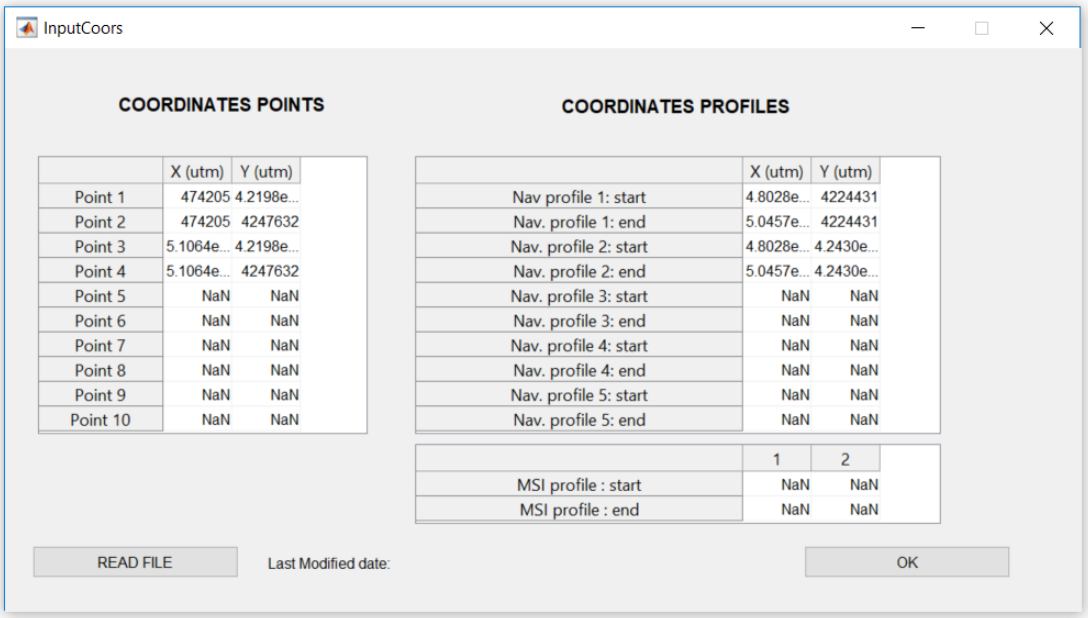


Figura 116: Ventana de introducción de puntos y perfiles.

Para introducir puntos y perfiles hay dos formas:

1. Directamente marcando la casilla y escribiendo la coordenada deseada.
2. Leyendo un fichero preexistente presionando el botón “Leer fichero”.

Para el post-proceso del caso de Portugal se introducirán las coordenadas de cinco puntos, de dos perfiles de navegabilidad y uno de MSI.

Una vez presionado el botón “OK”, se cerrará automáticamente la ventana y se guardará en la carpeta “Puntos” un archivo llamado “out.mat”, el cual contendrá las coordenadas que aparecían en la ventana justo antes de presionar “OK”.

Este archivo es el que podrá ser leído si ha sido previamente creado mediante la forma segunda que se indicaba anteriormente, presionando el botón “Leer fichero”.

En caso de abrir un proyecto que ya fue post-procesado, leerá automáticamente el fichero “out.mat”, proponiendo directamente los puntos y perfiles que se introdujeron la vez anterior.

A continuación, aparecerán tres imágenes en la interfaz general y 5 sub-ventanas, cada una de ellas con un subproducto distinto. A continuación, definimos cada una de ellas.

En la ventana principal de la interfaz, que se muestra arriba, aparecen tres productos, de izquierda a derecha, la batimetría general con los puntos y perfiles introducidos anteriormente y un recuadro negro que coincide con el contorno de la malla de detalle. El siguiente es el mapa de la viabilidad de la navegabilidad en la malla de detalle con la línea de rotura en negro y por último el mapa de MSI con el perfil introducido y la línea de rotura en magenta.

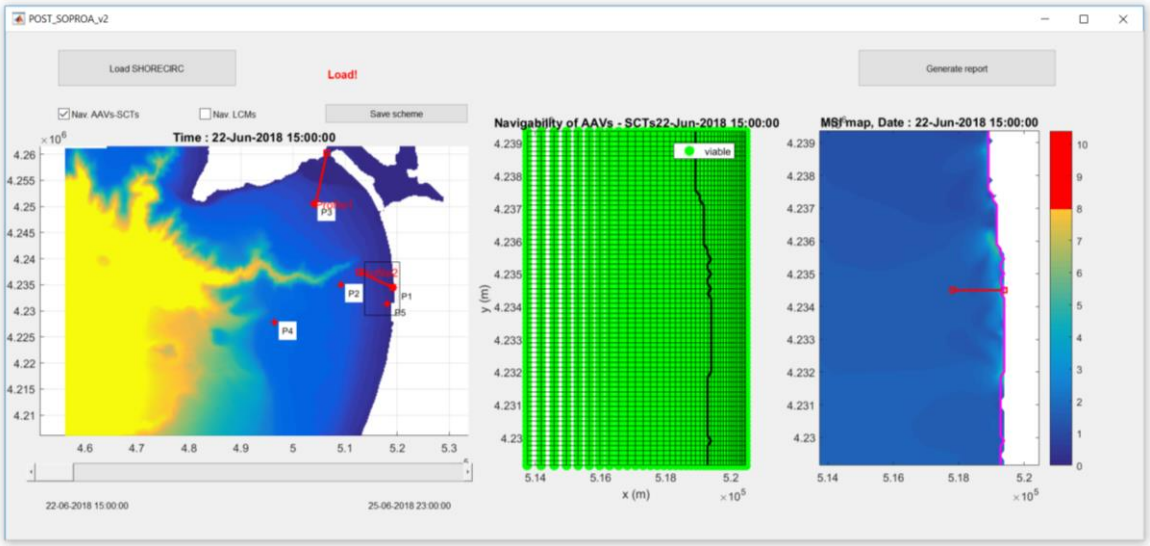


Figura 117: Ventana principal de la ventana de post-proceso una vez cargada.

En la figura 119, se muestra la sub-ventana con la información de la viabilidad en los perfiles de navegabilidad, así como su longitud.

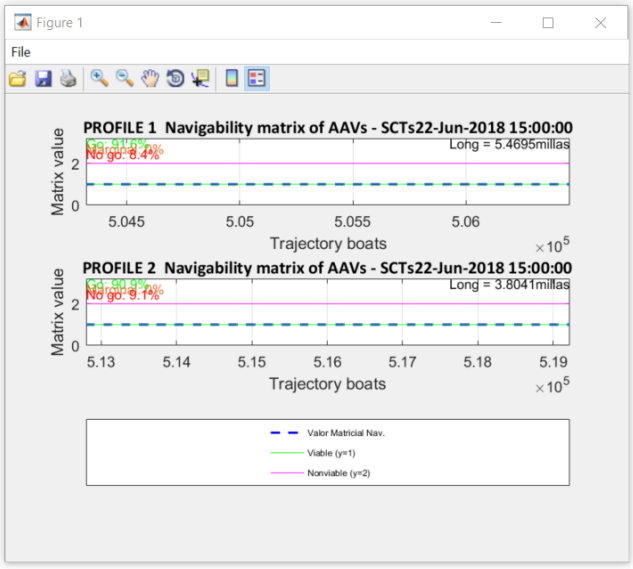


Figura 118: Viabilidad de la navegabilidad en los perfiles.

En la figura 120, se aporta información sobre la tendencia del oleaje en los puntos introducidos a lo largo de todos los estados de mar introducidos. Además, se indica mediante línea discontinua el instante con la altura de ola máxima y mínima, así como su valor.

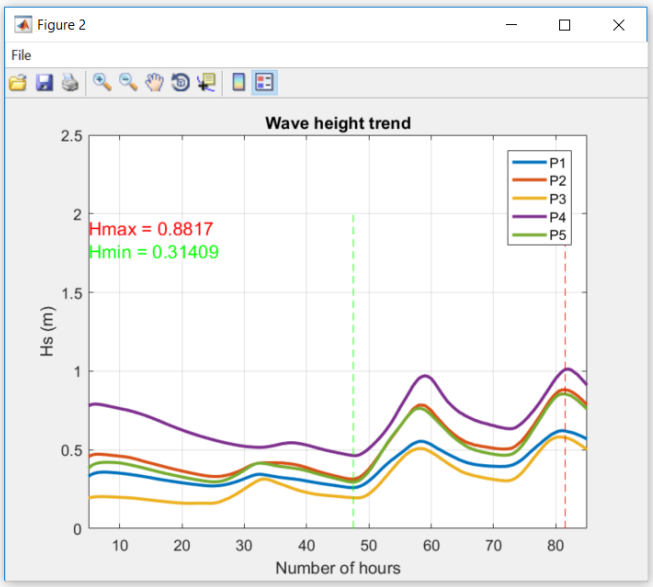


Figura 119: Tendencia del oleaje.

En la figura 121, se podrá ver el valor del MSI a lo largo del perfil que se ve en el mapa de MSI de la figura 118, indicando se límite operativo de 8 mediante la línea roja.

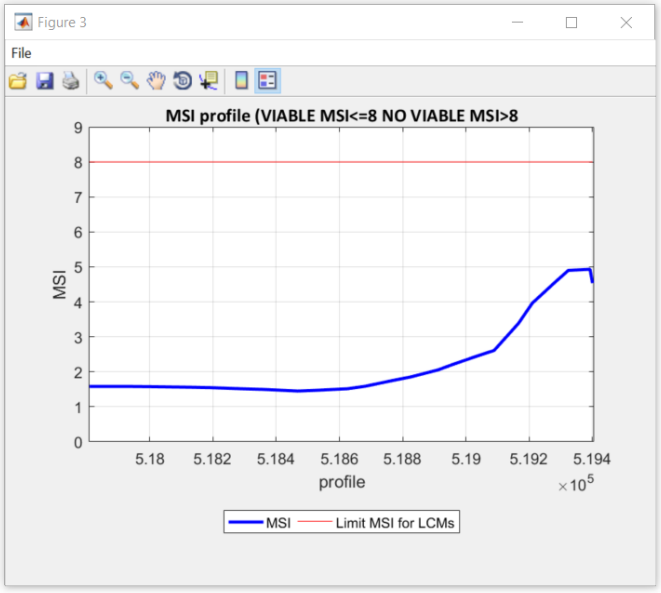


Figura 120: Perfil MSI.

La figura 122 es un mapa de la viabilidad de la varada y la línea de rotura como la que se podía ver en la figura 118.

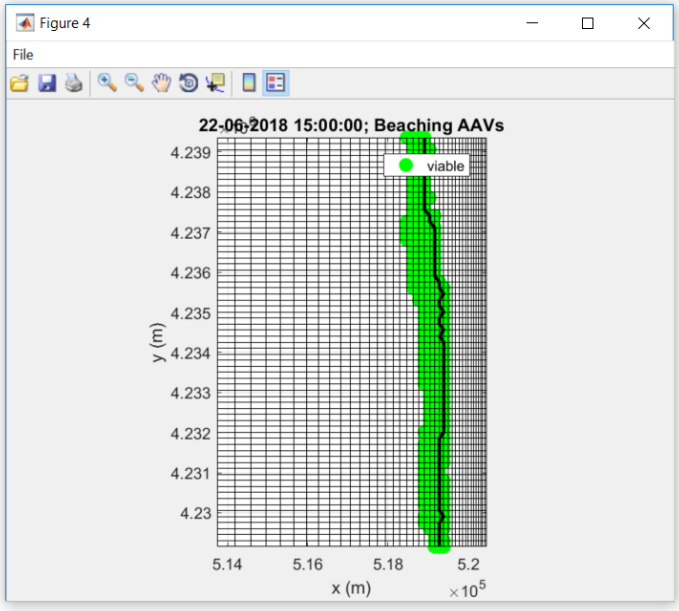


Figura 121: Mapa de varada.

Por último, en la figura 123 aparece la información de la tendencia del MSI. Esta información se dará de aquellos puntos introducidos que se encuentren dentro de la malla de detalle.

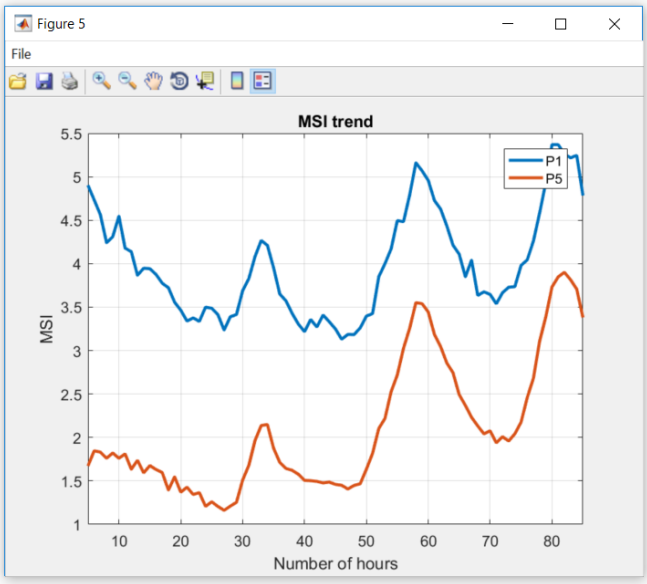


Figura 122: Tendencia MSI.

Las ventanas se pueden colocar en el lugar de la pantalla que sea más cómodo para el usuario.

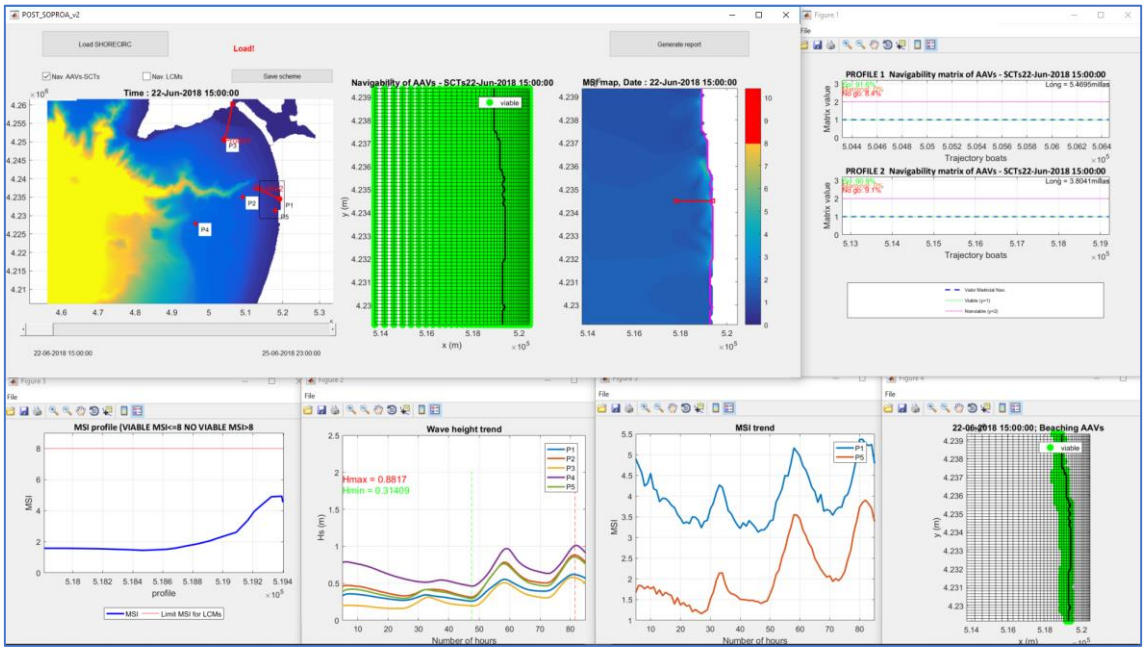


Figura 123: Captura de pantalla con todos los productos y la GUI principal.

Una vez abiertas todas, podremos interactuar con la interfaz de dos formas:

1. En tiempo: moviendo el slider (marcado en rojo en la figura 125) podremos ver los resultados del instante de tiempo que con él indiquemos.

2. En espacio: mediante el movimiento de los puntos y perfiles que se encuentran en la imagen de la malla general (recuadrados con línea roja discontinua en la figura 125) y en el mapa de MSI (indicado en la figura 125).

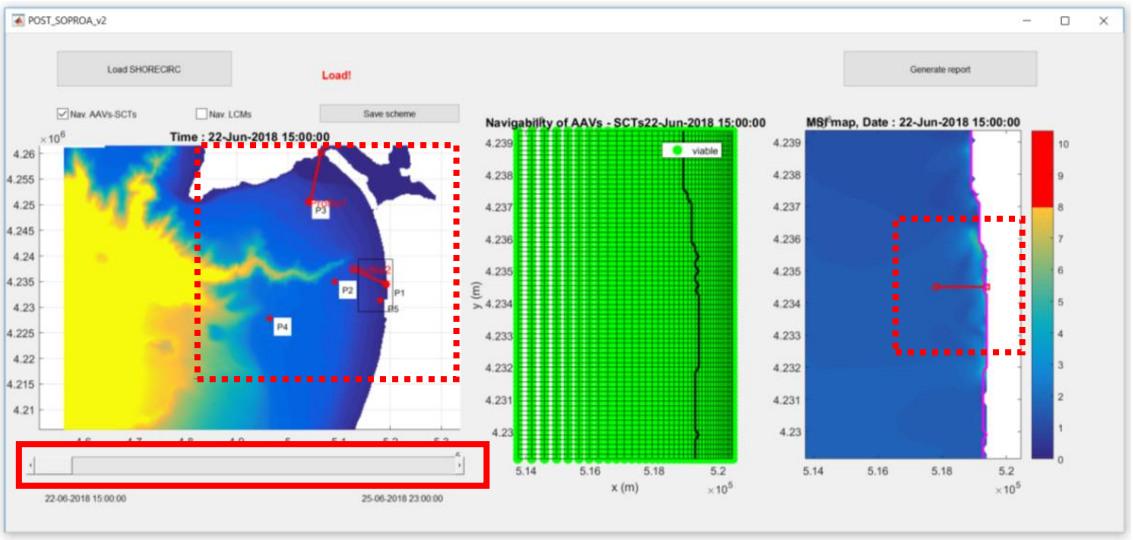


Figura 124: Formas de interactuar con la GUI.

En caso de mover los puntos y perfiles sobre la imagen y querer guardan esas localizaciones para que al volver a abrirlo estén ahí, es necesario presionar el botón "Guardar escenario". Automáticamente se reescribirá el fichero "out.mat" con las coordenadas actuales.

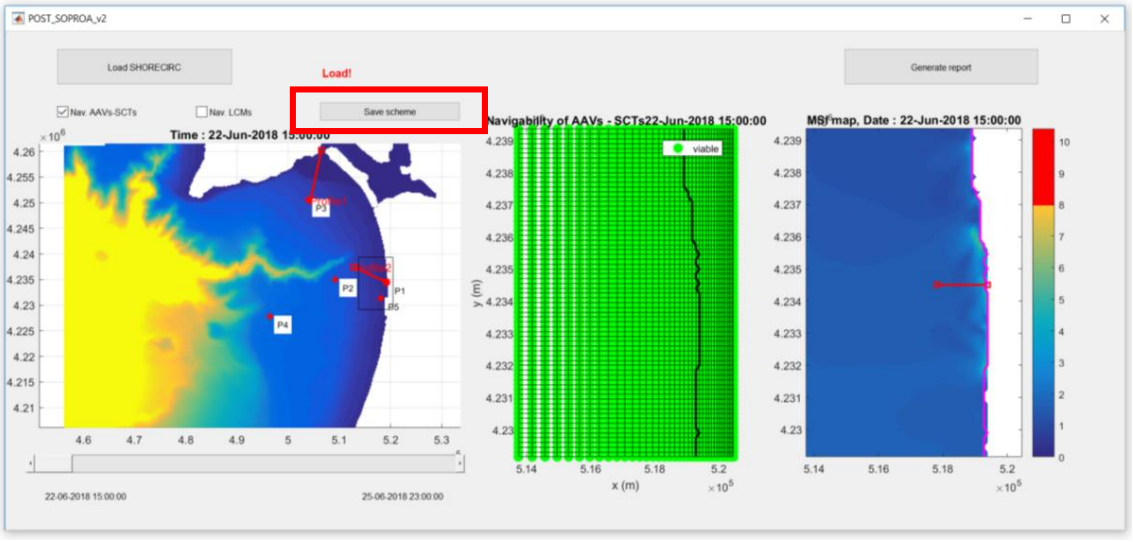


Figura 125: Ventana principal interfaz de post-proceso. Marcado el botón para guardar la localización de los puntos y perfiles.

Adicionalmente es posible obtener los productos para dos límites operativos que van en función del tipo de embarcación. Para ver unos u otros, marcar el recuadro que sea de interés.

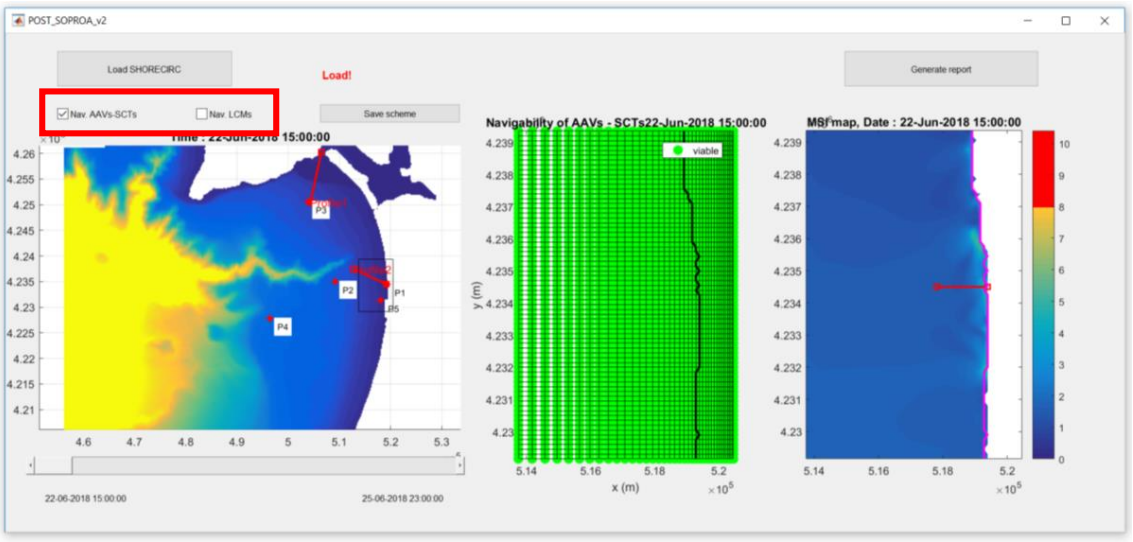


Figura 126: Ventana principal de la interfaz de post-proceso. Elección del tipo de embarcación.

PASO 8: Generar informe

Si se ha localizado un instante con sus perfiles y puntos de interés, existe la posibilidad de generar un informe en formato PDF, que contenga todos los productos, así como información adicional sobre la zona de rompientes y sobre los datos introducidos para la simulación. Se guardará automáticamente en la carpeta "Postproceso".

Para ello, presionar el botón "Generar informe", que aparece indicado en la figura 48.

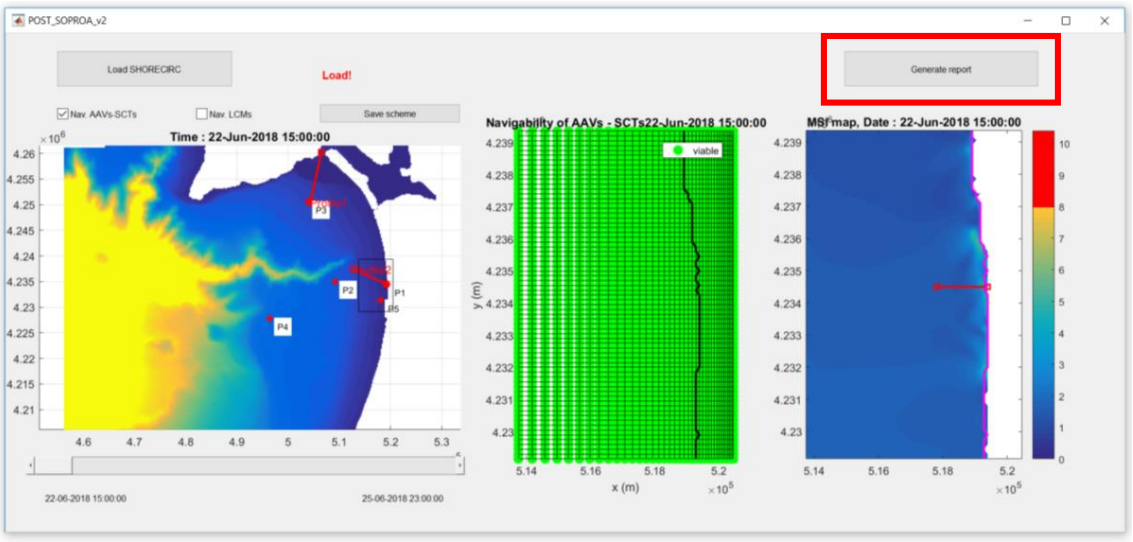


Figura 127: Ventana principal de la GUI de post-proceso. Remarcado el botón para generar un informe.

Automáticamente se creará una nueva carpeta dentro del proyecto junto con las que se mostraban en la figura 4. En ella se guardarán todas las imágenes y el PDF generado.
A continuación, se muestra un informe del caso ejemplo de Portugal.

FORECAST ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF PORTUGAL
TIME: 22/06/2018 15z to 25/06/2018 23z

1. INITIAL DATA

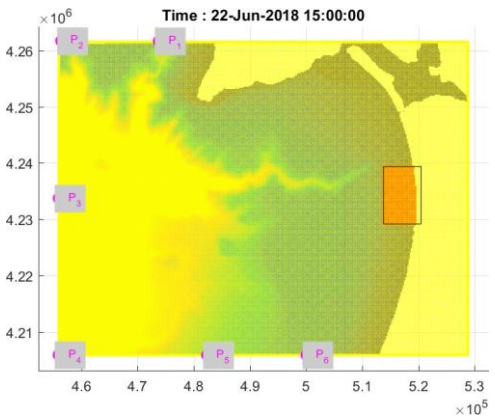
Geographical information:

Model:

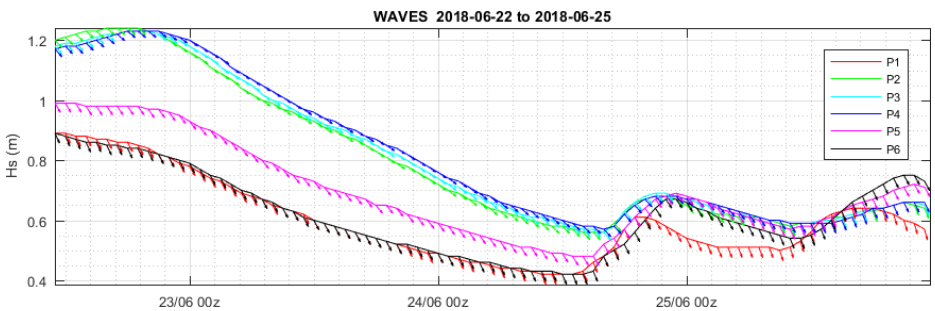
Wave source:

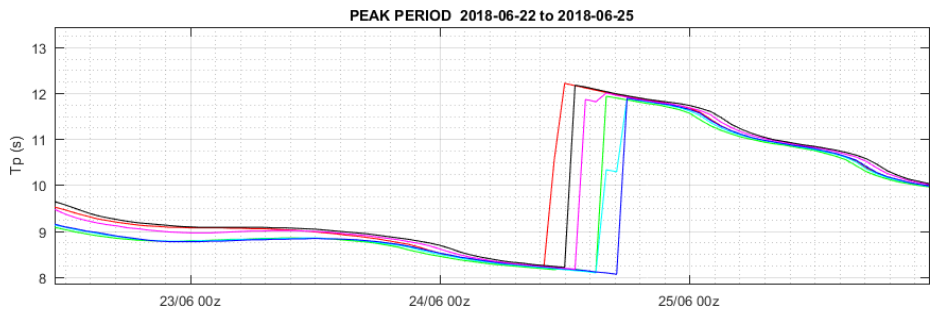
Wind source:

Number of force points: 6



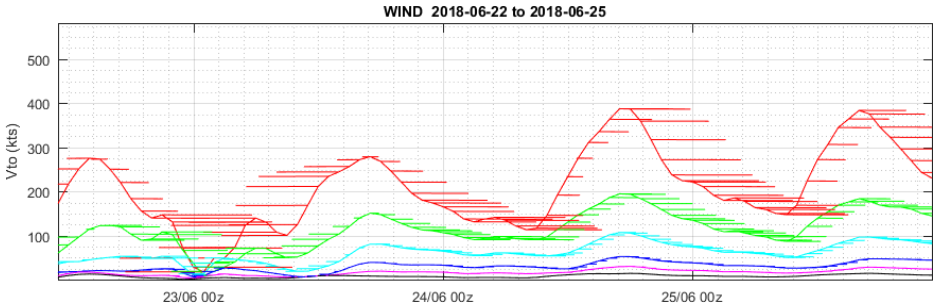
2. WAVE INFORMATION (P1-P6)





	Date	Wave height (m)	Period (s)	Direction (º)
Highest significant wave height	22/06/18 16	1.24	8.87	325.47
Minimum significant wave height	24/06/18 10	0.42	8.2	298.32
Average significant wave height	–	0.72682	9.6553	311.8617

3. WIND INFORMATION (P1-P6)

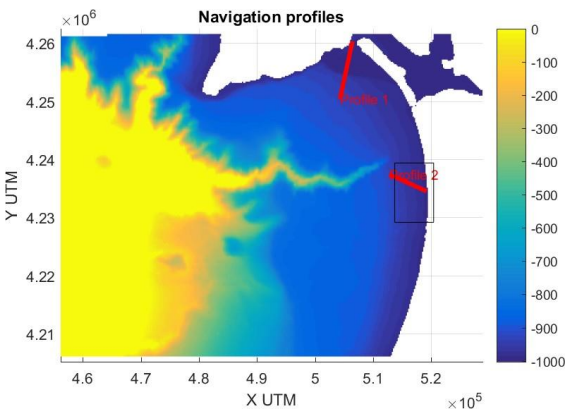


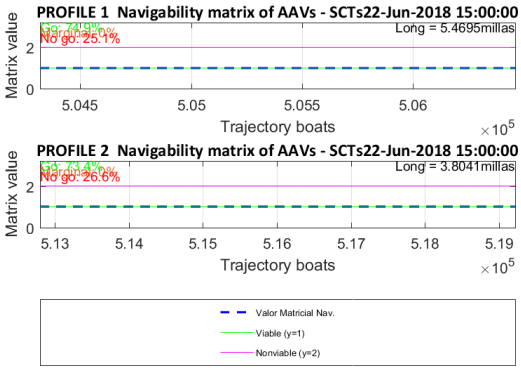
	Date	intensity (kts)	Direction (º)
Maximum intensity wind	24/06/18 18z	15.5715	310.8081
Minimum intensity wind	23/06/18 01z	0.64912	218.4579
Average intensity wind	–	30.1717	283.0131

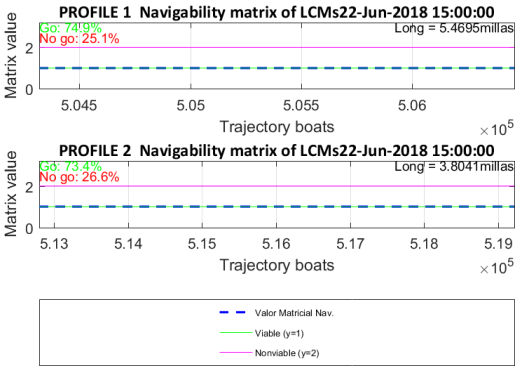
NAVIGABILITY

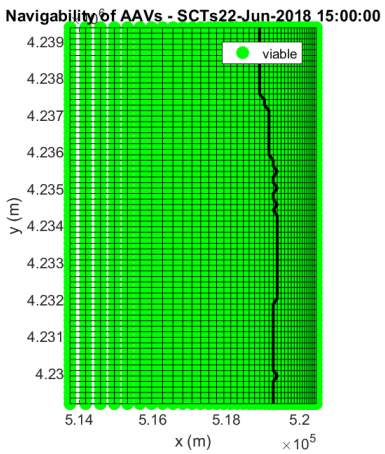
1. NAVIGABILITY

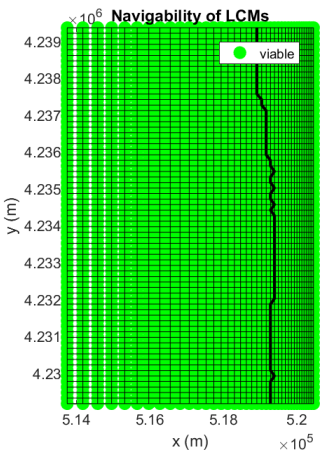
Coordinates Profiles
Start(X utm, Y utm), end(X utm, Y utm)
Profile 1:504320,4250400;506460,4260300
Profile 2:512800,4237400;519220,4234500



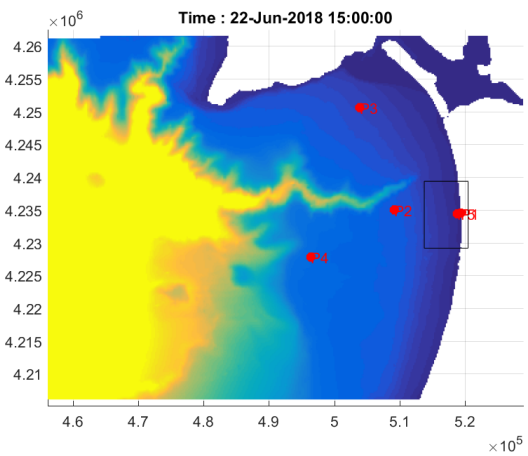


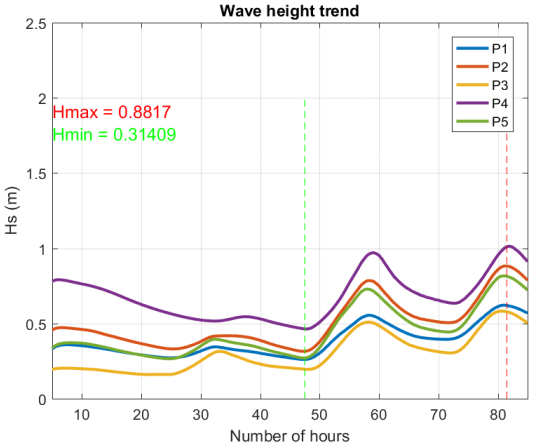






2. TENDENCIES





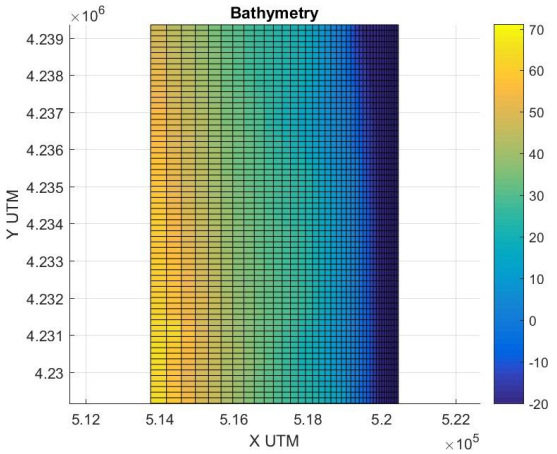
PROFILE INFORMATION

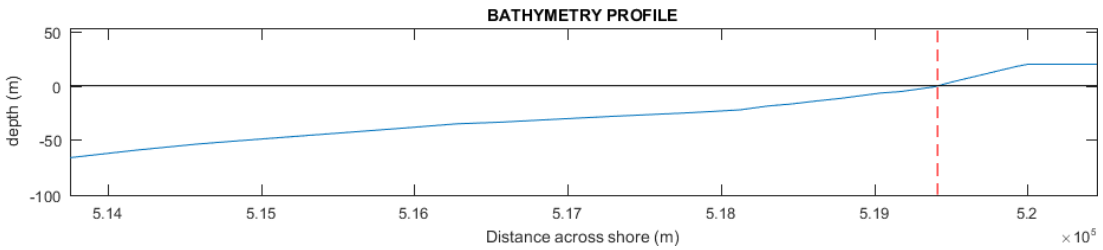
Slope:0.010984

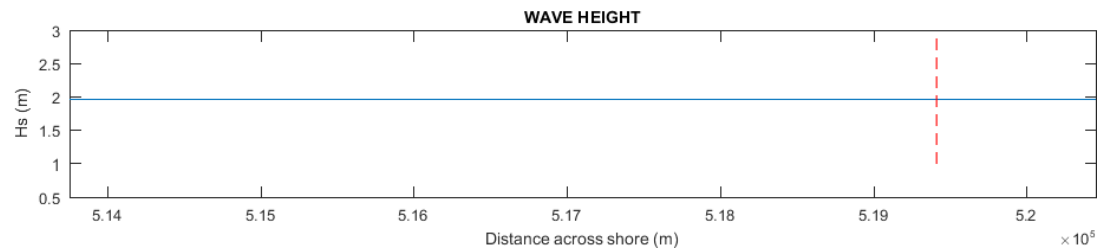
Maximum wave height: 0.38862m
Medium wave height: 0.3145m
Breaker type: Spilling

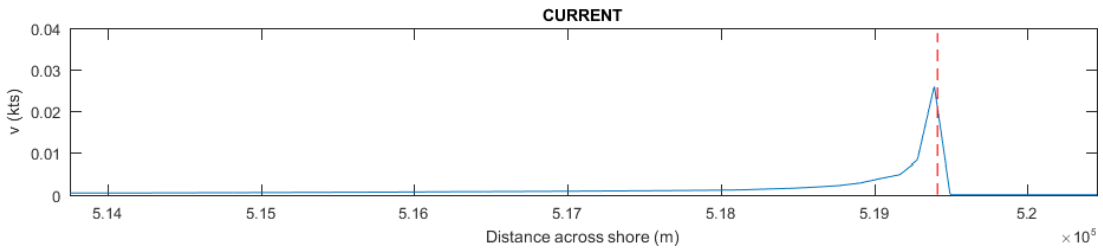
Maximum currents speed: 1.4473kts
Medium currents speed: 0.10034kts

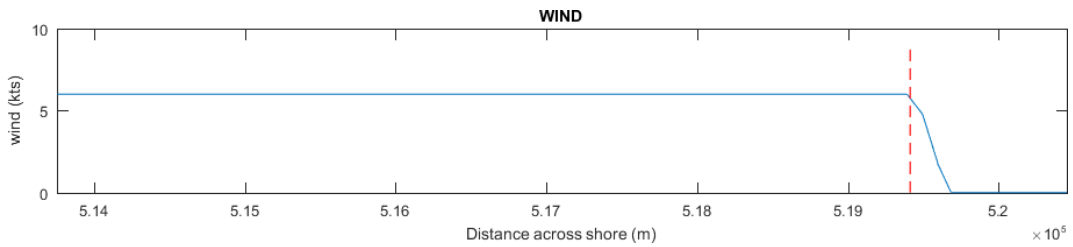
Maximum wind speed: 12.278kts
Medium wind speed: 10.6245kts





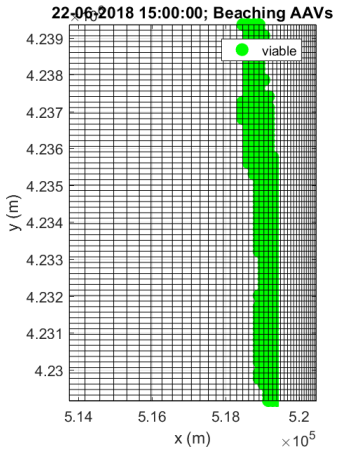


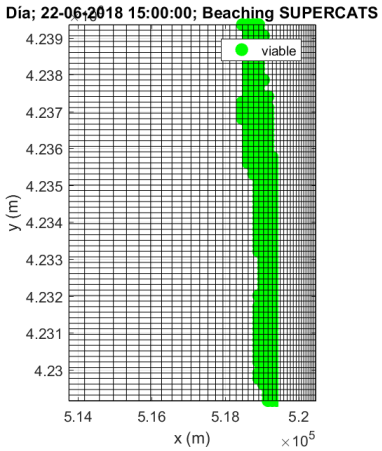




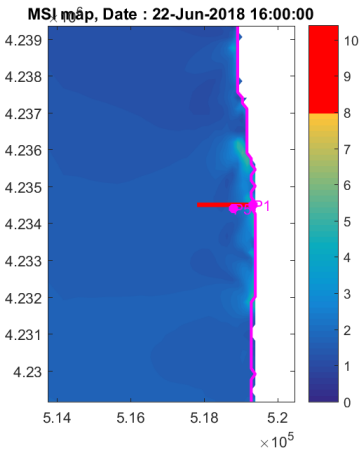
WAVE FORECAST INFORMATION AOA

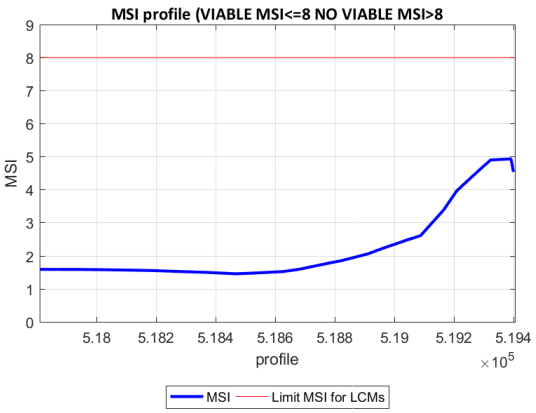
BEACHING

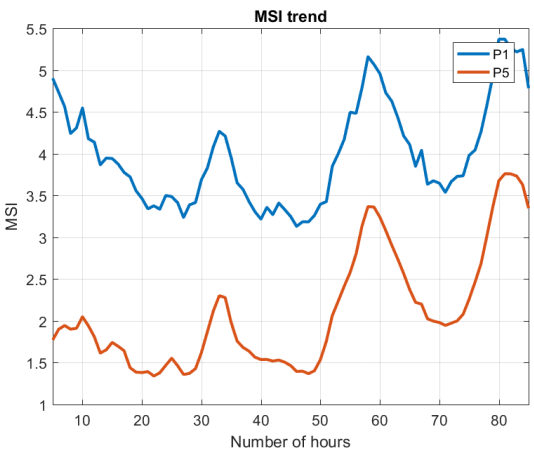




MSI







SURF ZONE PARAMETERS

- Tendencies (period 22-Jun-2018 15:00:00z to 25-Jun-2018 23:00:00z)

Wide HZR(m): 149.9806

Length HZR(m): 10200

Breaker type:

Plunging	1.163%
Surging	0%
Spilling	98.837%

Wave parameters:

Hsbmax(m): 0.76324	Hsbmin(m): 0.0081732	Hsb(m)(mean): 0.38577
Tpzmax(s): 10.9852	Tpmin(s): 2.5297	Tp(s)(mean): 7.8055
Angle(max): 10.9852	Angle(min): 2.5297	Angle(mean): 7.8055
LSCmax(m/s): 0	LSCmin(m/s): 0	LSC(m/s)(mean): 0

- Outputs at 22-Jun-2018 15:00:00z

Wide HZR(m): 152.4613

Length HZR(m): 10200

Breaker type:

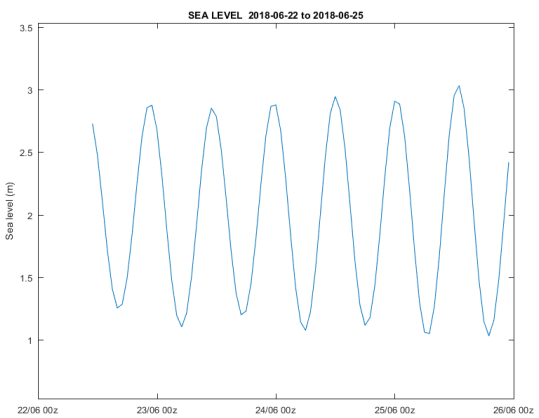
Plunging	1.4493%
Surging	0%
Spilling	98.5507%

Wave parameters:

Hsbmax(m): 0.38861	Hsbmin(m): 0.013625	Hsb(m)(mean): 0.30376
Tpzmax(s): 8.685	Tpmin(s): 8.685	Tp(s)(mean): 8.685
Angle(max): -8.4837	Angle(min): -10.9958	Angle(mean): -9.4541
LSCmax(m/s): 0	LSCmin(m/s): 0	LSC(m/s)(mean): 0

SEA LEVEL

DATE	TIME	HEIGHT(m)	H/L
22/06/18	16	1.2542	L
22/06/18	23	2.8748	H
23/06/18	05	1.1032	L
23/06/18	11	2.8504	H
23/06/18	17	1.2005	L
24/06/18	00	2.8776	H
24/06/18	06	1.0763	L
24/06/18	12	2.9436	H
24/06/18	18	1.1166	L
25/06/18	00	2.9072	H
25/06/18	07	1.0509	L
25/06/18	13	3.0304	H
25/06/18	19	1.0323	L



COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Durante las maniobras de la Armada Española en Portugal, se recaudaron datos de las condiciones meteo-oceánicas y de la variable MSI obtenida. Esto se hizo de dos maneras, por un lado, el GNP durante los acercamientos a costa. La forma de obtener los datos es visual, excepto la corriente en la que una persona metida en mitad de la playa con el agua hasta el pecho, un cronómetro y una botella con la que miden la velocidad a la que se mueve.

Por otro lado, los valores obtenidos por el IHM, mediante códigos MATLAB que han sido usados como base para el sistema actual SOPROA (versión preliminar del sistema).

La forma usada para la comparación consiste en el estudio de un perfil de la playa, que se muestra en rojo en la figura 129.Es un perfil de apenas 600 metros. En él se obtiene el punto de máxima corriente y para ese punto e instante la altura de ola, periodo, MSI. Adicionalmente, se compararán los valores de cada uno de los coeficientes de los que se compone el MSI.

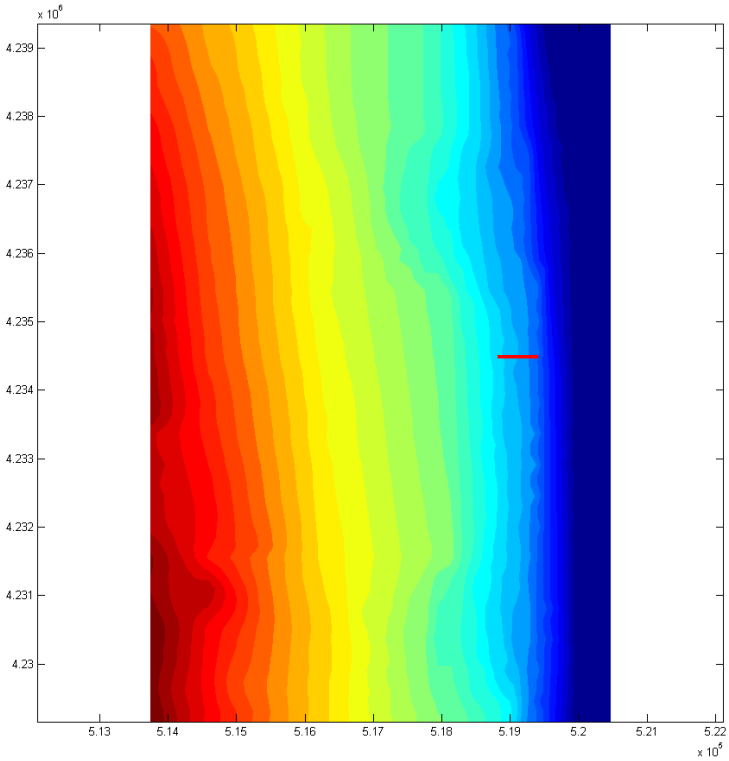
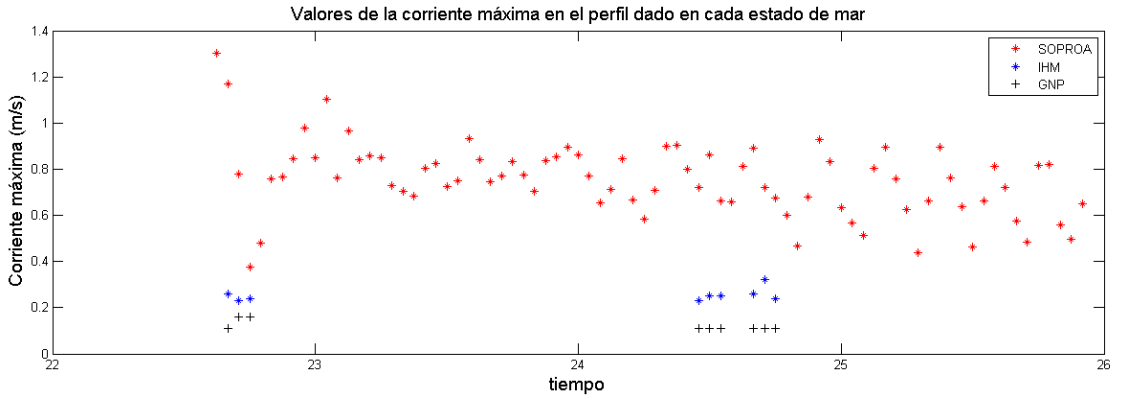
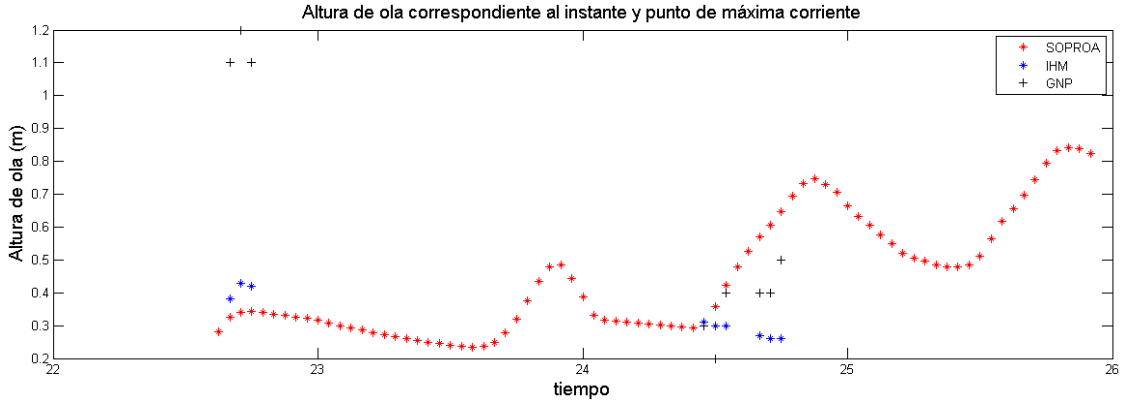
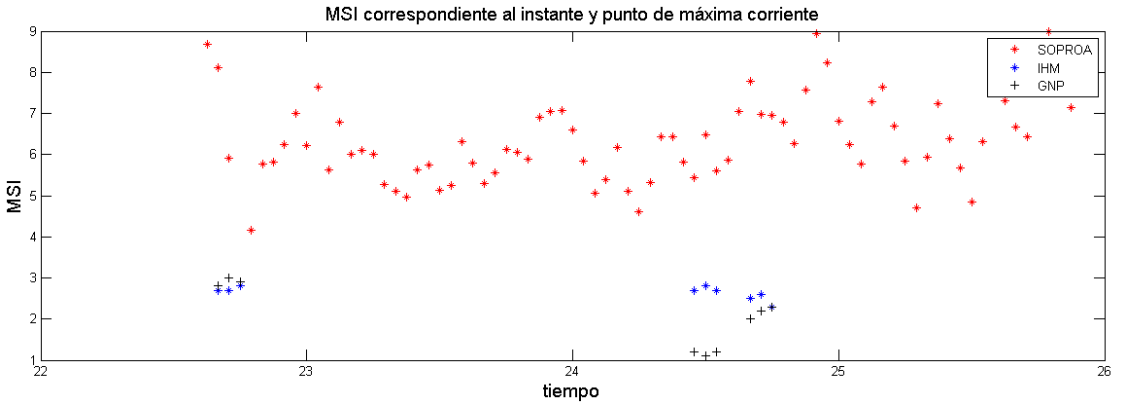


Figura 128: Batimetría de detalle y línea roja que indica perfil de estudio.

A continuación, se presentan las comparativas entre el SOPROA, GNP y el IHM. Primeramente, como se comentaba anteriormente, el valor de la corriente máxima para cada instante horario. Tanto del GNP, como del IHM, se tienen para estos días 6 valores. También es importante tener en cuenta que los del GNP son valores en el instante concreto, los del IHM son obtenidos con ejecuciones diarias y los del SOPROA predictivos, ejecutados el día 22 de julio, y hasta el 25 incluidos en la misma ejecución. En el eje y se tiene el valor obtenido y en el x el día.







Como puede verse, las corrientes máximas obtenidas por el SOPROA están entorno a los 0.8 m/s, a diferencia de las obtenidas por el GNP y el IHM de 0.2 y 0.3 m/s. La altura de ola, en cambio, si se corresponde bastante bien. Esto hace que, aunque la altura de ola es el coeficiente más importante para la obtención del MSI por ser un valor directo, en cuanto la corriente alcanza valores cercanos a los de la altura de ola, su influencia en el MSI aumenta mucho ya que su valor en nudos es multiplicado por 3.

Es por ello que en la gráfica comparativa del MSI, el valor del MSI obtenido por el SOPROA es mucho mayor.

Ahora se entrará en la comparación de cada uno de los coeficientes de los que se compone el MSI, para justificar lo afirmado anteriormente. Después se llevará a cabo una explicación del porqué de estas diferencias en los resultados.

Coeficientes MSI:

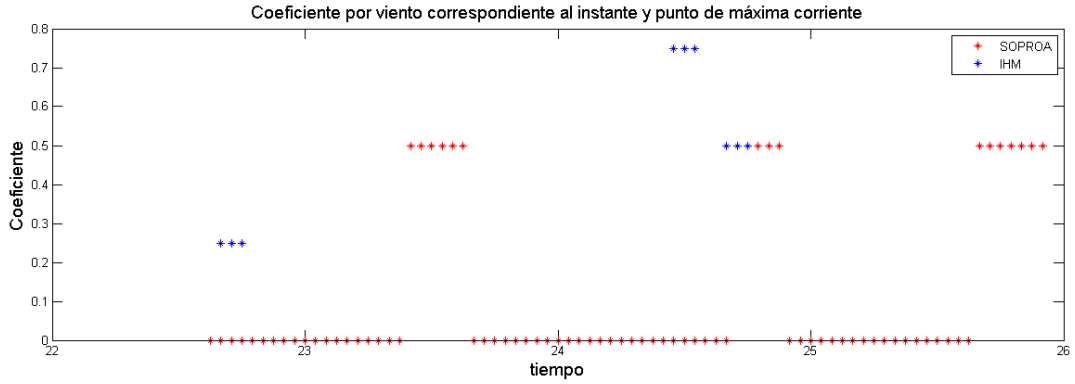


Figura 129: Comparación coeficiente por viento del MSI.

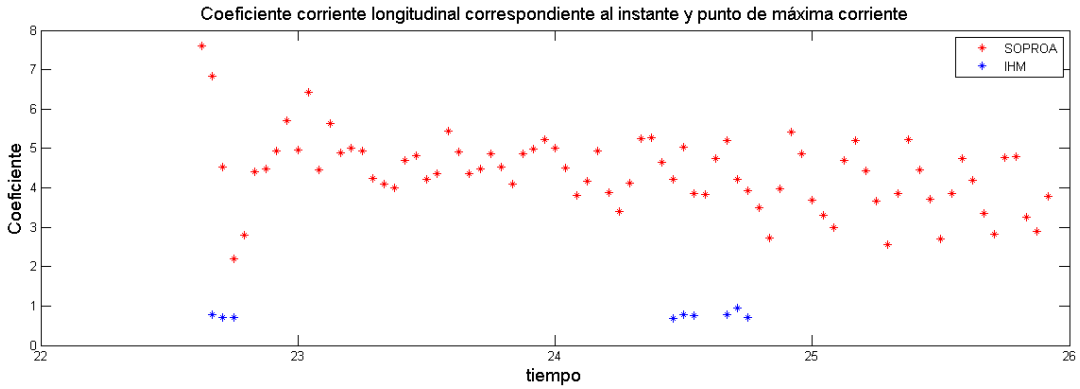


Figura 130: Comparación coeficiente por corriente del MSI.

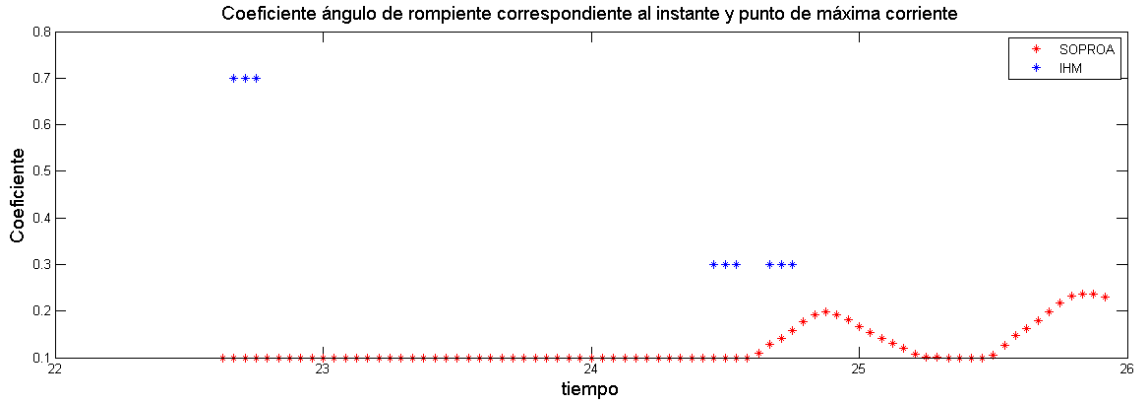


Figura 131: Comparación coeficiente ángulo de rompiente del MSI.

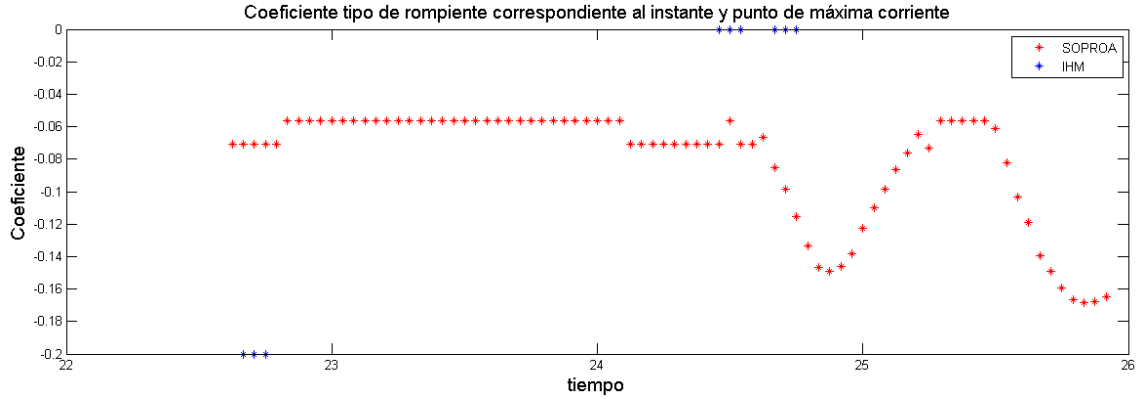


Figura 132: : Comparación coeficiente tipo de rompiente del MSI.

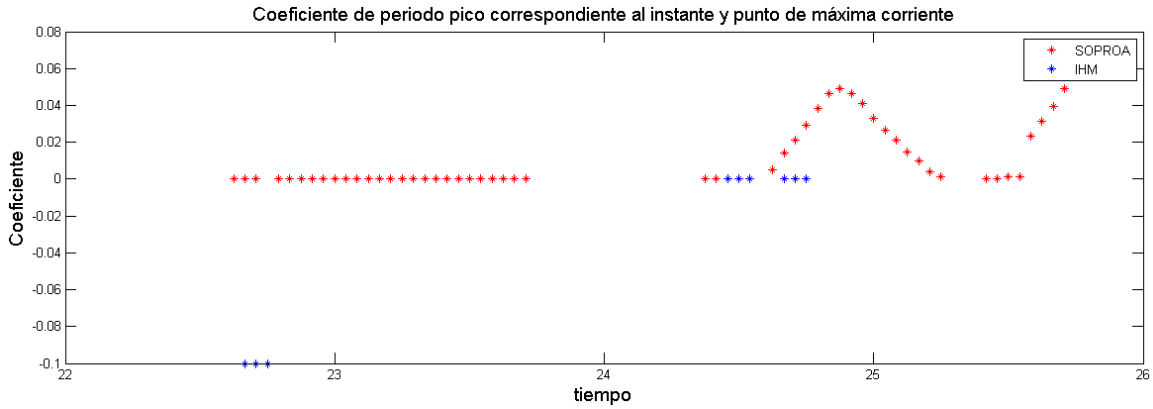


Figura 133: Comparación coeficiente por periodo pico del MSI.

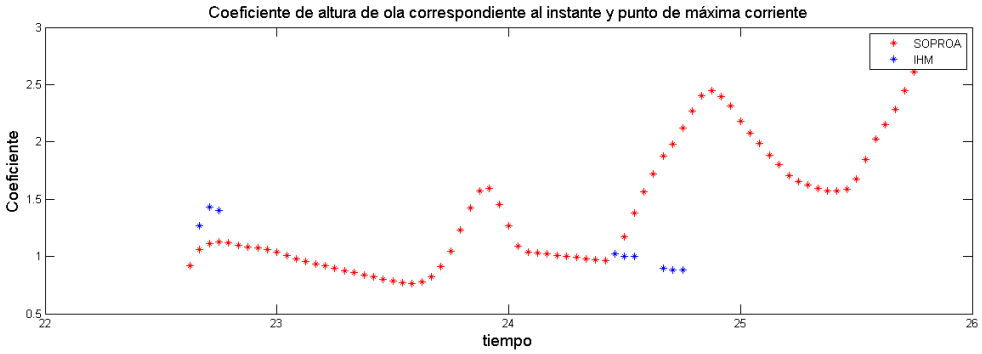


Figura 134: Comparación coeficiente altura de ola del MSI.

Como ya se comentaba, en estos gráficos puede verse que el que aporta un mayor valor al MSI en este caso es el debido a la corriente, que es el que supone la diferencia de resultados.

En la siguiente figura se muestra el valor del MSI, restando el valor del coeficiente debido a las corrientes. Podemos ver que el ajuste es mucho mejor.

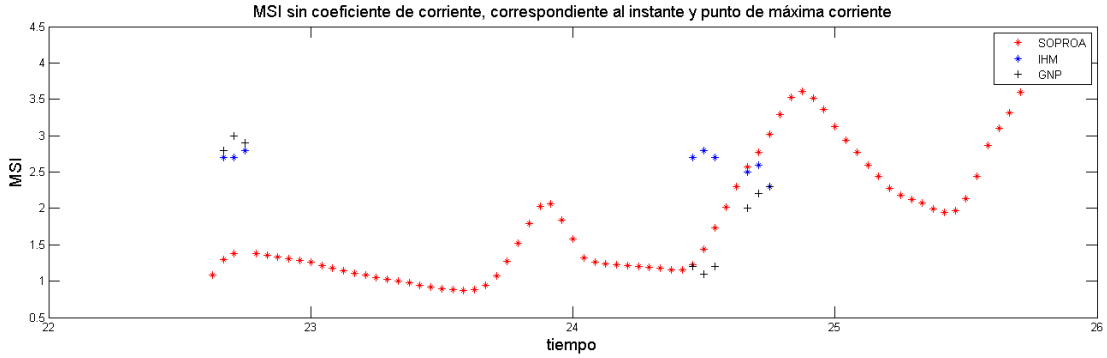


Figura 135: Comparación MSI sin tener en cuenta el coeficiente de corriente.

Por tanto, se concluye que la diferencia reside en las corrientes obtenidas por el modelo. La justificación de esta diferencia reside en dos puntos distintos. Por un lado, la batimetría de detalle usada no tiene la calidad necesaria, ya que como se ve en la figura 137, hay zonas con cortes y picos que no se corresponden con la realidad. Se han marcado sobre ella zonas irregulares mediante círculos negros.

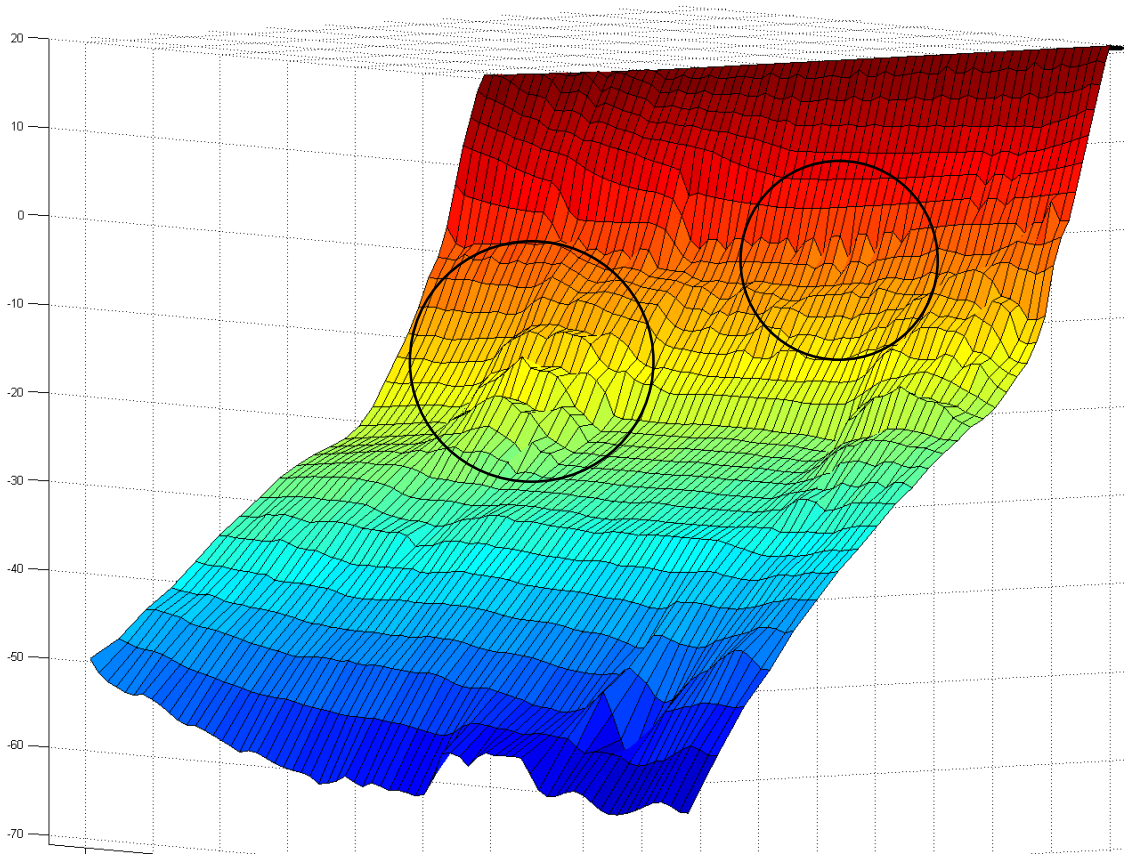


Figura 136: Batimetría de detalle. Marcado con círculos las irregularidades de la misma.

Al comparar la batimetría de detalle con los mapas de corrientes que se obtuvieron de la ejecución se pudo comprobar que los picos de corriente corresponden a esas zonas.

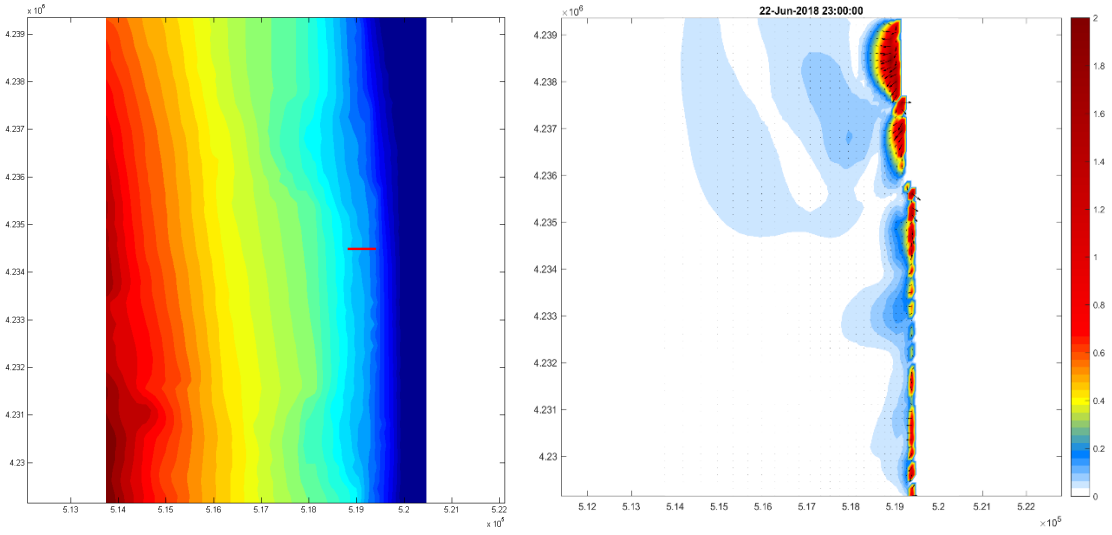


Figura 137: Comparación de la batimetría vista en planta y las corrientes.

Pintando las líneas batimétricas sobre el mapa de corrientes, vemos que coinciden esas corrientes con las zonas de poca definición, por lo que no se corresponden con la realidad.

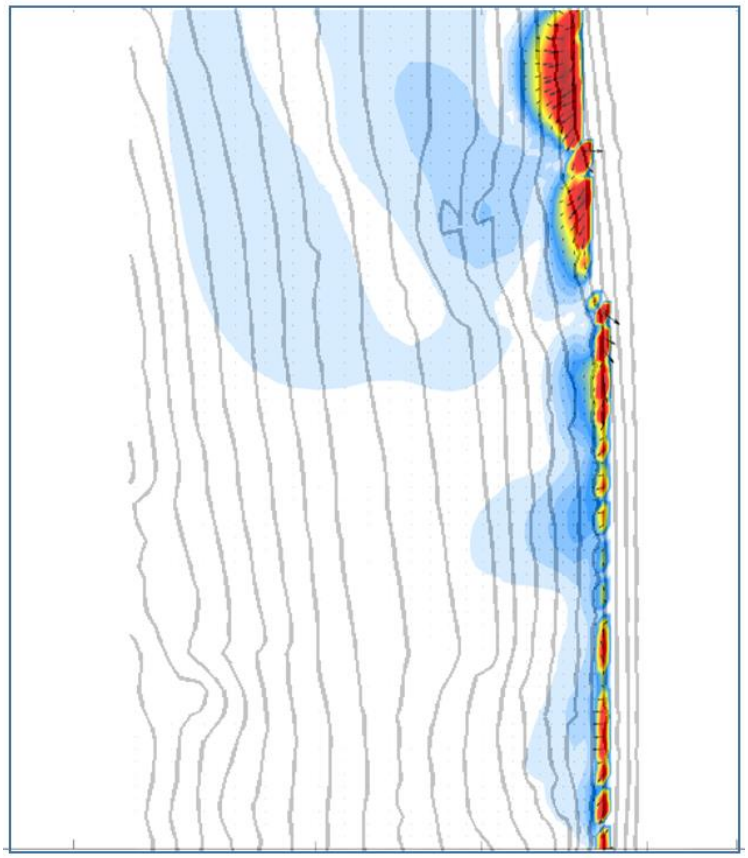


Figura 138: Superposición de la batimetría al mapa de corrientes.

Esto justifica la diferencia con los resultados obtenidos por el GNP. La diferencia con los del IHM no es justificable con la batimetría, ya que se ha usado la misma y los códigos, aunque ligeramente distintos, dan resultados muy parecidos.

La diferencia obtenida en las corrientes es debida a la malla de detalle usada. En el SOPROA la malla es más fina con respecto a la del IHM, es decir, tiene mayor resolución, esto hace que sea más sensible a las irregularidades de la batimetría y obtenga las corrientes pico en esas zonas.

Adicionalmente, las mediciones de corriente in situ se deben considerar aproximadas, pero no del todo realistas, debido a la técnica artesanal de medición y la no coincidencia entre los puntos de medición en campo con las zonas reales de máximas corrientes.