



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

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Validación y valoración técnica
inter-modelos para el apoyo al
desembarco anfibio en la playa del
Retín, Cádiz*

Trabajo realizado por:

José Cielo Fernández Caballero

Dirigido por:

Gabriel Díaz Hernández

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería Costera y Portuaria**

Santander, septiembre de 2020

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Índice

Resumen.....	4
Abstract.....	6
1 Introducción.....	7
1.1 Oleaje y corrientes: importancia en las operaciones anfibias.....	7
1.1.1 Definición y características de las operaciones anfibias.....	7
1.1.2 Modified Surf Index (MSI).....	8
1.2 Sistemas operacionales para el desembarco.....	9
1.2.1 SURF 3.2.....	9
1.2.2 SWANSURF.....	10
1.2.3 Delft3D-SURF.....	10
1.2.4 SurfZoneView.....	11
1.2.5 SOPROA.....	11
1.3 El proyecto SIAAMETOC-OM.....	11
2 Objetivos.....	13
3 Descripción técnica de las herramientas numéricas.....	14
3.1 OLUCA+COPLA.....	14
3.1.1 OLUCA.....	14
3.1.2 COPLA.....	15
3.2 SWAN+SHORECIRC.....	16
3.2.1 SWAN.....	16
3.2.2 SHORECIRC.....	17
3.3 SWASH.....	18
4 Resumen de las campañas de medición.....	20
4.1 Playa del Retén, Cádiz.....	20
4.2 Descripción de correntímetros.....	22
4.2.1 Correntímetro AWAC.....	22
4.2.2 Dentro de la zona de rompientes.....	22
4.2.3 Posicionamiento de los correntímetros.....	23
4.3 Análisis de la primera campaña.....	24
4.3.1 Fuera de la zona de rompientes.....	24
4.3.2 Dentro de la zona de rompientes.....	27
4.3.3 Conclusiones de la primera campaña.....	31
4.4 Análisis de la segunda campaña.....	31
4.4.1 Fuera de la zona de rompientes.....	31
4.4.2 Dentro de la zona de rompientes.....	33
4.4.3 Conclusiones de la segunda campaña.....	35
5 Montaje de las herramientas numéricas.....	36
5.1 Acople topo-batimétrico.....	36
5.2 OLUCA+COPLA.....	37
5.3 SWAN+SHORECIRC.....	38
5.4 SWASH.....	40
5.5 Forzamiento.....	41
5.5.1 Nivel del mar.....	41
5.5.2 Oleaje.....	42
6 Primera verificación: Resultados de modelación de la primera campaña.....	45
6.1 OLUCA+COPLA.....	45
6.1.1 Correlación de valores y análisis de sensibilidad.....	45

6.1.2	Análisis de procesos	47
6.2	SWAN+SHORECIRC.	50
6.2.1	Correlación de valores.....	50
6.2.2	Análisis de procesos.....	51
6.3	SWASH.	53
6.3.1	Correlación de valores.....	53
6.3.2	Análisis de procesos.....	54
7	Segunda verificación: Resultados de la segunda campaña.....	56
7.1	OLUCA+COPLA.	56
7.2	SWAN+SHORECIRC.	56
7.3	SWASH.	58
8	Cálculo y comparación de MSI.	60
8.1	Parámetros relevantes y obtención del MSI.	60
8.2	Resultados de MSI.....	61
8.2.1	Primera campaña.....	61
8.2.2	Segunda campaña.....	63
9	Hipótesis de origen de incongruencias.	66
9.1	Origen de los datos de forzamiento.....	66
9.2	Resolución de las mallas de detalle.	68
9.3	Batimetría no representativa.....	69
10	Conclusiones y futuras líneas de trabajo.....	70
11	Bibliografía.....	72

Resumen

Una operación anfibia consiste en una maniobra militar en la que se lanza un ataque desde el mar hasta una costa hostil o potencialmente hostil. La complejidad del comportamiento hidrodinámico en la zona de rompientes puede llegar a provocar que estas actividades no sean efectivas. Por lo tanto, es necesario, en este tipo de estrategias, conocer con antelación y fiabilidad la magnitud de los procesos que pueden afectar al desembarco (H_{sb} , T_b , I_r_b , α_b y corrientes), cuantificando la viabilidad de la maniobra mediante el *Modified Surf Index* (MSI). Con esta premisa, se han desarrollado varios sistemas operacionales de predicción de dichas variables en el ámbito militar, a partir de diferentes herramientas de simulación numérica (SURF, SWANSURF, etc.)

El objetivo de este trabajo consiste en comprobar la validez de tres herramientas para su uso en este campo. Se han utilizado los modelos acoplados OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC y de forma individual el modelo hidrodinámico SWASH. Para realizar la validación, se cuenta con los datos de oleaje y corriente medidos durante dos campañas en la playa del Retén, en Cádiz.

De forma general, los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas no han sido completamente satisfactorios. En cuanto a las validaciones con OLUCA+COPLA y con SWAN+SHORECIRC, el oleaje muestra correlaciones aceptables en la zona de rompientes ($R^2 > 0.5$ en todos los casos), siendo SWAN+SHORECIRC la que ha mostrado R^2 por encima de 0.7 en ambas campañas. No obstante, se observa una clara sobreestimación de los resultados durante las pleamares, aunque, en las bajamares, los valores son muy semejantes. En cuanto a las corrientes, no se ha encontrado ninguna correlación entre los datos medidos y los simulados. Por separado, el montaje realizado con SWASH no ha conseguido simular todos los casos de propagación seleccionados debido a las inestabilidades que presenta. La correlación obtenida es de $R^2 > 0.5$ en la zona de rompientes, pero se observa una subestimación generalizada.

Se ha hipotetizado sobre el origen de las incongruencias detectadas entre las propagaciones y las medidas. Aunque este aún no se ha comprobado, se cree que la opción más probable es que la batimetría no sea representativa de la zona de estudio en los momentos de las campañas, ya que se han descartado las otras dos hipótesis propuestas.

Más allá de los resultados, se ha comprobado que OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC son dos herramientas que permiten calcular MSI y así poder servir de ayuda durante las maniobras de desembarco anfibia. En cuanto a SWASH, dicho modelo no proporciona resultados de la dirección del oleaje, que se ha demostrado en este trabajo que es una variable con una gran importancia. Por este motivo, se ha descartado este modelo para su uso en este tipo de aplicaciones.

Debido a las discrepancias encontradas entre las simulaciones y la realidad, se ha concluido que es necesario otro estudio a partir de otros datos de partida para así poder comprobar si la hipótesis de incongruencias propuesta es correcta y

conseguir mejores resultados. Adicionalmente, se ha propuesto una alternativa para poder utilizar SWASH como parte de un sistema operacional de apoyo al desembarco anfibio, acoplando este modelo con SWAN.

Abstract

An amphibious operation consists of a military attack launched from the sea to a hostile or potentially hostile coast. The complexity of hydrodynamic behavior in the surf zone can be hazardous for these activities. Therefore, it is necessary, to accurately predict the magnitude of the processes that can affect the landing (H_{sb} , T_b , I_{rb} , α_b and currents). Once these variables are on point, the viability of the landing can be quantified through the *Modified Surf Index* (MSI). With this premise, some operational systems have been developed to forecast these variables in the military field, using different numerical tools (SURF, SWANSURF, etc.)

In this study, the aim is to assess the validity of three tools for amphibious landing help. Coupled models OLUCA+COPLA and SWAN+SHORECIRC have been used and, individually, the hydrodynamic model SWASH. Validation was carried out using field data from two different campaigns in Retín beach, Cádiz.

In general, the results were not completely satisfactory. As for the validations with OLUCA+COPLA and SWAN+SHORECIRC, waves show acceptable correlations in the surf zone ($R^2 > 0.5$ in all cases), with SWAN+SHORECIRC showing R^2 above 0.7 in both campaigns. However, there is a clear overestimation of the results during high tides, although, at low tide, the values are very similar. As for the currents, no correlation has been found between the measured and simulated data. Separately, the assembly carried out with SWASH has not managed to simulate all the selected propagation cases due to instabilities. The correlation obtained is $R^2 > 0.5$ in the surf zone, but a generalized underestimation is observed.

The origin of the inconsistencies detected has been evaluated and it is believed that non-representative bathymetry data is the most likely option. Nevertheless, this has not been proven yet and there could be other answers to this question, still not clearly answered.

Despite the unsatisfying results, MSI was obtained with OLUCA+COPLA and SWAN+SHORECIRC. This analysis showed that they are tools that can help in amphibious landing operations. As for SWASH, this model does not provide results of wave direction, which has shown a great importance in MSI calculation. For this reason, the validity of this model in this application has been discarded.

Due to discrepancies found, it has been concluded that another study is necessary with different initial data, to check if the hypothesis of inconsistencies proposed is correct and therefore achieve better results. Additionally, an alternative has been proposed to include SWASH as a part of an operational system to support amphibious landing, coupling this model with SWAN.

1 Introducción.

1.1 Oleaje y corrientes: importancia en las operaciones anfibias.

1.1.1 Definición y características de las operaciones anfibias.

La Infantería de Marina Española define una *operación anfibia* como “un ataque lanzado desde la mar por fuerzas navales y de desembarco contra una costa hostil o potencialmente hostil” (Figura 1). La acción rápida y la coordinación son cruciales en este tipo de maniobras, distinguiéndolas de un desembarco en un puerto o una playa, que no suponen una amenaza.

Atendiendo a las características de las distintas operaciones anfibias que se pueden realizar, se clasifican en cuatro tipos:

a) Asalto anfibio.

Se trata de una operación anfibia en la que se realiza un desembarco y se establece firme una fuerza de desembarco sobre una costa enemiga.

b) Incursión anfibia.

Este tipo de operación consiste en un desembarco en una costa hostil, con un avance rápido hacia un objetivo o la ocupación temporal de este. Una vez cumplida la misión, se realiza una retirada planeada.

c) Retirada anfibia.

La retirada anfibia no debe confundirse con la retirada planeada de una incursión anfibia. En este caso, la operación consiste en la retirada por mar de fuerzas empeñadas en combate, que puedan emplearse en otra acción.

d) Demostración anfibia.

Estas operaciones se realizan para engañar al enemigo, por medio de una demostración de fuerza. De esta forma, se busca que adopte una línea de acción desfavorable. Estas acciones no implican un desembarco, pero sí se toman las medidas necesarias para hacer creer que lo va a haber.



Figura 1. Ejercicio anfibio MARFIBEX-72 desarrollado en el golfo de Cádiz y la sierra del Retín. Fuente: www.flickr.com/photos/armadamde.

El desarrollo de una operación anfibia pasa por una serie de hitos, eventos o actividades que van más allá del propio avance del buque hacia la costa y el posible desembarco. Generalmente, la secuencia se puede dividir en cinco fases:

1. **Planeamiento:** Durante esta fase, se preparan los planes para llevar a cabo este tipo de operaciones. En realidad, el planeamiento no tiene un lugar concreto en la secuencia. Esta fase puede desarrollarse a lo largo de toda la operación, de tal forma que se asume que comienza al principio de la operación y finaliza al acabarla.
2. **Embarque:** Esta fase se corresponde con el período de tiempo durante el cual las fuerzas, el material y las provisiones embarcan en los buques.
3. **Ensayo:** En esta etapa se comprueba la validez y adecuación de los planes a la operación.
4. **Movimiento hacia la zona objetivo:** El comienzo de esta fase ocurre cuando los elementos de la operación anfibia parten de los puertos de embarque. Cuando las fuerzas llegan a las posiciones asignadas en la zona objetivo anfibia, es cuando termina esta fase. Generalmente, el ensayo se solapa con esta fase.
5. **Asalto:** Una vez las fuerzas llegan a la zona objetivo, se inicia la fase de asalto, que culmina con el cumplimiento de la misión.

Para que la maniobra sea efectiva, las operaciones anfibas precisan de un conocimiento y control del entorno, y más en especial, de la zona de rompientes. Las condiciones del oleaje en rotura y las corrientes asociadas pueden llegar a jugar un papel crítico en el éxito de una misión (Guedes et al., 2015), por lo que es muy importante que durante la planificación de la operación se tenga una buena base de información sobre la que tomar decisiones.

1.1.2 Modified Surf Index (MSI)

La toma de decisiones a la hora de un desembarco anfibia depende de los procesos físicos que ocurren en la zona de rompientes de la playa y la morfología de esta. A nivel internacional, se ha establecido un parámetro, conocido como *Modified Surf Index* (MSI), que permite evaluar las condiciones del medio y servir como criterio para la decisión de desembarco o no desembarco (Male, 2020). Las principales variables que afectan al MSI son las siguientes:

- a) **H_{sb} , altura de ola significativa en rotura:** media del tercio superior de la distribución de olas que llegan en un estado de mar.
- b) **T_b , período en rotura:** tiempo que transcurre entre dos olas rompientes sucesivas.
- c) **α_b , ángulo de incidencia a la costa en rotura:** oblicuidad con la que la ola rompe sobre la costa.

- d) ξ_b , **número de Iribarren en rotura**: define el tipo de rotura de las olas sobre una playa con una pendiente dada.
- e) **V, velocidad de la corriente**: magnitud de las corrientes inducidas por la rotura del oleaje.
- f) **Θ , dirección de la corriente**.

El cálculo del MSI se basa en la aplicación de diferentes tablas que aportan correcciones o modificaciones para el valor índice, a partir de la cuantificación de las variables mencionadas. Además, existen otros parámetros que influyen en la obtención del parámetro, pero con una menor relevancia (velocidad y dirección del viento, anchura de la zona de rompientes, etc.)

1.2 Sistemas operacionales para el desembarco.

En las últimas décadas se han desarrollado conseguido desarrollar tecnologías capaces de recrear las condiciones climatológicas del pasado (*Hindcast*) y de predecir las futuras (*Forecast*). Estos avances han llegado hasta el ámbito de la oceanografía e ingeniería costera, hasta el punto de que es posible simular y conocer con antelación las condiciones de la zona de rompientes. En la actualidad, existen diferentes herramientas de modelación numérica, cada una de ellas con sus aproximaciones, problemas y virtudes, con las que los cuerpos armados de diferentes países (e incluso a nivel civil) trabajan para mejorar sus estrategias y planificaciones en operaciones anfibas. A continuación, se describirán algunas de las herramientas que se utilizan para modelar las condiciones en la zona de rompientes:

1.2.1 SURF 3.2

SURF (Navy Standard Surf Model) (Mettlach et al., 2002) es un modelo paramétrico unidimensional, validado con medidas de campo y de laboratorio (Hsu et al., 2000, 2002), que puede proporcionar al usuario una predicción de las condiciones en la zona de rompientes, aportando valores de altura de ola en rotura, corrientes longitudinales y MSI. El modelo se diseñó con el fin de aportar a la United States Navy la información necesaria para realizar operaciones costeras y desembarcos anfibios, pero la herramienta está también disponible para un uso civil.

Debido al carácter unidimensional de SURF, la resolución de los parámetros requiere de ciertas aproximaciones:

1. **Batimetría recta y paralela.**
2. **Corrientes uniformes en la columna de agua.**
3. **Distribución de Rayleigh para las alturas de ola.**

4. Teoría lineal de ondas.

5. Espectro direccional de oleaje estrecho en dirección y frecuencia.

Con las aproximaciones mencionadas, SURF puede simular hidrodinámica de la zona de rompientes aportando: un perfil de profundidad, un espectro direccional de oleaje e información sobre la refracción de las olas.

1.2.2 SWANSURF

Con el fin de obtener una predicción, no solo de la zona de rompientes, sino también del clima marítimo próximo a la costa, la Royal Australian Navy ha creado una herramienta que acopla los modelos SURF y SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Christie, 2006). SWAN (Booij et al., 1996), desarrollado por la Delft University of Technology, es un modelo espectral bidimensional de propagación del oleaje que permite resolver los procesos de refracción y asomeramiento en un espacio geográfico y un temporal, desde las zonas de aguas profundas hasta la costa.

El acople se realiza mediante un anidado de los perfiles batimétricos del SURF a partir de la malla de propagación del SWAN. De esta forma, se puede obtener el espectro del oleaje que sale del SWAN en un punto de control, situado al inicio del perfil y se utilizaría como forzamiento en SURF. Además, el enlace entre los dos modelos permite que SWAN proporcione a SURF información sobre el nivel del mar, añadiendo así la influencia de la marea.

1.2.3 Delft3D-SURF

Como se comentó en el apartado 1.2.1, una de las asunciones que hace SURF para resolver la hidrodinámica es que la batimetría es recta y paralela. Debido a esto, en zonas con batimetrías complejas o con condiciones de forzamiento cambiantes a lo largo de la costa, los resultados pueden ser erróneos o imprecisos. Estos casos deberían ser resueltos con modelos bidimensional o cuasi-tridimensionales, como es el Delft3D, de la Delft University of Technology (J. A. Roelvink & Van Banning, 1995).

Delft3D es un modelo capaz de simular los procesos hidrodinámicos costeros producidos por el oleaje, mareas, viento, ríos o corrientes costeras, cuya validez ha sido contrastada en numerosas ocasiones (Elias et al., 2000; Hsu et al., 2008; Lesser et al., 2004). No obstante, los parámetros de salida obtenidos con este modelo no son suficientes para ser utilizado como un sistema operacional de ayuda al desembarco. Por este motivo, la United States Navy ha adaptado las subrutinas del modelo SURF para computar dichas variables y diseñar una herramienta mejorada para el apoyo en operaciones anfibas (Hsu et al., 2006).

1.2.4 SurfZoneView

El New Zealand Defence Department cuenta también con su sistema operacional de apoyo, llamado SurfZoneView (o SZV). Esta herramienta consiste simplemente en una interfaz gráfica que permite calcular las condiciones de rompientes utilizando el modelo bidimensional XBeach (Guedes et al., 2015). XBeach ha sido desarrollado por Deltares, UNESCO-IHE y Delft University of Technology, con el fin de servir como un instrumento de análisis de procesos naturales, como puede ser la erosión costera frente a eventos de temporal (D. Roelvink et al., 2009). No obstante, dadas sus altas capacidades para resolver los procesos de la zona de rompientes, se ha considerado como una buena herramienta de apoyo para el desembarco anfibio.

1.2.5 SOPROA

SOPROA (Sistema Operacional Para Operaciones Anfibias) es el sistema operacional de la Armada Española, que fue desarrollado en conjunto entre el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) (Delgado-Tamariz, 2019). Esta herramienta cuenta con información climática histórica y permite realizar predicciones de las condiciones en la zona de rompientes gracias al acople de los modelos SWAN y SHORECIRC.

En el apartado 1.2.2 se comentó que SWAN es un modelo espectral de propagación de oleaje. Las salidas de este modelo alimentan al SHORECIRC, un modelo cuasi-tridimensional de corrientes costeras desarrollado en la University of Delaware, que es capaz de simular la sobreelevación del nivel del mar (*surf-beat*), ondas de borde y corrientes longitudinales, entre otros (Van Dongeren et al., 1994). La validez de SOPROA se ha comprobado con operaciones anfibia de prueba en España y Portugal, obteniendo valores de MSI razonables.

1.3 El proyecto SIAAMETOC-OM.

El proyecto SIAAMETOC-OM, siglas de Sistema Integrado de Apoyo Automático Meteo-Oceanográfico para Operaciones Marítimas, es una iniciativa propuesta por IHCantabria en colaboración con IHM, que fue aprobado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) del 21 de diciembre de 2018 y financiado por el proyecto COINCIDENTE 2018. Su desarrollo se inició a finales de 2019, teniendo como base la herramienta SOPROA (IHM, 2019) y tiene como objetivo incrementar la seguridad material y personal en cualquier operación marítima de la Armada Española.

El proyecto comienza con la identificación, análisis y explotación de los datos meteo-oceanográficos existentes y disponibles a nivel global en la actualidad. En base a esto, se pretende diseñar una herramienta que, de forma automática, permita

adaptar e interpretar dichos datos, sirviendo de apoyo para las misiones y operaciones marítimas de manera fiable, eficiente y realista.

Entre las múltiples aplicaciones que esta herramienta podría permitir, se encuentra la planificación de desembarques y operaciones anfibas en cualquier playa del mundo. Anteriormente se comentó la capacidad de SOPROA para prestar servicio en este tipo de actividades. Sin embargo, SIAAMETOC-OM pretende mejorar las prestaciones descritas para la anterior herramienta. Una de las formas en las que esto se podría conseguir, sería incorporar modelos numéricos que consigan simular las condiciones del oleaje y corrientes en las playas más fielmente a la realidad y en el menor tiempo posible.

2 Objetivos.

En el contexto que se ha descrito para la situación de los sistemas operacionales de ayuda al desembarco anfibio, este trabajo está incluido en el ámbito del proyecto SIAAMETOC-OM. A lo largo de este documento, se verá un análisis académico que pretende verificar la capacidad de tres herramientas de modelado numérico (OLUCA+COPLA, SWAN+SHORECIRC y SWASH) de oleaje y corrientes para simular las condiciones en la playa del Retín (Cádiz).

Para lograr conseguir la meta que se propone, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar los datos obtenidos durante una primera campaña de muestreo realizada entre el 13 y el 18 de noviembre de 2020.
2. Realizar un montaje para cada una de las herramientas que consiga reproducir los datos de la campaña.
3. Validar los montajes seleccionados con una segunda campaña, desarrollada entre el 23 y el 30 de abril de 2021.
4. Comprobar la eficiencia y eficacia para la predicción del oleaje y las corrientes.
5. Determinar la repercusión de cada montaje en el cálculo del MSI.

3 Descripción técnica de las herramientas numéricas.

En este apartado del documento se verá una descripción, a nivel técnico, de las tres herramientas de simulación numérica que se pretenden comparar en el estudio. En cada subapartado, se analizarán las capacidades de cada modelo, las ecuaciones que resuelven junto con las hipótesis que se realizan para hacerlo y las limitaciones.

3.1 OLUCA+COPLA.

Esta herramienta consiste en el acople de los modelos OLUCA (OLEaje de la Universidad de CANTabria) y COPLA (CORrientes en PLAyas). Ambos modelos están ya contenidos y enlazados dentro del software SMC (Sistema de Modelado Costero), creado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) de la Universidad de Cantabria, actualmente transformado en IHCantabria. En concreto, dentro de SMC, existe el módulo MOPLA (MORfodinámica de PLayas), donde conviven OLUCA y COPLA (junto con el modelo EROS, que no se tendrá en cuenta en este trabajo) y pueden ser fácilmente utilizados por medio de una interfaz gráfica.

3.1.1 OLUCA.

a) Descripción:

OLUCA es un modelo de propagación de oleaje que resuelve la fase de una onda, a partir de la ecuación de la pendiente suave (*Mild Slope*) mediante la aproximación parabólica (GIOC, 2001b). Existen dos versiones de este modelo: una que propaga oleaje monocromático (OLUCA-MC) y otra de oleaje irregular (OLUCA-SP). No obstante, para este estudio únicamente se utilizará la segunda, por lo que a partir de este momento se referirá a ella únicamente como OLUCA.

b) Procesos:

1. Asomeramiento.
2. Refracción por fondo.
3. Difracción.
4. Presencia de corrientes.
5. Disipación de energía.
6. Rotura.
7. Dispersión por amplitud.

c) **Modelo matemático:**

La ecuación de la pendiente suave original fue descrita por Berkhoff (1972), como una resolución de la propagación del oleaje que combina los procesos de refracción y difracción. Posteriormente, dicha ecuación fue modificada por diferentes autores para incluir diferentes procesos que afectan a la evolución del oleaje, llegando a la Ecuación 1, sobre la que se construye resuelve OLUCA.

$$\begin{aligned}
& (C_{gj} + U)(A_{jl})_x - 2\Delta_1 V(A_{jl})_y + i(\bar{k}_j - a_0 k_j)(C_{gj} + U)A_{jl} \\
& + \left[\frac{\sigma_j}{2} \left(\frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_1 \sigma_j \left(\frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right] A_{jl} + i\Delta'_j \left\{ [(CC_g)_j - V^2] \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right\} \\
& - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x + \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x \right]_y \right\} \\
& - \frac{b_1}{k_j} \left\{ \left[((CC_g)_j - V^2) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left[\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_x \right\} \\
& + b_1 \beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + 2i\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{xy} + \left[((CC_g)_j - V^2) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y \right]_{yy} \right\} \\
& - \frac{i}{k_j} b_1 \left\{ (\omega_j V)_y + 3(\omega_j U)_x \right\} \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_2 \left[\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_x + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right] \\
& + ik_j \omega_j U (a_0 - 1) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) + \alpha A_{jl} + \frac{\nu_j}{2} A_{jl} + \frac{i\sigma_j}{2} G_{jl}(|A|_{jl}, k_j h) A_{jl} = 0 \quad [1]
\end{aligned}$$

En la Ecuación 1, A_{jl} es la función compleja de la amplitud, para una componente frecuencial j y direccional l ; h es la profundidad local; U y V son las componentes de la velocidad en los ejes x e y ; ω_j y σ_j son las frecuencia angular absoluta y angular intrínseca de la componente j ; C_j y C_{gj} son las celeridades de fase y de grupo de la componente j ; k_j y \bar{k}_j son los números de onda local y medio en y de la componente j ; α es el factor de disipación de energía por rotura del oleaje; ν_j es el factor de disipación de energía por fondo; $G(|A|, kh)_{jl}$ es una función compleja; Δ_1 , Δ_2 y Δ'_j son parámetros que se resuelven a partir de la aproximación Padé(1,1) (Kirby et al., 1994).

3.1.2 COPLA.

a) **Descripción:**

COPLA es un modelo de bidimensional de corrientes inducidas por el oleaje, integradas en vertical y promediadas en un período de tiempo, que parte de las ecuaciones de Navier-Stokes(GIOC, 2001a). Al igual que ocurría con OLUCA, existen dos versiones de este modelo: COPLA-MC y COPLA-SP. La primera de estas resuelve

las corrientes inducidas por un oleaje monocromáticos generado con OLUCA-MC, mientras que la segunda lo hace para oleaje espectral (OLUCA-SP). En este trabajo se utilizará únicamente la versión espectral, refiriéndose a ella como COPLA.

b) Procesos:

Corrientes inducidas por rotura del oleaje.

c) Modelo matemático:

A partir de las hipótesis planteadas, se pueden integrar verticalmente las ecuaciones de Navier-Stokes y promediarlas en un tiempo, en un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar. En este sistema, x sería el eje transversal a la playa, y el longitudinal y z sería el eje vertical. Mediante este proceso, se obtienen las siguientes ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 2) y de cantidad de movimiento en las direcciones x (Ecuación 3) e y (Ecuación 4)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad [2]$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) + \frac{gU}{C^2 H} \sqrt{U^2 + V^2} - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \quad [3]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy}) + \frac{gV}{C^2 H} \sqrt{U^2 + V^2} - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \quad [4]$$

En estas ecuaciones, H es el calado total; S_{xx} , S_{yy} y S_{xy} son los tensores de radiación; U y V son las componentes de la velocidad, promediadas en la vertical y en el tiempo; g es la aceleración de la gravedad; C es el coeficiente de Chézy; ε es la viscosidad de remolino.

3.2 SWAN+SHORECIRC.

Como se comentó en el apartado 1.2.5, el acople entre SWAN y SHORECIRC está contenido dentro de la herramienta SOPROA de la Armada Española, que se utilizará para la ejecución de los modelos y la obtención de los resultados.

3.2.1 SWAN.

a) Descripción:

SWAN es un modelo espectral diseñado para obtener estimaciones reales de los parámetros del oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios, a partir de unas condiciones iniciales de viento, fondo y corriente (The SWAN Team, 2006). No obstante, el modelo puede ser utilizado para simular oleaje generado por viento en cualquier escala relevante.

b) Procesos:

1. Generación de oleaje por viento.
2. Procesos no-lineales ola-ola (*quadruplets* y *triads*).
3. *White-capping*.
4. Fricción por fondo.
5. Rotura en playas.

c) Modelo matemático:

El modelo matemático de SWAN se basa en la resolución de la ecuación de balance de energía de olas (Ecuación 5), considerando los procesos mencionados.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{gx}N}{\partial x} + \frac{\partial C_{gy}N}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta}N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma}N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad [5]$$

En dicha ecuación, N es el espectro de densidad de acción de ola; C_{gx} y C_{gy} son las celeridades de grupo en x e y , respectivamente; C_{σ} y C_{θ} son los cambios en las frecuencias relativas de energía espectral de la dirección de energía espectral debido al fondo y corrientes y S_{tot} es el sumatorio de todas las fuentes de forzamiento y sumideros de energía.

3.2.2 SHORECIRC.

a) Descripción:

SHORECIRC es un modelo cuasi-3D de circulación costera integrada en vertical y promediada para ondas cortas (Van Dongeren et al., 1994). Gracias a la inclusión de los efectos tridimensionales de la corriente en la columna de agua, SHORECIRC es capaz de representar fenómenos complejos de la hidrodinámica de la zona de rompientes, con la simplicidad de un modelo bidimensional.

b) Procesos:

1. Surf-beat.
2. Ondas de borde.
3. Corrientes longitudinales.

c) Modelo matemático:

Al igual que se mencionó para COPLA, las ecuaciones que resuelve SHORECIRC provienen de una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes. Promediando en el tiempo e integrando en vertical, se obtienen las siguientes expresiones de las ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación 6) y de cantidad de movimiento (Ecuación 7)

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{\int_{-h}^{\eta} U dz} + Q_{w,x} \right) = 0 \quad [6]$$

$$\rho \frac{\partial \overline{Q_y}}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x} \overline{\int_{-h}^{\eta} UV dz} + \rho \frac{\partial}{\partial x} \overline{\int_{\eta_t}^{\eta} u_w V + v_w U dz} + \rho g (\bar{\eta} + h) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \left(S'_{xy} - \overline{\int_{-h}^{\eta} \tau_{xy} dz} \right) - \tau_y^S + \tau_y^B = 0 \quad [7]$$

En dichas ecuaciones, $\bar{\eta}$ es la elevación media de la superficie libre; u_w y v_w son las velocidades de la onda corta en las direcciones x e y ; Q es el flujo total de volumen; Q_w es el flujo de volumen debido al movimiento de la onda corta; η_t es la elevación del seno de una onda; τ_{xy} son las fuerzas de Reynolds; τ_y^S y τ_y^B son las fuerzas de Reynolds de la superficie y del fondo.

3.3 SWASH.

Dadas las capacidades de SWASH para simular procesos de oleaje y corrientes en aguas costeras, no requiere del acople con otros modelos para el propósito requerido en este trabajo. Por lo tanto, la herramienta que se describirá en este apartado consiste en único modelo numérico.

a) Descripción:

SWASH es un modelo diseñado para imitar flujos rotacionales, de superficie libre y no-hidroestáticos en una o dos dimensiones. Dadas sus características, el modelo permite describir cambios rápidos en flujos con procesos no lineales, como puede ser la evolución de las olas en la zona de rompientes (Zijlema et al., 2011).

b) Procesos:

1. Asomeramiento.
2. Refracción.
3. Difracción.
4. Dispersión angular.
5. Interacciones ola-ola no lineales.
6. Rotura.
7. Fricción por fondo.
8. Reflexión parcial y transmisión.
9. Interacción con estructuras fijas y flotantes.
10. Generación por viento.

c) Modelo matemático:

SWASH resuelve las ecuaciones no lineales de aguas poco profundas (*Non-Linear Shallow Water Equations*), que se derivan a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y del momento. Estas ecuaciones son las Ecuaciones 8, 9 y 10:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad [8]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad [9]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad [10]$$

En estas ecuaciones, t es el tiempo; η es la elevación de la superficie libre; d es la profundidad media; h es el calado total; u y v son las componentes de la velocidad; q es la presión no hidrostática, normalizada con la densidad; g es la aceleración de la gravedad; c_f es el coeficiente adimensional de fricción por fondo; τ_{xx} , τ_{yx} , τ_{yy} son los términos turbulentos.

4 Resumen de las campañas de medición.

Para la realización de este trabajo, se han utilizado datos de medición de oleaje y corrientes de dos campañas en la playa del Retín, en Cádiz. La primera de ellas, desarrollada entre el 13 y el 18 de noviembre de 2020, se utilizó para la validación de los montajes numéricos y determinar cuál es la mejor herramienta para la predicción de oleaje y corriente. La segunda, comprendida entre el 23 y el 30 de abril de 2021, permitió realizar una segunda validación de los montajes escogidos.

En los siguientes apartados se realizará una descripción de la zona de estudio, así como de los correntímetros utilizados y su montaje en cada una de las campañas. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos, extrayendo las conclusiones pertinentes.

4.1 Playa del Retín, Cádiz.

La zona de estudio que se tratará en este documento es la playa del Retín o de Pajares. Este arenal se encuentra en el sur de la Península Ibérica, concretamente en la comunidad autónoma de Andalucía (Figura 2A). Dentro de esta, la playa se sitúa en la Provincia de Cádiz, quedando muy próxima al Estrecho de Gibraltar y bañada por aguas atlánticas (Figura 2B). El municipio al que pertenece es el de Barbate y está ubicada justo entre las localidades del Barbate y Zahara de los Atunes (Figura 2C).

La playa del Retín es una playa militar, en la que a lo largo del año se realizan diversas maniobras en ejercicios del ejército, como fueron los ensayos de operaciones anfibias denominados GRUFLEX y MARFIBEX. No obstante, esta queda libre para el uso civil de baño durante algunos veranos, cuando no se tiene previsto desarrollar ninguna actividad militar.

La batimetría de la zona es relativamente regular y paralela a la costa, excepto por la presencia de una barra frente a la playa Figura 3. Debido a este elemento, la profundidad varía muy bruscamente de 15 a 12 m. Este rápido gradiente en la batimetría, sumado a que no es continuo a lo largo de la playa, puede generar patrones complejos en el oleaje, provocado zonas de sombra y de concentración de olas. La pendiente de la playa es de 0.02, un valor típico de playas disipativas, por lo que la rotura del oleaje tenderá a ser en decrecimiento.

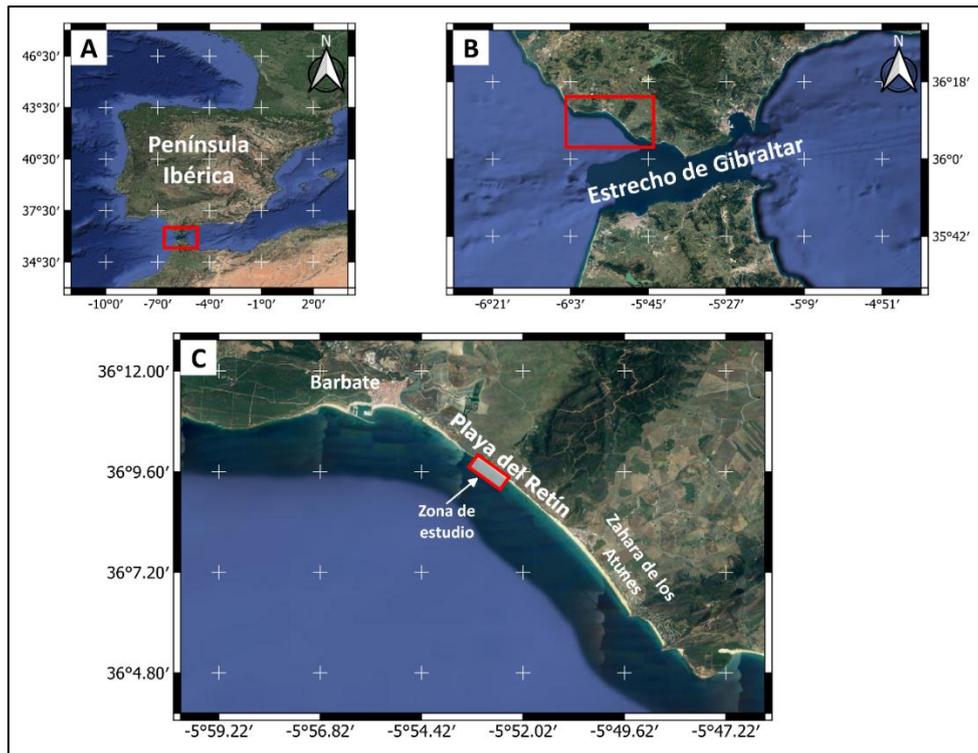


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

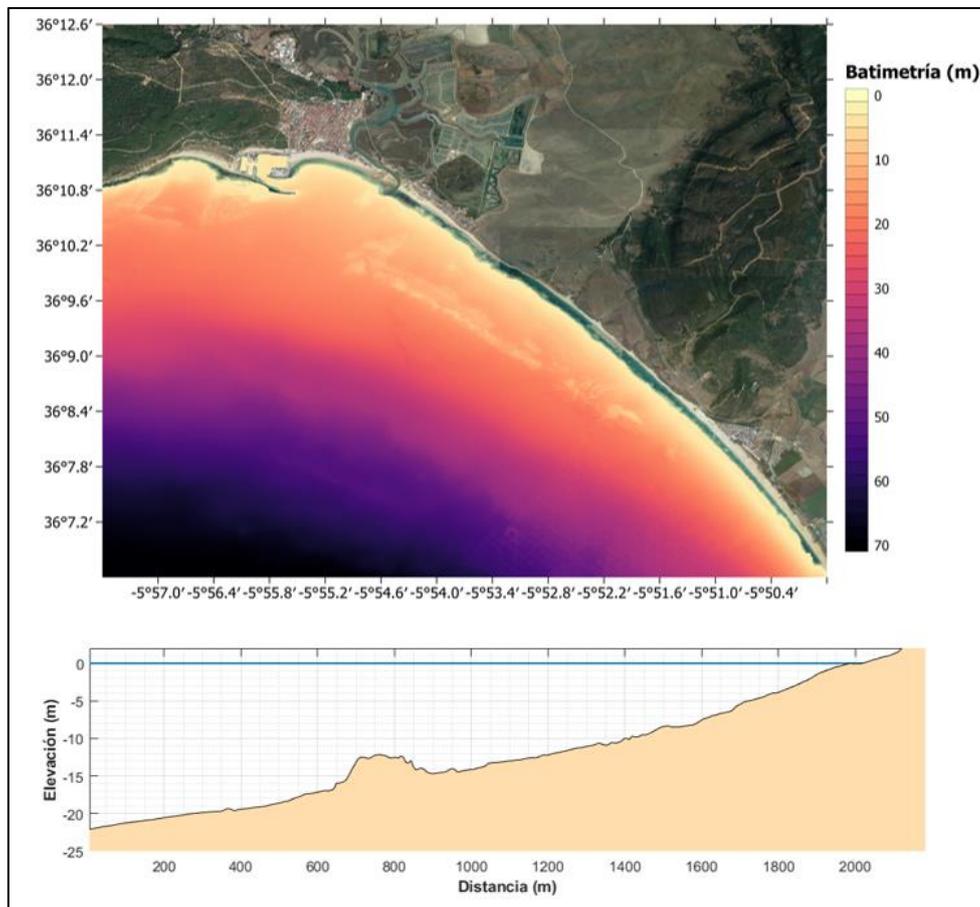


Figura 3. Batimetría frente a la playa del Retén.

4.2 Descripción de correntímetros.

En ambas campañas se utilizaron los mismos correntímetros, por lo que se recogerá una única descripción de cada uno de ellos, aunque se puntualizará en las configuraciones y localizaciones de cada una.

4.2.1 Correntímetro AWAC.

El correntímetro utilizado para la medición de corrientes, oleaje (altura y dirección) y nivel del mar, fuera de la zona de rompientes, fue un AWAC Nortek AST 600. Este instrumento se remolcó desde la orilla hasta la zona de fondeo mediante una embarcación. Debido a su flotabilidad negativa, se le instalaron globos de refloating, que se vaciaron una vez llegó al punto de fondeo. Finalmente, la fijación se realizó hincando piquetas.

En la Figura 4 se muestra el correntímetro ya fondeado durante la campaña 1, junto con el esquema de medición del instrumento. Se trata de un correntímetro de efecto Doppler que dispara tres haces de luz diferentes. Cada uno de ellos, se divide en la columna de agua en celdas, con una anchura de 1 m cada una de ellas. En total, el correntímetro cuenta con 10 celdas en la columna de agua. De esta forma, el correntímetro puede obtener las componentes u , v y w de la corriente en la columna de agua.

El equipo fue programado para que tomase datos de corriente durante 60 segundos, en intervalos de 600 segundos. En el caso del oleaje, este se programó para que obtuviese 1024 datos cada 3600 segundos.



Figura 4. Correntímetro AWAC fondeado en la campaña 1 y esquema de medición.

4.2.2 Dentro de la zona de rompientes.

Para la medición del oleaje y corrientes dentro de la zona de rompientes, se utilizaron dos correntímetros diferentes:

a) Compact EM (EMC).

Se trata de un correntímetro electromagnético, en el que se instaló un sensor de presión Compact WH para que pudiese registrar datos de oleaje (Figura 5 izquierda). Estos instrumentos se colocaron con un muerto fijo y se programaron para tomar datos durante los primeros 10 minutos de cada hora, muestreando a 2 Hz para el caso de las corrientes y a 4 Hz para el oleaje. No obstante, estos instrumentos no midieron durante la segunda campaña.

b) Tipo VECTOR (AVD).

Este correntímetro se instaló, junto con un sensor de presión, mediante un muerto fijo y una estructura de acero inoxidable (Figura 5 derecha). En este caso, los instrumentos se programaron para tomar datos de corriente y oleaje durante los primeros 12.5 minutos de cada hora, con una frecuencia de 4 Hz en la primera campaña y de 8 Hz en la segunda.



Figura 5. Colocación del sensor de presión en el muerto de fondeo (izquierda) y estructura de fijación de correntímetro AVD.

4.2.3 Posicionamiento de los correntímetros.

El posicionamiento de cada uno de los correntímetros se ha establecido de tal forma que cada uno se sitúe en su zona de medición (dentro o fuera de la zona de rompientes) y que estén sumergidos siempre o la mayor parte del tiempo. En la Figura 6 se muestra donde se fondearon en las dos campañas de medición, junto con las cotas batimétricas, referidas al nivel medio del mar, obtenidas de la base de datos de Ecocartografía del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Durante la segunda campaña de medición, se previeron oleajes de hasta 2.5 m de Hs, por lo que el correntímetro AWAC se situó más alejado que en la primera.

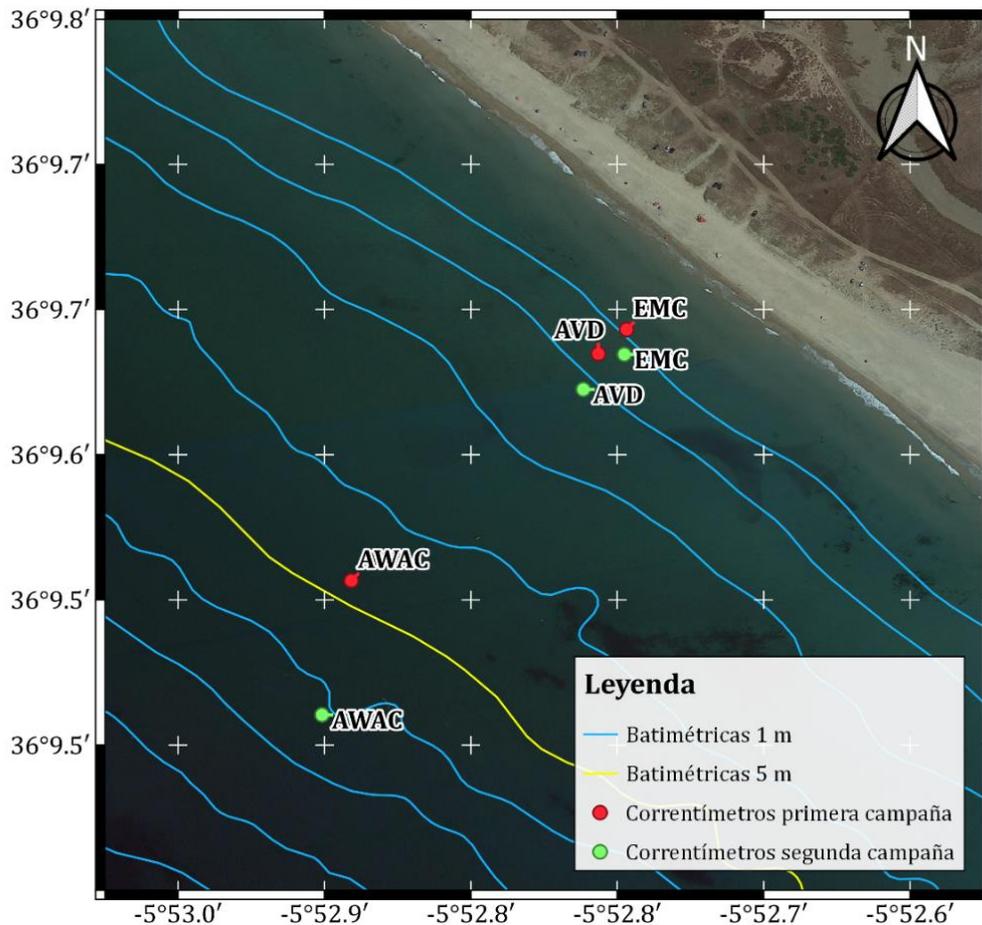


Figura 6. Mapa de posicionamiento de los instrumentos en las campañas 1 (rojo) y 2 (verde).

4.3 Análisis de la primera campaña.

4.3.1 Fuera de la zona de rompientes.

a) Oleaje.

Los datos de oleaje obtenidos en la primera campaña se han procesado, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 7. Los valores máximos y mínimos de H_s que se midieron son de 0.35 y 0.89 m, respectivamente. El período de pico se mostró oscilando entre los 10 y los 5 s durante casi toda la campaña, a excepción de los dos últimos días, donde llegó a alcanzar un mínimo de 7.07 s. En el caso de la dirección, esta se mantuvo muy constante, siendo del SW casi el 80% del tiempo (Figura 7).

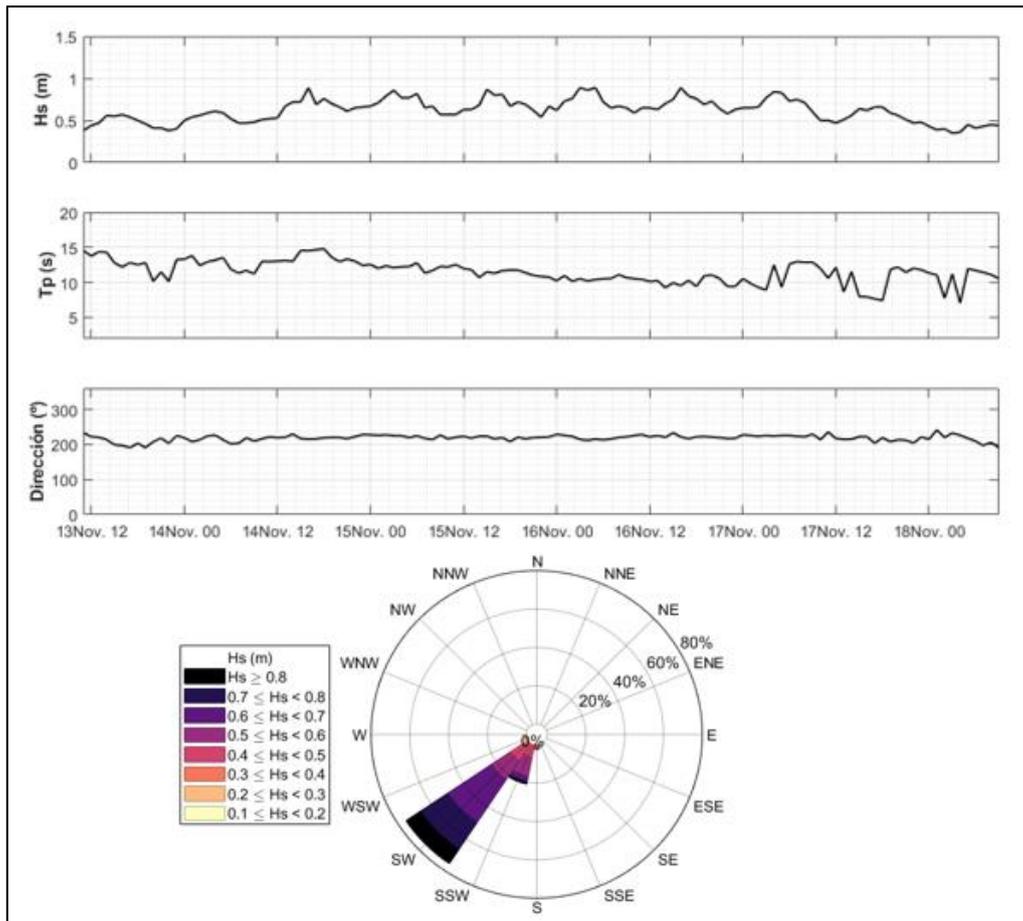


Figura 7. Serie temporal de Hs, Tp y Dirección media y rosa direccional de oleaje. AWAC, primera campaña.

Observando con más detalle la serie temporal de Hs, se puede contemplar una variación periódica en los valores. Comparando esta variable con el nivel del mar medido fuera de la zona de rompientes, se vislumbra la influencia de la marea en los valores de Hs (Figura 8). Durante las bajamares, las olas presentan valores más bajos que durante las bajamares, por lo que existe la hipótesis de que, realmente, el correntímetro no se haya situado fuera de la zona de rompientes.

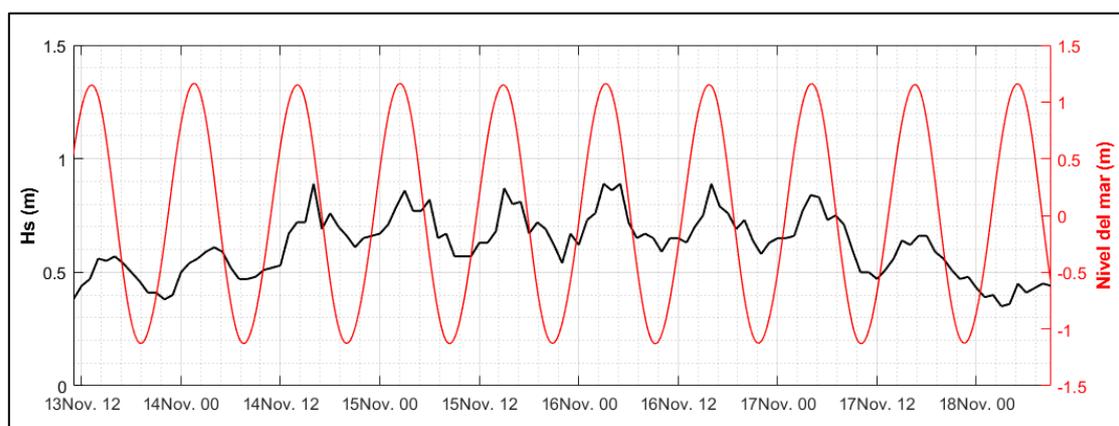


Figura 8. Serie temporal de Hs frente al Nivel del mar. AWAC, primera campaña.

b) Corrientes.

Al igual que ocurría con el oleaje, las corrientes muestran una dependencia del nivel del mar, variando tanto su intensidad como dirección. En la Figura 9 se muestra la importancia del estado mareal en cada una de las componentes u , v y w de la corriente en toda la columna de agua.

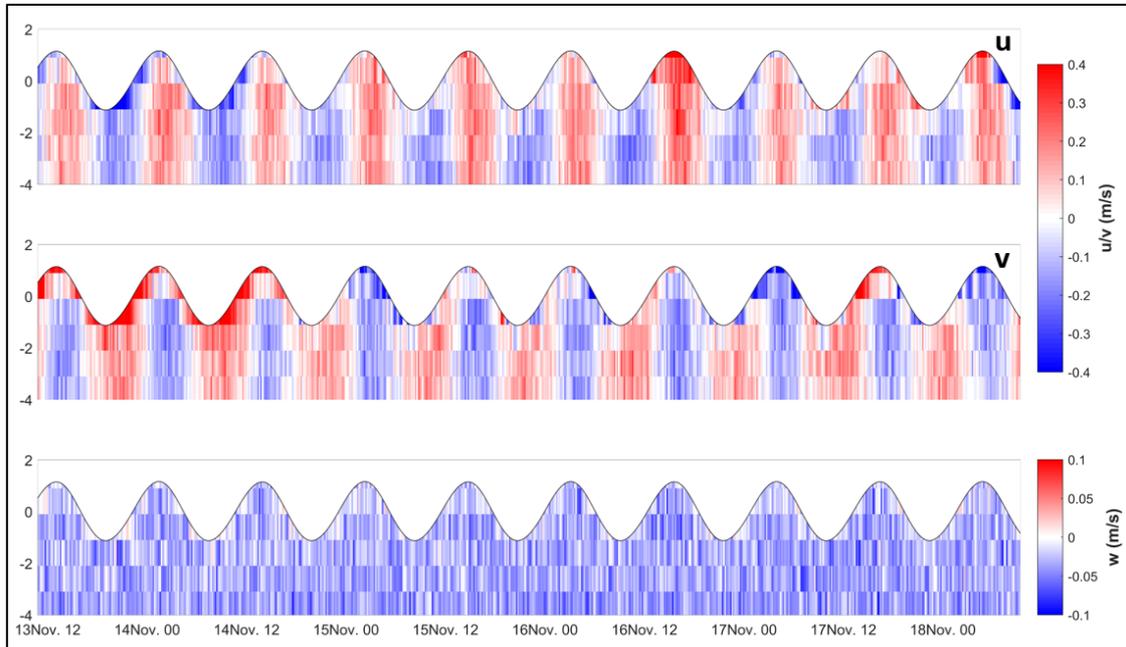


Figura 9. Serie temporal de las componentes de las diferentes celdas de la columna de agua. AWAC, primera campaña.

Para el estudio de las corrientes longitudinales inducidas por la rotura del oleaje, las componentes importantes a analizar son u y v . De la Figura 9 se deduce que ambas componentes tienen sentidos opuestos en bajamar y pleamar. Durante los períodos de marea alta, la componente u es positiva y la v negativa, mientras que en las mareas bajas ocurre lo contrario. Por otro lado, las corrientes más débiles se dan en las medias mareas.

La magnitud y dirección de la corriente resultantes de las variaciones comentadas a lo largo de los ciclos mareales se presenta en la Figura 10. Además de las oscilaciones en la magnitud, se destacan dos patrones de circulación con distintas direcciones. Cabe señalar que las direcciones se refieren, en este y en todos los gráficos en los que aparezcan o se mencionen, “hacia donde” se desplaza el flujo. Esta tendencia a diferentes patrones de circulación se observa también en el histograma de la Figura 10.

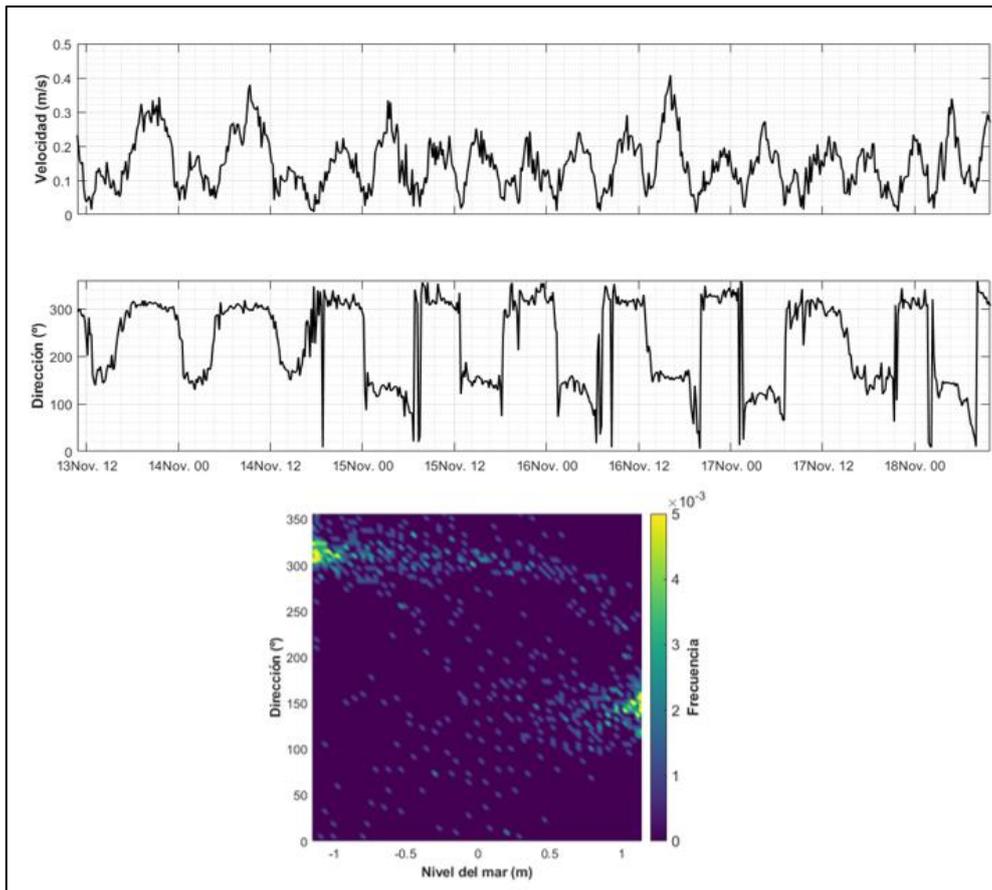


Figura 10. Serie temporal de velocidad de corriente y dirección fuera de la zona de rompientes durante la primera campaña y gráfico de frecuencia de dirección de corriente, frente a nivel del mar. AWAC, primera campaña.

4.3.2 Dentro de la zona de rompientes.

a) Oleaje.

Los registros de oleaje medidos dentro de la zona de rompientes se muestran en la Figura 11. El correntímetro AVD no dispone de datos de dirección, por lo que, de este, únicamente se presentan H_s y T_p . No obstante, el EMC si mide la dirección, permitiendo tener un registro de esta variable en la zona de rompientes.

Los valores de H_s recogidos por el AVD fluctúan entre un mínimo de 0.21 m y un máximo 0.63 m, mientras que en el EMC los valores extremos son de 0.25 m y 0.98 m. En ambos casos se da la misma oscilación en función de la marea que se observaba para el correntímetro AWAC y que se constata en la Figura 12. La serie del EMC presenta huecos debido a que, durante las bajamareas, este correntímetro se quedaba en seco, por lo que no pudo realizar mediciones en dichos períodos.

Aparentemente, los registros del EMC presentan siempre valores superiores al AVD, pese a estar más cerca de la costa. Sin embargo, con niveles del mar bajos, los valores se asemejan más. Teniendo esto en cuenta, se puede dirimir que, durante las pleamares, el oleaje se peralta entre las localizaciones de los correntímetros AVD y EMC, dando lugar a valores más altos en el segundo de estos.

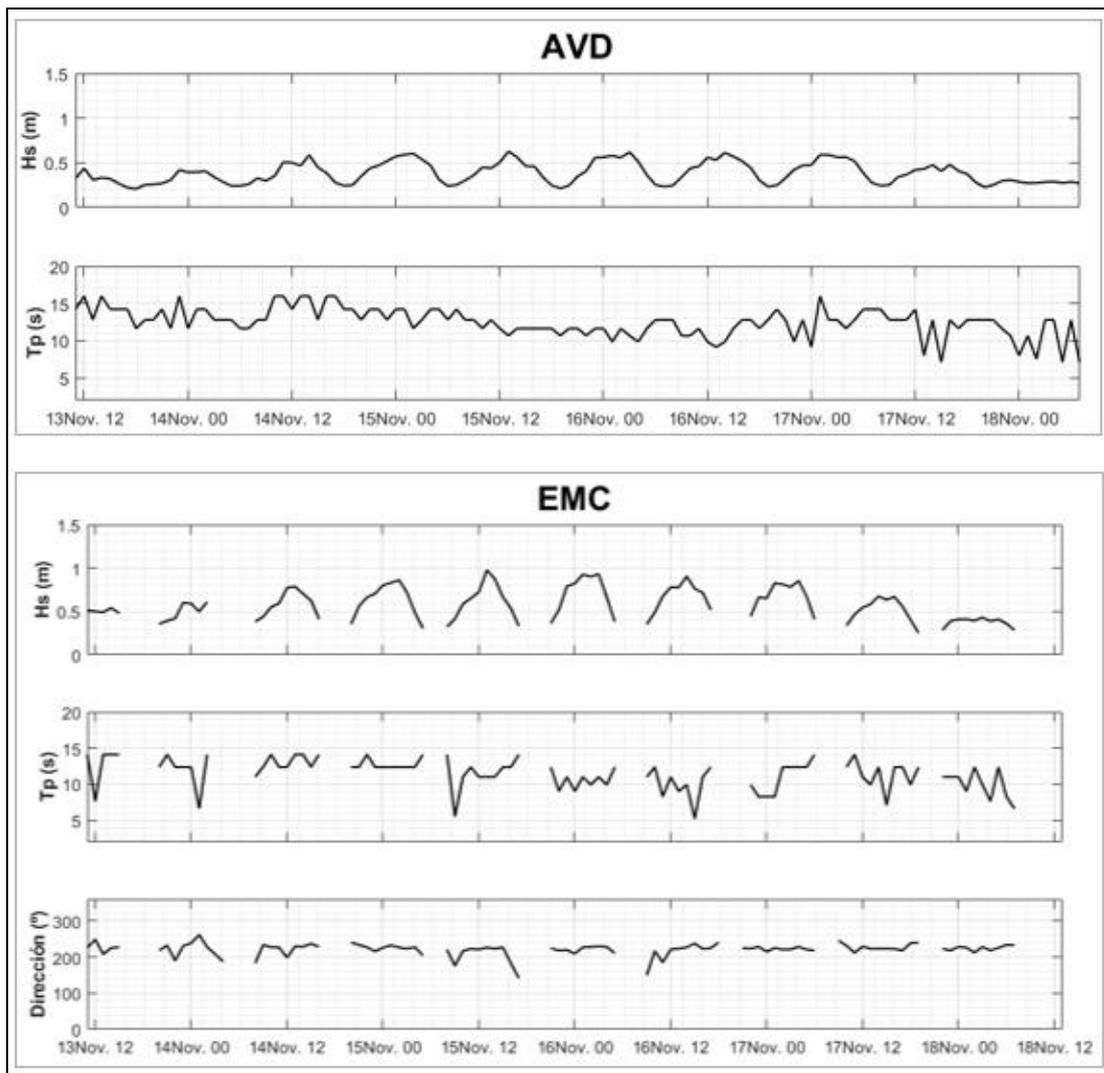


Figura 11. Series temporales de Hs y Tp (AVD, primera campaña) y series temporales de Hs, Tp y Dirección media (EMC, primera campaña).

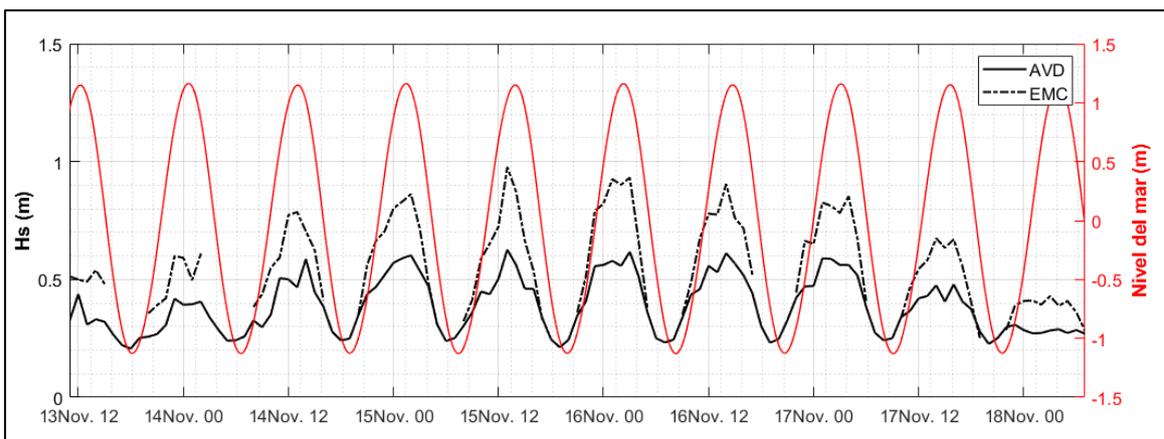


Figura 12. Serie temporal de Hs medidas por los correntímetros AVD y EMC, frente al Nivel del mar en la primera campaña.

El oleaje en la zona de rompientes tiene una direccionalidad similar al comentado anteriormente fuera de esta. En la Figura 13 se observa que los estados de mar muestreados presentaron direcciones contenidas en el abanico desde el WSW hasta SE, siendo el SW el más frecuente.

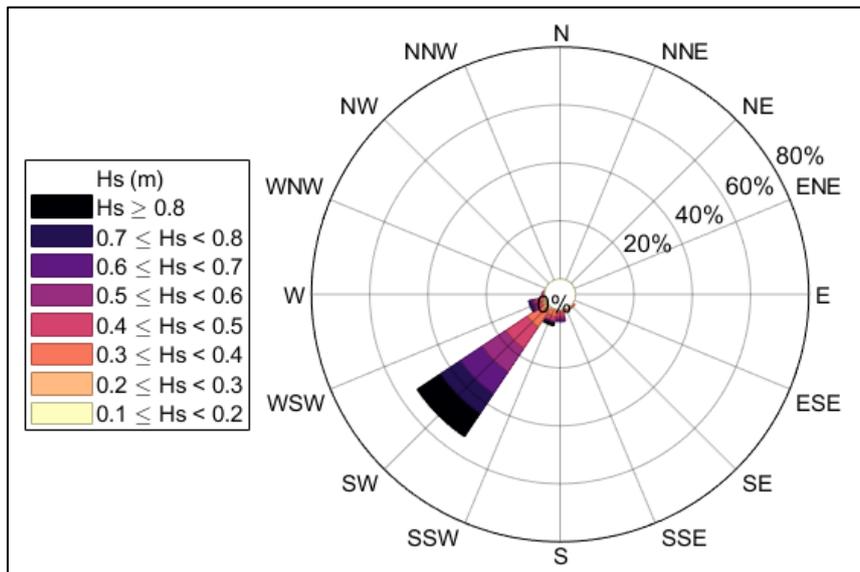


Figura 13. Rosa direccional de oleaje dentro de la zona de rompientes en la primera campaña.

b) Corrientes.

Al igual que ocurría en las mediciones realizadas por el AWAC, las corrientes dentro de la zona de rompientes también muestran una dependencia del nivel del mar. Las corrientes más intensas se registraron durante las bajamares, tanto en el correntímetro AVD como en el EMC. No obstante, sabiendo que no hay registros de oleaje en el EMC durante las bajamares porque el correntímetro queda emergido, es posible que los datos de corriente tomados por este en dichos períodos, no sea correcto. Esto podría ser igualmente respaldado por la dispersión en la dirección de la corriente que se muestra, para las bajamares, en la Figura 15. Dicho gráfico, pese a la escasez de datos para una buena representación, muestra una pequeña concentración en las direcciones durante las pleamares, entre 100 y 150°. En niveles de mar más bajos, los datos se dispersan, resultados en corrientes de todas las direcciones.

Analizando los datos del AVD, las corrientes muestran dos patrones diferentes. Por un lado, durante las pleamares, es bastante frecuente una corriente que se dirige hacia el NE, es decir, hacia la playa. Por el otro, durante todos los estados mareales, pero más frecuentemente en niveles del mar bajos, ocurre una corriente hacia el SW, en dirección opuesta al patrón anterior. Esto sugiere que se trata de una zona con una corriente de retorno, captada por el AVD. Este análisis puede dar peso al argumento de que las mediciones del EMC en bajar no son correctas.

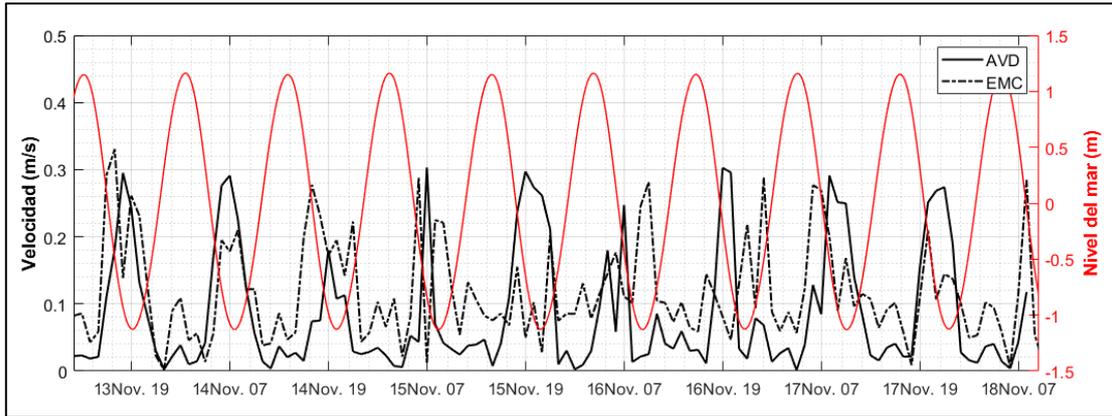


Figura 14. Serie temporal de velocidad de corriente dentro de la zona de rompientes, frente al nivel del mar.

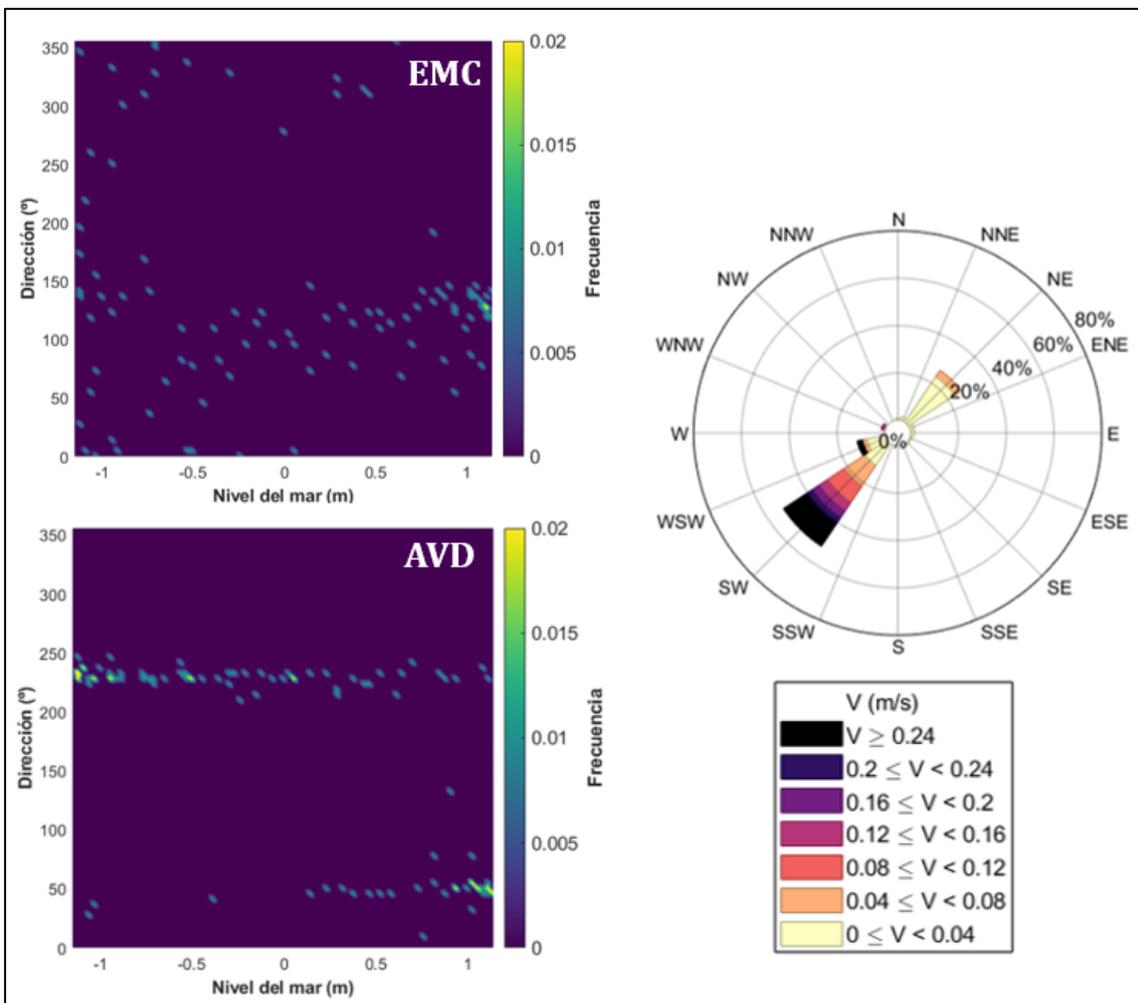


Figura 15. Gráfico de frecuencia de dirección de corriente frente a nivel del mar (EMC, primera campaña) y gráfico de frecuencia de dirección de corriente frente a nivel del mar con rosa direccional de corriente (AVD, primera campaña)

4.3.3 Conclusiones de la primera campaña.

Las conclusiones que se pueden extraer de esta primera campaña son las siguientes:

- Aunque inicialmente, se había planeado instalar el correntímetro AWAC fuera de la zona de rompientes, los resultados muestran las alturas de ola disminuyen durante las bajamares, que se podría relacionar con la rotura del oleaje antes de llegar al instrumento. Esta sería una primera hipótesis de lo que sucede en dicha ubicación, aunque no puede ser contrastada.
- En los tres correntímetros se observa que los registros de oleaje tienen una dependencia del nivel del mar, hasta el punto de que, durante las bajamares, el correntímetro situado más próximo a la costa (EMC) se queda emergido durante las bajamares.
- Las corrientes también muestran una dependencia del nivel mar, perceptibles en los registros de los correntímetros AWAC y AVD.
- Aparentemente, la zona de medición se encuentra en una corriente de retorno.

4.4 Análisis de la segunda campaña.

Como se comentó anteriormente, la segunda campaña se desarrolló durante un período en el que se esperaba que las olas llegasen hasta 2.5 m de altura. Debido a esto, todos los correntímetros sufrieron daños o incidentes que afectaron a las mediciones. Pese a eso, se pudieron obtener algunos registros de oleaje y corriente. En los siguientes subapartados se mencionará lo ocurrido con cada uno de los instrumentos y se analizarán los resultados.

4.4.1 Fuera de la zona de rompientes.

El correntímetro AWAC estuvo operativo desde las 12:00 horas del día 23 hasta las 10:00 horas del día siguiente. Este instrumento fue volcado por el fuerte oleaje, por lo que únicamente se tienen registros de oleaje y corriente durante ese período de 23 horas.

a) Oleaje.

Al comienzo de la segunda campaña, la playa del Retín se encontraba bañada por un oleaje débil. La Figura 16 muestra una serie con unas condiciones de altura de ola significativa que no superan los 0.9 m, con períodos de pico frecuentemente por debajo de los 5 s (y un máximo de 10 s) y direcciones principalmente del S. Esto es así las 5:00 horas del día 24, donde comienza a observarse el oleaje de temporal que se preveía para la fecha del muestreo. A partir de dicho momento, el oleaje migra

hacia una componente SW y muestra valores más intensos en Hs y Tp. En concreto, la serie de Hs muestra un crecimiento incesante hasta que se corta la serie por el vuelco del instrumento, llegando a un máximo de 1.4 m.

Otro hecho destacable de las mediciones de este correntímetro es que, al contrario que ocurría en la primera campaña, el oleaje registrado no muestra una dependencia de la marea.

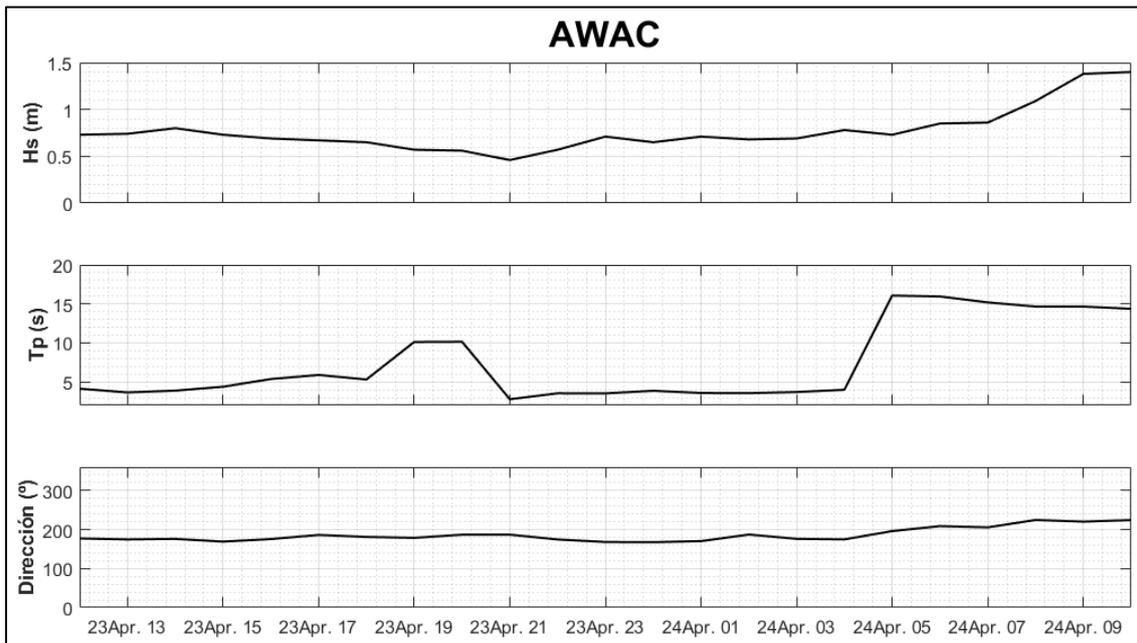


Figura 16. Serie temporal de Hs, Tp y Dirección media medidos por el correntímetro AWAC en la segunda campaña.

b) Corrientes.

Aunque no se disponga de un registro largo, las 23 horas medidas por el AWAC fueron suficientes para detectar las corrientes y su dependencia del nivel del mar. En la Figura 17 se contempla que las corrientes son muy débiles durante las pleamares, pero se intensifican en las bajamares. Las dos componentes horizontales (u y v), que son las más importantes en este estudio, presentan el mismo signo a lo largo de casi toda la serie (negativo en u y positivo en v), lo que se traduce en que la dirección de la corriente es poco variable, dirigiéndose hacia el WNW (Figura 18).

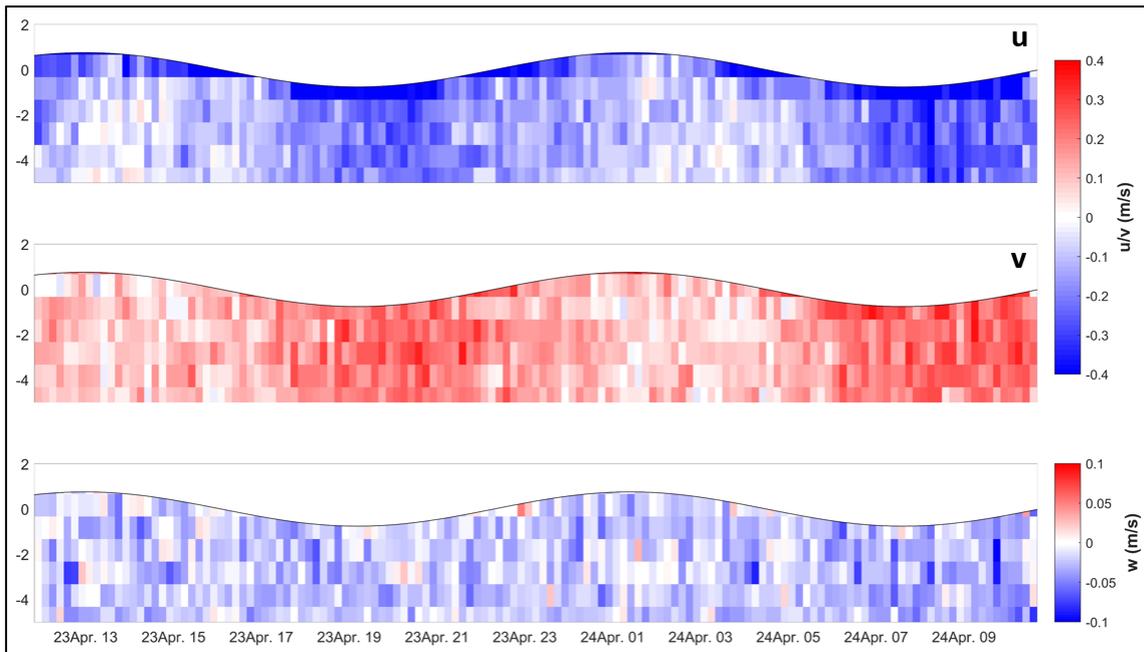


Figura 17. Series de perfiles de corriente medidas por el correntímetro AWAC durante la segunda campaña.

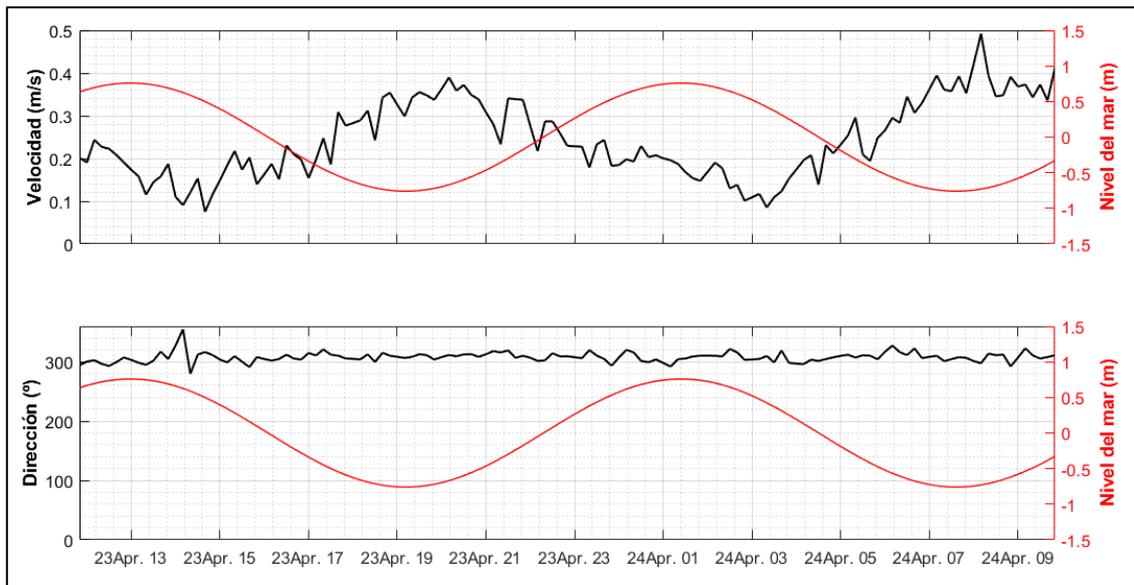


Figura 18. Serie temporal de velocidad de corriente y dirección medidas por el correntímetro AWAC durante la segunda campaña.

4.4.2 Dentro de la zona de rompientes.

En este subapartado del análisis de la segunda campaña, únicamente se analizará el registro del correntímetro AVD. Esto es debido a que el EMC fue sepultado por una barra de arena, causando su avería. El AVD también fue parcialmente cubierto, pero, afortunadamente, este instrumento fue capaz de medir a lo largo de toda la campaña.

a) Oleaje.

Al igual que se veía en el registro del AWAC, al principio de la campaña, el oleaje registrado por el AVD era de una magnitud no muy intensa. Los datos más altos comienzan a partir de la madrugada del 24 de abril, como se vio anteriormente (Figura 19). No obstante, el valor más alto es de 0.64 m, que no dista mucho de los medidos durante la primera campaña. Esto se debe a que, pese a tratarse de un período de oleajes más intensos, las olas más grandes rompen antes de llegar a la posición del AVD, resultado en registros menos fuertes.

Pese a no existir un registro del nivel del mar durante toda la campaña, se puede observar la misma oscilación en los datos dependiente de la marea que se vio durante la primera campaña.

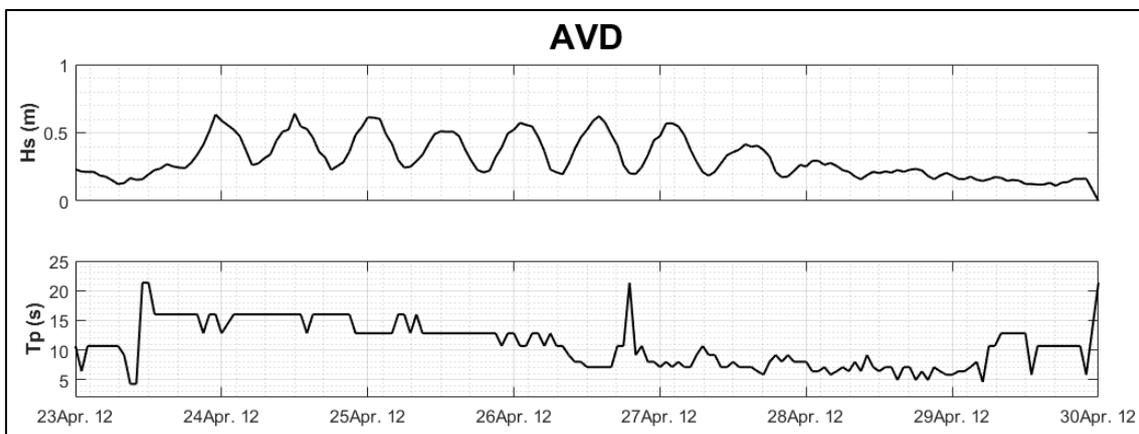


Figura 19. Serie de Hs y Tp medidos por el correntímetro AVD durante la segunda campaña.

b) Corrientes.

En el caso de las corrientes, antes del inicio del evento extremo, la dirección se mostraba bastante constante y similar a la mostrada para el AWAC. Cuando se inicia el período de oleajes intensos, las condiciones de las corrientes se modifican e intensifican, llegando hasta un máximo registrado de 0.45 m/s. En cuanto a la dirección, comienza una oscilación que genera dos patrones diferentes de corriente: uno hacia el SW y otro hacia el ESE. Estos patrones dependen del nivel del mar y las corrientes más intensas suceden en el patrón que viaja hacia el SW.

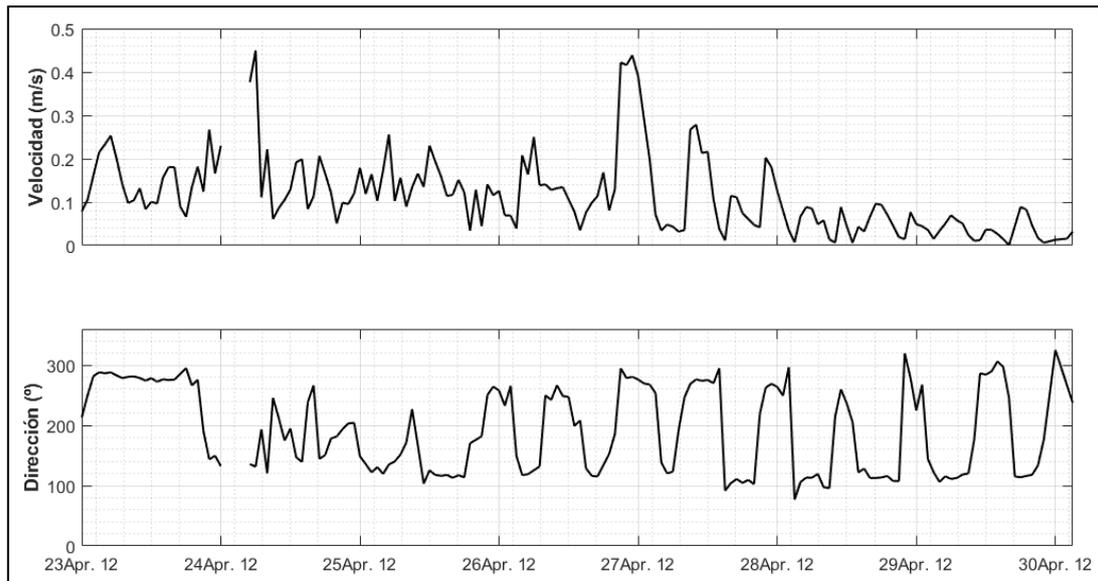


Figura 20. Series temporales de velocidad de corriente y dirección, frente al nivel del mar, durante la segunda campaña.

4.4.3 Conclusiones de la segunda campaña.

Pese a las contingencias que sucedieron durante el transcurso de esta segunda campaña, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Aunque el correntímetro AWAC no haya medido durante toda la campaña, ha registrado un oleaje que progresivamente ha ido creciendo en Hs, Tp y ha cambiado su dirección de incidencia. El hecho de que este instrumento haya volcado, pese a estar sujeto con dos muertos de 25 kg cada uno y tres piquetas de 75 cm, es indicativo de la virulencia del oleaje.
- En el registro del AWAC, no se observa una dependencia de Hs con el nivel del mar, pero sí ocurre en los datos del AVD.
- En ambos correntímetros, las corrientes presentan una dependencia con el nivel del mar.

5 Montaje de las herramientas numéricas.

5.1 Acople topo-batimétrico.

Para realizar el montaje de un modelo numérico de la forma correcta, es necesario partir de una batimetría bien referenciada y con una resolución suficiente para captar los elementos morfológicos del fondo que puedan afectar a las propagaciones. Los datos batimétricos, proporcionados por el Ministerio de Defensa, ya se mostraron en el apartado 4.1 y sus características fueron analizadas entonces. No obstante, dicho registro únicamente contiene datos hasta la cota 0, con respecto al cero hidrográfico. Dado que el oleaje llega más allá de esa cota, es necesario contar con datos topográficos que se puedan acoplar con los ya disponibles.

En este caso, con el fin de representar la tierra emergida fielmente a la realidad, se utilizó uno de los Modelos Digitales de Terreno del Centro Nacional de Información Geográfica como base de datos topográficos. El archivo descargado cuenta con medidas de elevación con un espaciado de 25 m y están referidos al nivel medio del mar, por lo que fue necesario cambiar la cota de referencia.

En la Figura 21 se muestran en azul los puntos con datos de batimetría y en naranja los de topografía. Como se comprueba en dicha imagen, el acople permite cubrir la zona de trabajo y el resultado final se muestra en la Figura 22.

Cabe destacar que, para las propagaciones numéricas, la referencia de la batimetría se cambió al nivel medio del mar.

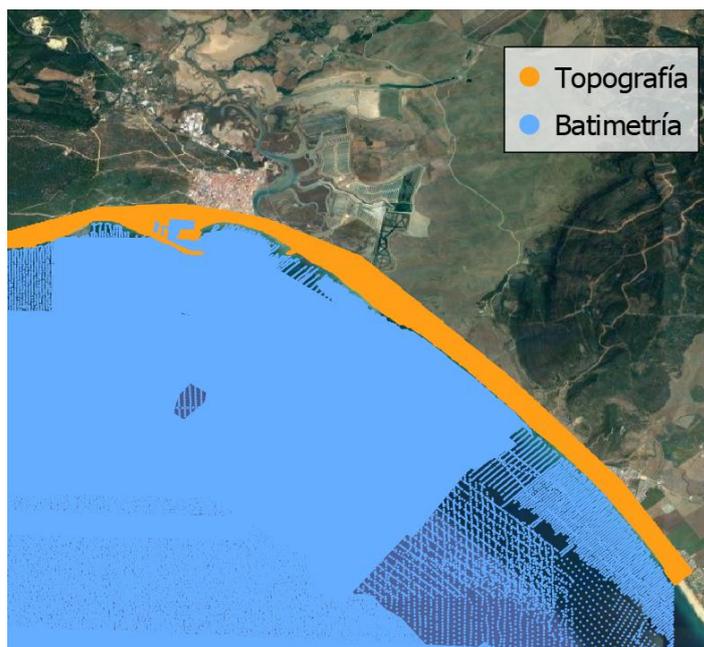


Figura 21. Acoplamiento de topografía y batimetría.

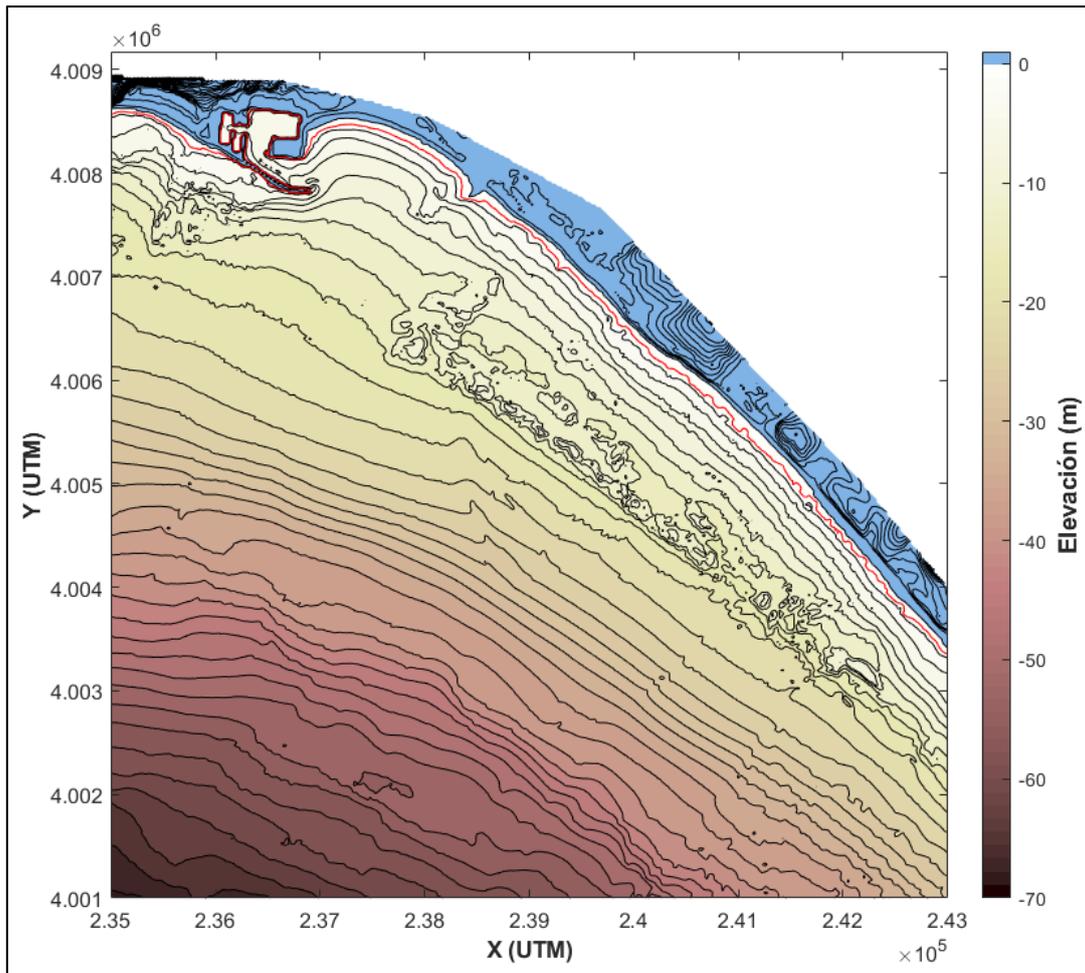


Figura 22. Batimetría final tras el acople con la topografía. Las líneas batimétricas se muestran cada 2 m.

5.2 OLUCA+COPLA.

Como se comentó en el apartado 3.1, los modelos numéricos OLUCA y COPLA están contenidos y acoplados dentro del módulo MOPLA, de SMC. Por lo tanto, esta herramienta numérica se montó con la interfaz gráfica que dicho software provee.

El esquema de mallado de esta herramienta está compuesto por dos mallas rectangulares: una general y una de detalle encadenada (Figura 23). La propagación comienza al inicio de la malla general, donde se deben aportar los parámetros H_s , Dirección media, f_p (frecuencia pico), γ (dispersión frecuencial), σ (dispersión direccional) y nivel del mar. A partir de estos parámetros de inicio, OLUCA resuelve el oleaje en la malla general hasta llegar al comienzo de la de detalle. Posteriormente, los datos de los nodos que hay en el encadenamiento con la malla de detalle, son usados como forzamiento en esta segunda malla, donde no solo OLUCA resuelve el oleaje, sino que COPLA da las corrientes.

Dadas las restricciones direccionales que tienen, tanto la herramienta numérica, como la orientación de la costa, se ha diseñado un único complejo de

mallas que permite propagar oleajes en el abanico de 167-273° (Figura 23). La malla general cuenta con una resolución espacial de 100 m, mientras que la de detalle es de 20 m. En la Figura 23 se muestra la batimetría en la malla de detalle, donde se puede comprobar que la resolución utilizada de 20 m permite representar los elementos morfológicos del fondo que son importantes en las propagaciones. Además, se muestra la posición de los correntímetros ubicados durante la primera campaña, dentro de la malla de detalle.

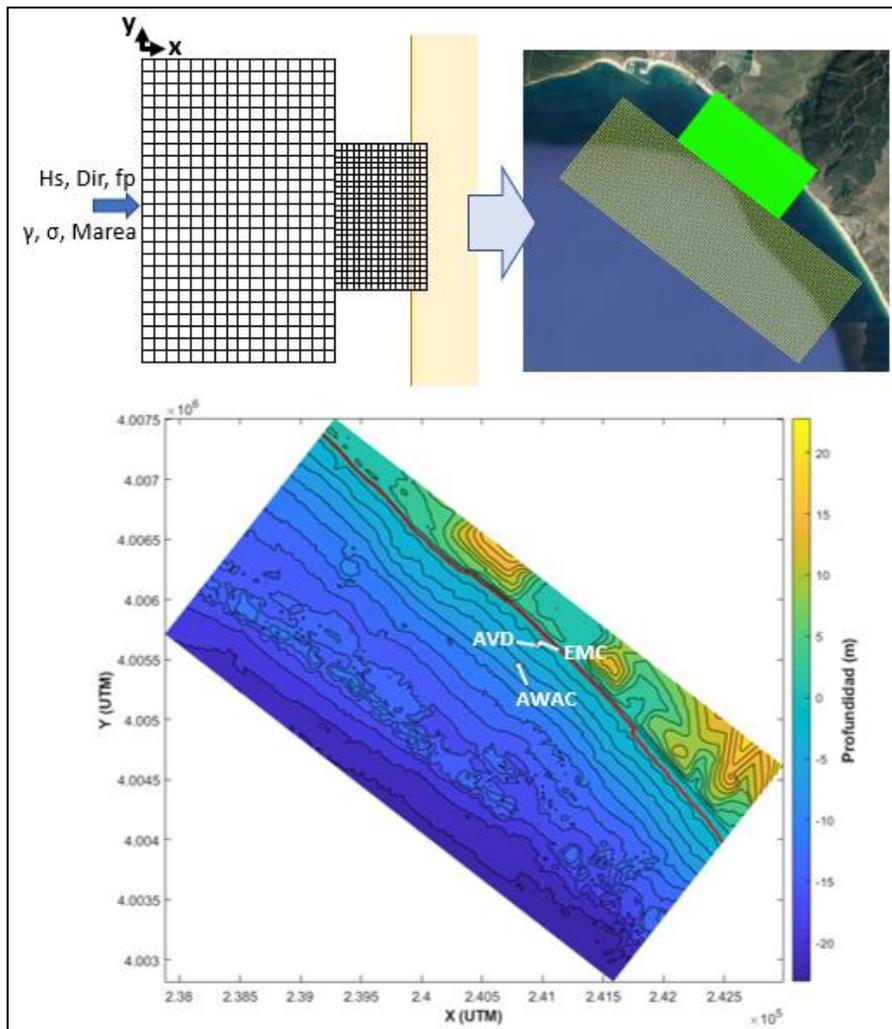


Figura 23. Esquema de mallas, mallas utilizadas y batimetría de la malla de detalle de OLUCA+COPLA. Líneas batimétricas cada 2 m. La línea roja indica la cota 0.

5.3 SWAN+SHORECIRC.

El montaje numérico de esta herramienta se hizo con una modificación del software SOPROA, del cual se habló en el apartado 1.2.5. Este programa cuenta con una interfaz gráfica que permitió realizar el mallado de una forma rápida y correcta, siguiendo el esquema que se presenta en la Figura 24. El acoplamiento entre SWAN

y SHORECIRC que permite SOPROA, consiste en un sistema de dos mallas: una general rectangular y una de detalle curvilínea embebida en la general. El concepto de esta última se puede entender como una malla rectangular no regular, en la que la resolución aumenta al acercarse a la costa.

Los datos de forzamiento se establecen en una serie de puntos en los contornos de la malla general ($P_1, P_2, P_3 \dots$). Aportando datos de H_s, T_p , Dirección media, γ y σ en los puntos de forzamiento, se genera un archivo de espectro de oleaje, con el formato descrito en el manual de usuario de SWAN (The SWAN Team, 2006). Adicionalmente, se pueden incluir datos de nivel del mar y velocidad y dirección del viento, si fuese necesario.

Una vez definidas las mallas y el forzamiento, SOPROA ejecuta la propagación. SWAN comienza resolviendo las ecuaciones en los nodos de la malla general. Posteriormente, hace una extracción de los espectros de oleaje en los nodos de los contornos de la malla curvilínea (puntos amarillos en la Figura 24 izquierda). Estos espectros se utilizan como forzamiento de la malla circular, en la que, tras terminar la propagación de la malla general, SWAN resuelve el oleaje. Tras finalizar los procesos de SWAN, SHORECIRC resuelve las corrientes dentro de la malla circular, a partir de los resultados de SWAN. La propagación se realiza de forma no-estacionaria, es decir, simulando toda la serie de tiempo, haciendo que el instante actual dependa del anterior. No obstante, se observó que las propagaciones no tenían en cuenta la variación del nivel del mar y tomaba únicamente el primer valor aportado. Conociendo la importancia de esta variable en el oleaje y las corrientes, fue necesario realizar una modificación en los montajes de SOPROA.

El cambio que se hizo consistió en que, en vez de propagar toda la serie continua de forma no-estacionaria, se ejecutó cada caso durante 3 horas no-estacionarias. Es decir, cada hora de simulación, se aportaban los mismos datos de forzamiento. De dichas propagaciones, se tomaron únicamente los resultados de la última hora.

Tras explicar el montaje de SWAN+SHORECIRC y la modificación que se realizó, las mallas que se diseñaron para las propagaciones se presentan en la Figura 24, junto con los puntos de forzamiento, en los que se introducción el mismo forzamiento para cada instante de tiempo. La malla general cuenta con una resolución espacial de 100 m, mientras que la de detalle es de 25 m. Además, en la Figura 24 se presentan las batimetrías de ambas mallas, junto con la posición de los correntímetros durante la primera campaña.

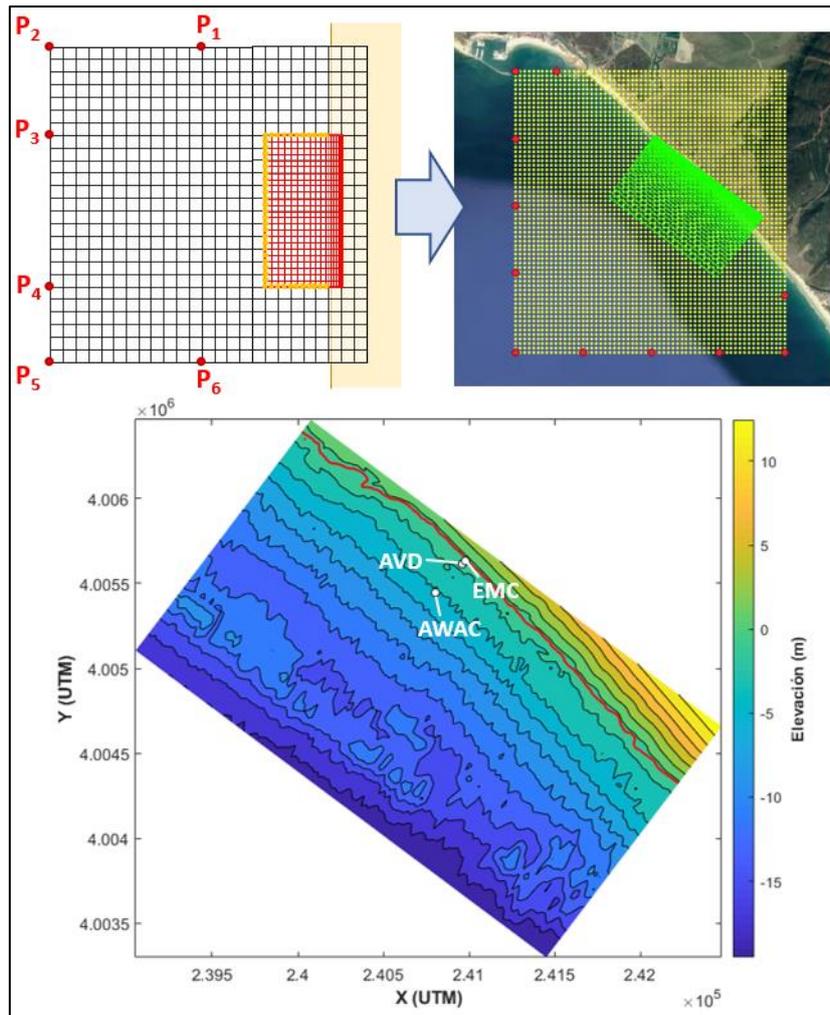


Figura 24. Esquema de mallas, mallas utilizadas y batimetría de la malla de detalle de SWAN+SHORECIRC. Líneas batimétricas cada 2 m. La línea roja indica la cota 0.

5.4 SWASH.

SWASH carece de un software con interfaz gráfica que permita realizar el montaje de forma sencilla. Por lo tanto, la configuración de los archivos de entrada y el diseño de la malla se tuvieron que hacer manualmente.

Debido al alto coste computacional de SWASH, la inestabilidad del modelo y las limitaciones que este tiene con el uso de mallas curvilíneas y no estructuradas, el montaje de SWASH se ciñó a una única malla regular, similar a la de detalle de OLUCA+COPLA (Figura 25). En dicha malla, el forzamiento se introdujo por un único contorno, de forma constante, con espectros JONSWAP, aportando los valores de H_s , T_p , Dirección media, γ y σ . Cada caso se propagó de forma estacionaria, introduciendo, en cada uno, su respectivo nivel del mar. Para la extracción de resultados, se guardaron las series de superficie libre (η) y componentes u y v de la velocidad en la localización de los correntímetros, a partir de los 5 primeros minutos de propagación, cada segundo, hasta un máximo de 30 minutos que dura la propagación.

La malla utilizada se muestra en la Figura 25 y cuenta con una resolución espacial de 12.5 m. La batimetría proyectada en dicha malla se presenta en la Figura 25. Cabe destacar que, para mitigar algunos de los problemas de estabilidad del modelo, la parte emergida de la batimetría se suavizó aplicando una media móvil.

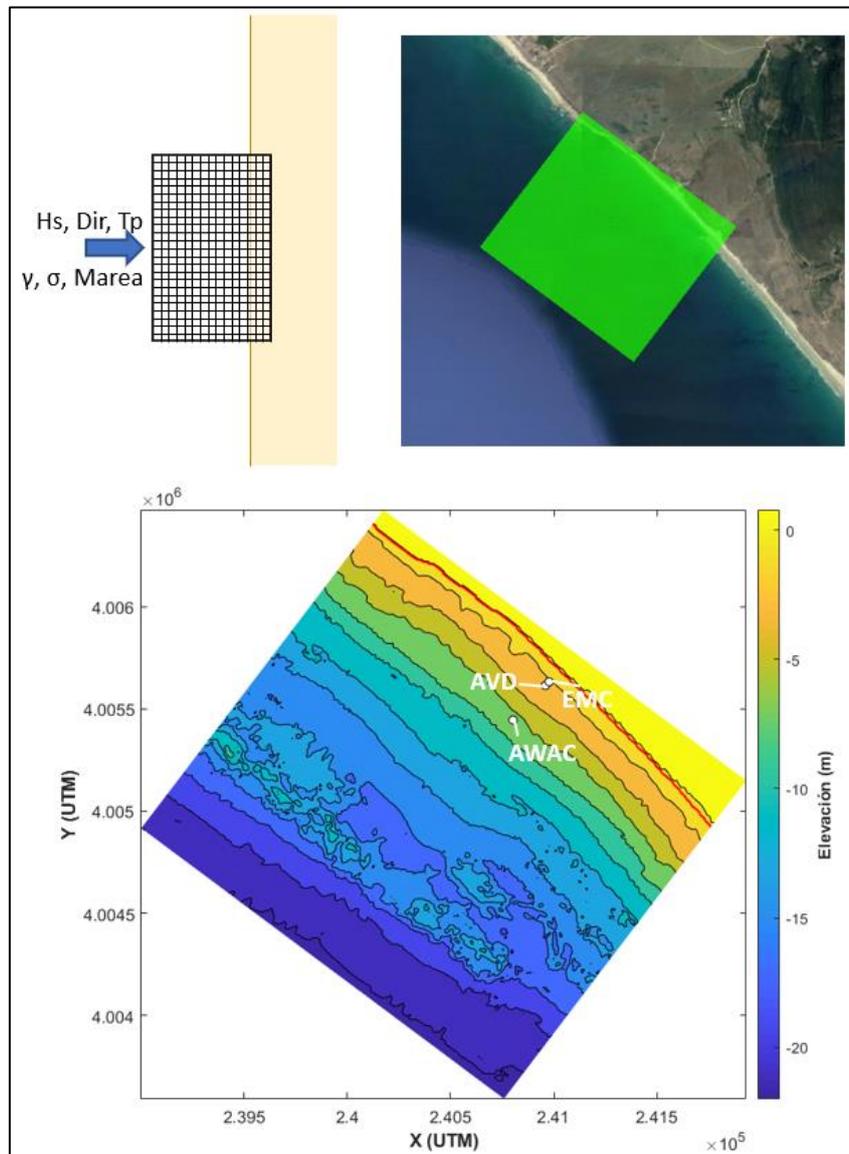


Figura 25. Esquema de malla, malla utilizada y batimetría de SWASH. (derecha). Líneas batimétricas cada 2 m. La línea roja indica la cota 0.

5.5 Forzamiento.

5.5.1 Nivel del mar.

Los datos de forzamiento de nivel del mar se tomaron del mareógrafo de la red de Puertos del Estado más cercano a la zona de estudio. En las proximidades a

esta, se encuentran en el Bonanza 2, Tarifa y Algeciras. De estos, el seleccionado fue el de Tarifa (Figura 26).

La serie de nivel del mar medida por el correntímetro AWAC durante la primera campaña se comparó con la serie medida en este período de tiempo por el mareógrafo de Tarifa. De esta forma, se observó que existe un desfase en el tiempo entre ambas mediciones y que, además, los valores del correntímetro son más altos (Figura 26 A). Para contar con un forzamiento más fiel a la realidad medida, la serie se ajustó a los datos del AWAC de la siguiente forma:

$$Tiempo_{nuevo} = Tiempo_{antiguo} + 1.2 \text{ horas}$$

$$Nivel_{nuevo} = 1.7 \times Nivel_{antiguo} - 0.05$$

Tras dicho ajuste, la nueva serie se presenta en la Figura 26B. El mismo procedimiento se realizó para obtener el nivel del mar de la segunda campaña.

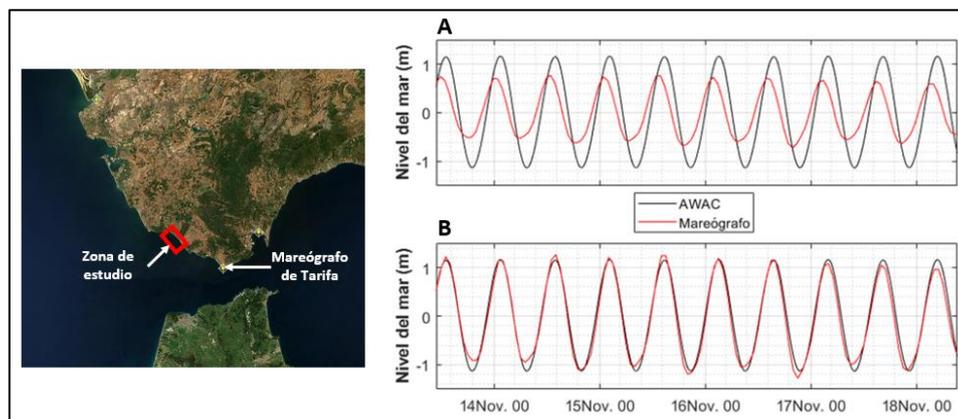


Figura 26. Localización del mareógrafo más cercano y comparación entre nivel del mar medido por el correntímetro AWAC y la serie del mareógrafo original (A) y corregida (B).

5.5.2 Oleaje.

La base de datos de oleaje utilizada fue la malla de escala regional del Estrecho de Gibraltar, contenida dentro del sistema de predicción de Puertos del Estado. Dicha malla tiene una resolución espacial de 0.007° y aporta datos horarios de predicción de hasta 2 días.

Para poder tener un forzamiento en todos los montajes explicados, se seleccionaron dos nodos diferentes, que en la Figura 27 se denominan F₁ y F₂. El primero de ellos, permitió obtener las series de oleaje para las propagaciones con OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC. No obstante, dada la proximidad a la costa de la malla utilizada para el SWASH, se decidió tomar también los datos del segundo.

Tras analizar unos resultados preliminares para comprobar la validez del forzamiento, se observó que los casos simulados en SWASH con el forzamiento de F₂ subestimaban en gran medida los valores de oleaje y corrientes. Por este motivo, observando los mapas de propagación de las otras herramientas, se decidió que el forzamiento de SWASH se realizase con los datos de F₁, reduciendo la magnitud de

Hs de dicho nodo al 95% de su valor original. El Tp también se escogió el mismo de F₁, pero la Dirección media, para tener en cuenta la transformación hacia la costa, se utilizó la de F₂.



Figura 27. Selección de nodo de forzamiento (diamantes rojos).

Forzamiento OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC.

Las series temporales de forzamiento de oleaje que se utilizaron para las campañas se presentan en la Figura 28.

En la primera de ellas, la variable Hs tiene un mínimo de 0.7 m y un máximo de 1.15 m. El período de pico varía entre los 4.25 s (al final de la serie) y los 12.12 s. Por último, la dirección media abarca el abanico de 165.5° a 255.4°. El valor más alto de Hs predicho sucedió el día 15 a las 10 horas. Este evento coincide también con el máximo valor de Tp de la serie (12.12 s) y una dirección media de 213.6°. Existe otro pico de Hs hacia el final de la serie, en concreto, el día 17 a las 15 horas. La dirección media en este momento es de 173.3°, siendo significativamente distinta a la vista para el máximo de la serie. Esto parece indicar que hay más de una familia de oleajes llegando a la zona en el período de la primera campaña.

En cuanto a la segunda campaña, Hs varía entre 0.42 m y 2.38 m. El Tp mínimo predicho es de 3.86 s y el máximo alcanza los 16.13 s. La dirección media muestra un gran cambio entre el inicio y el final de la serie, pasando de 132.9° a 276.5°. El evento más virulento sucedió a las 9 horas del día 24, coincidiendo el máximo valor de Hs con el de Tp. El correntímetro AWAC fue volcado justo al comienzo del temporal, cuando se registró el máximo de Tp y valores extremos de Hs.

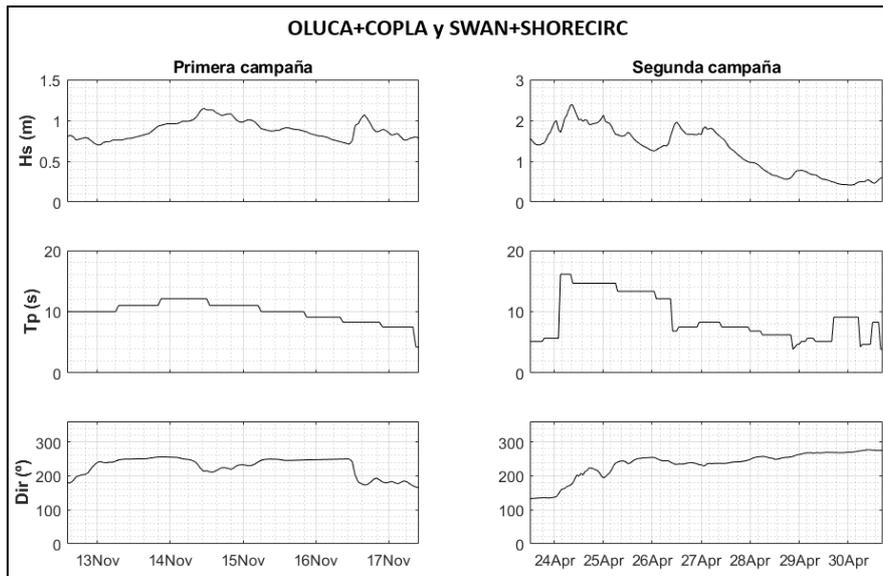


Figura 28. Series temporales de forzamiento para OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC en las dos campañas.

Forzamiento de SWASH.

Como se comentó previamente, el forzamiento que se utilizó para el SWASH fue una combinación de los datos de F_1 y F_2 . Las series finales de forzamiento de las dos campañas se presentan en la Figura 29.

Tras realizar la modificación en la variable H_s de F_1 e incluir la dirección de F_2 , el forzamiento de la primera campaña se compone de oleajes con alturas de ola entre 0.67 m y 1.09 m, períodos de pico entre 4.25 s y 12.12 s y direcciones en el abanico de 181.5° a 240.3° .

En el caso de la segunda campaña, H_s se encuentra entre 0.40 m y 2.26 m, T_p entre 3.86 s y 16.13 s y la dirección media entre 149.7° y 262.8° .

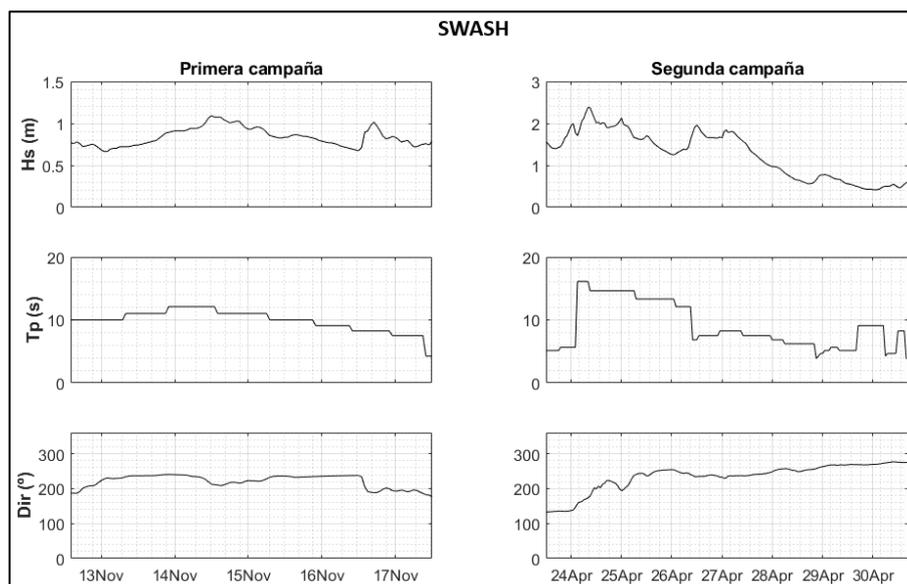


Figura 29. Series temporales de forzamiento para SWASH en las dos campañas.

6 Primera verificación: Resultados de modelación de la primera campaña.

6.1 OLUCA+COPLA.

Coste computacional = 1.5 min/caso

6.1.1 Correlación de valores y análisis de sensibilidad.

Como se comentó anteriormente, el montaje de OLUCA+COPLA se ejecutó de diferentes formas, comprobando la importancia del modelo de disipación por rotura. Las opciones que la herramienta permite son los modelos de Battjes & Janssen (1978), Thornton & Guza (1983) y Rattanapitikon & Shibayama (1998) (este último denominado como de Winyu y Tomoya). Las comparaciones entre los resultados modelados con cada uno y los medidos por los correntímetros se presentan en las Tabla 1 y 2. Las correlaciones obtenidas son bastante similares, por lo que se puede hacer una descripción general de los resultados de OLUCA+COPLA.

Oleaje.

1. Los datos simulados y extraídos en la ubicación del AWAC no muestran correlación con los medidos, con valores de R^2 muy próximos a 0. Tiende a darse una sobreestimación de los resultados y hay una dispersión muy grande en la nube de puntos.
2. En cuanto a los datos del AVD, la correlación es mayor que en el AWAC, con R^2 por encima de 0.6 en todos los casos. Existe una clara tendencia ascendente en los resultados modelados, de acuerdo con los medidos. No obstante, también tiende a sobreestimar el oleaje.
3. Por último, la correlación en la ubicación del EMC es inferior a la del AVD (R^2 próximo a 0.5). Existe una tendencia ascendente, similar a la que midió el correntímetro, pero hay una mayor dispersión en la nube que en el AVD. En este caso, no se puede hablar de una sobreestimación de los resultados, ya que, en el cómputo global, tras simular todos los casos, la tendencia es hacia una ligera subestimación.

Corrientes.

1. Los datos simulados en la ubicación del correntímetro AWAC no muestran ninguna correlación con los medidos. Los valores de velocidad de corriente son siempre muy bajos, subestimando los registros.
2. Englobando los resultados en AVD y EMC, sigue sin existir una correlación entre los datos simulados y los medidos, generalmente con valores más bajos. No obstante, ya se observan valores de una magnitud destacable (>0.1 m/s).

Tabla 1. Tabla de correlaciones de oleaje con los diferentes modelos de disipación por rotura de OLUCA+COPLA.

	AWAC			AVD			EMC		
	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE
Thornton	0.04	-0.17	0.24	0.62	-0.3	0.37	0.50	-0.19	0.27
Battjes	0.04	-0.17	0.24	0.61	-0.13	0.22	0.49	0.01	0.17
Winyu	0.04	-0.17	0.24	0.64	-0.22	0.30	0.52	-0.09	0.22

Tabla 2. Tabla de correlaciones de corriente con los diferentes modelos de disipación por rotura de OLUCA+COPLA.

	AWAC			AVD			EMC		
	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE
Thornton	0.00	0.11	0.13	0.08	0.00	0.10	0.00	-0.03	0.09
Battjes	0.03	0.11	0.14	0.04	0.01	0.10	0.00	0.05	0.09
Winyu	0.02	0.11	0.14	0.04	0.00	0.10	0.00	-0.04	0.09

A pesar de las similitudes mostradas entre los tres modelos de disipación por rotura, se ha seleccionado como mejor opción el de Winyu y Tomoya, cuyas correlaciones se muestran en la Figura 30. Esto se ha determinado por la ligera mayor correlación que hay en los resultados de oleaje. Si bien es cierto que, en cuanto a las corrientes, los resultados no muestran una mejoría, ninguno de los modelos lo hace, por lo que no sería un buen criterio de selección.

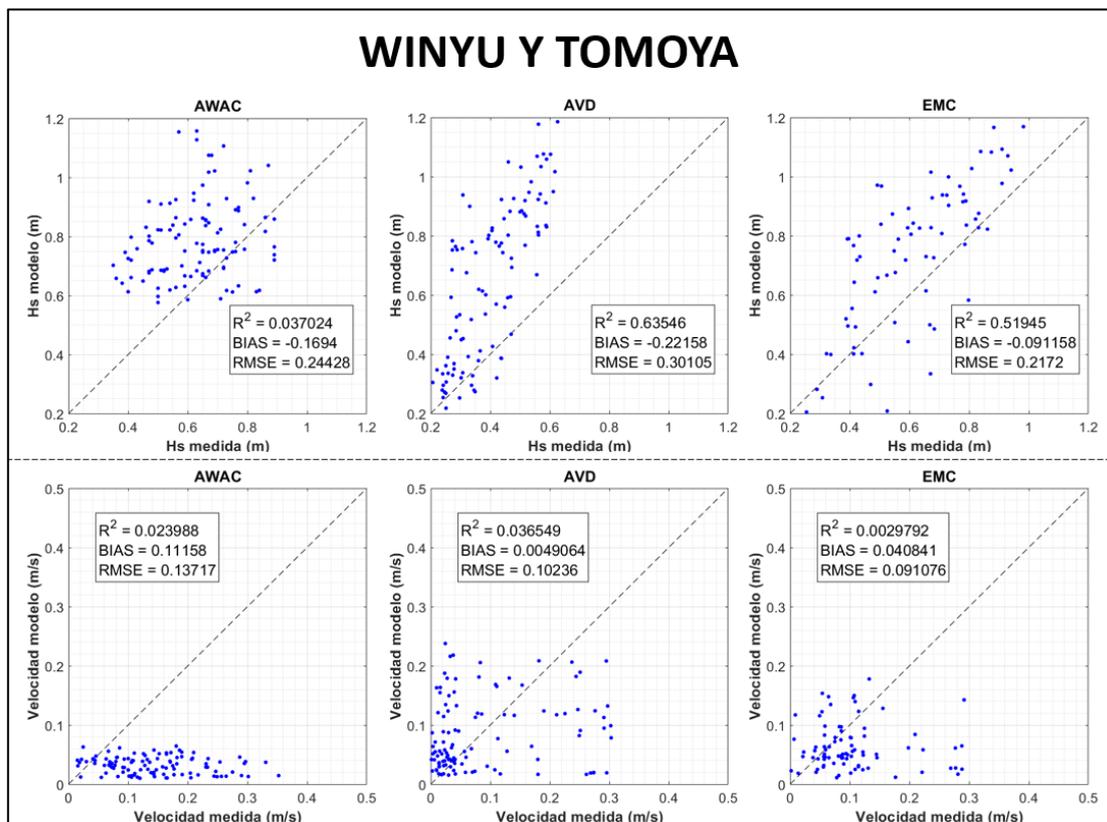


Figura 30. Correlación de oleaje y corrientes en cada uno de los correntímetros con el modelo de disipación por rotura de Winyu y Tomoya.

6.1.2 Análisis de procesos.

Tras analizar los resultados de cada uno de los modelos de disipación y establecer al de Winyu y Tomoya como la mejor opción, a continuación, se observará la capacidad de este montaje para simular los procesos presentes en la zona de estudio.

Oleaje.

Analizando las series temporales de oleaje simuladas en cada uno de los correntímetros en comparación con los datos medidos y los registros del nivel del mar (Figura 31), se observa que:

1. Comenzando por el correntímetro AWAC, la modelación con esta herramienta no refleja la oscilación dependiente del nivel del mar que se registró en el instrumento.
2. En el AVD, durante las pleamares, la herramienta sobreestima en gran medida las mediciones, provocando la sobreestimación que se observó en el análisis de resultados. No obstante, durante las bajamares, los valores modelados son más próximos a los medidos
3. Por último, en la ubicación del EMC, la herramienta tiende a sobreestimar durante las pleamares, aunque en menor medida que en el AVD. En los períodos de media marea, el modelo consigue reproducir con bastante similitud los datos medidos. Durante las bajamares, cuando el correntímetro se queda en seco, existen datos simulados, pero de una magnitud muy baja.

Para continuar con el análisis de los procesos que la herramienta es capaz de simular, se puede hacer uso también de los mapas de propagación. Por ello, se han seleccionado un instante de pleamar (14/11/2020 1:00) y otro de bajamar (14/11/2020 7:00), de características similares (Figura 31) .

Observando ambos mapas de propagación, se observa que, en la malla general, la transformación del oleaje se basa en una reducción de la altura de ola y una ligera modificación en la dirección al aproximarse a la costa. Ya en la malla de detalle, al pasar sobre la barra que se mencionó en el apartado 4.1, el oleaje comienza a mostrar patrones complejos, con zonas de concentración y sombra. En concreto, el correntímetro AWAC se encuentra en una zona de concentración, pero muy próximo a una de sombra. Observando esto, surge la hipótesis de que la dependencia de los valores de Hs con el nivel del mar no se deba a la rotura del oleaje, sino a un cambio en dichos patrones, provocando que el AWAC se encuentre en una zona de concentración o de sombra, dependiendo del estado mareal. No obstante, la herramienta no es capaz de simular dicho proceso y no se puede constatar por carencias de datos.

Continuando con los correntímetros AVD y EMC, en el caso de bajamar, se observa que ambos están dentro de la zona de rompientes, mientras que, en la pleamar, ambos están en una zona de asomeramiento, aumentando las alturas de ola por el peralte del oleaje. La rotura sucede muy cerca de la costa, sobre todo en el

caso de pleamar. Esto es indicativo de dos tipos de estados morfodinámicos, dependiendo del estado mareal.

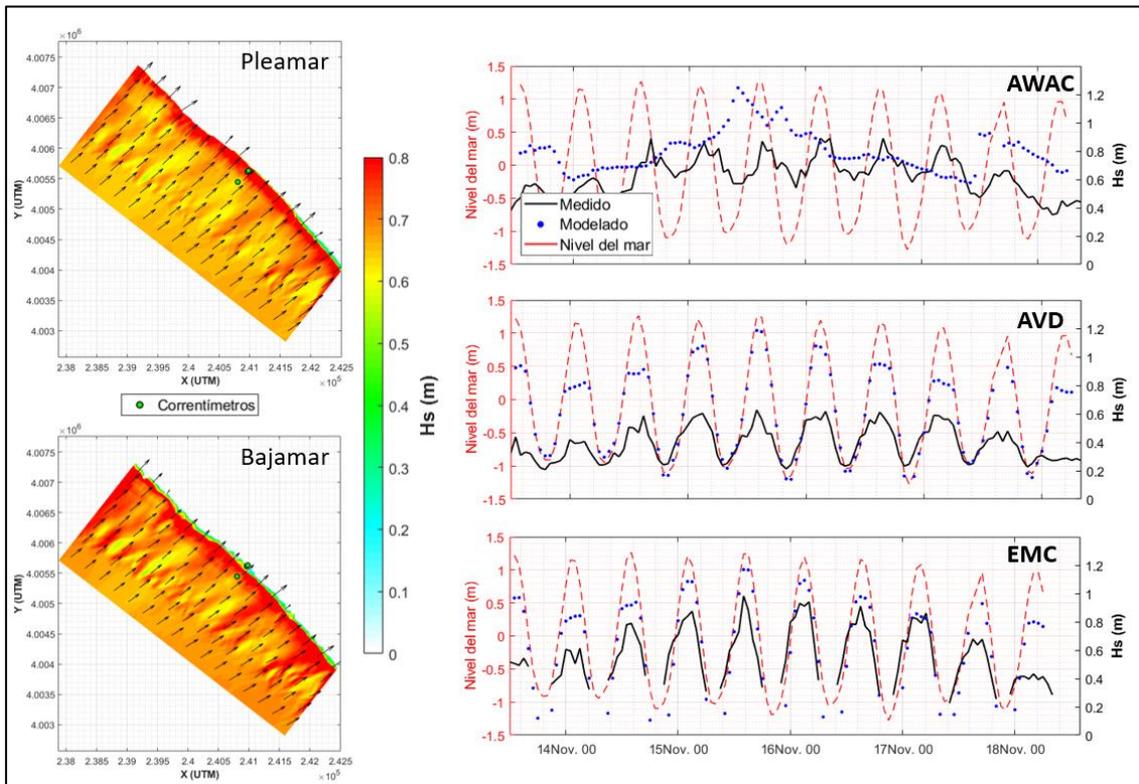


Figura 31. Mapas de propagación en pleamar y bajamar y series temporales de oleaje simulados, comparado con los medidos y el nivel del mar. OLUCA+COPLA, primera campaña.

Corriente.

Para los procesos relacionados con el sistema de corrientes, puede realizarse el mismo procedimiento que para el oleaje (Figura 32). Comenzando por las series temporales:

1. Las corrientes simuladas en el correntímetro AWAC muestran una oscilación periódica dependiendo del nivel del mar. No obstante, los pequeños picos que hay en los datos modelados no siempre se corresponden con los picos medidos.
2. En el caso del AVD, existen ciertos momentos, como, por ejemplo, el primer pico de velocidad de corriente, en los que la tendencia en los datos modelados se corresponde con los medidos. Sin embargo, esto no siempre sucede así, por lo que no se puede constatar que los procesos de las corrientes estén bien modelados.
3. Lo mismo sucede en el EMC. Pese a que hay ciertos momentos en los que los picos se correspondan, no existe una correlación clara en los procesos.

Teniendo en cuenta el mapa de corrientes, en la bajamar se observan varios tramos de la playa en los que la corriente es de una intensidad mayor, estando, uno

de ellos, en la ubicación de los correntímetros. En las pleamares, también ocurren segmentos de mayor intensidad, pero, en este caso, el que coincide con los correntímetros no es de una gran magnitud. Además, se observa que no se han reproducido los dos patrones de corrientes que en la realidad han medido los correntímetros

Se puede destacar también que, pese a no observarse la corriente de retorno que parecía registrar el AVD, existen determinadas zonas en las que, corrientes de una magnitud muy débil, se desplazan alejándose de la costa. No obstante, ninguna de estas zonas se corresponde espacialmente con la localización de los instrumentos.

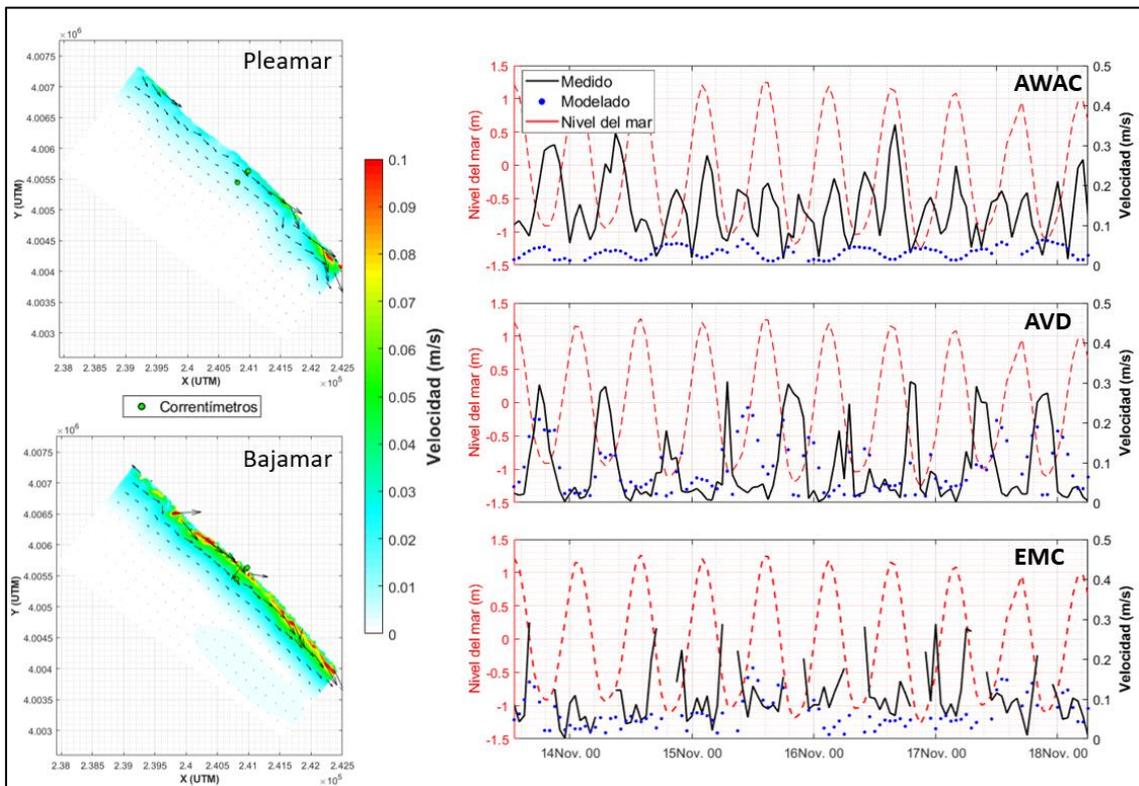


Figura 32. Mapas de corrientes en pleamar y bajamar y series temporales de corriente simuladas, comparada con las medidas y el nivel del mar. OLUCA+COPLA, primera campaña.

Teniendo en cuenta este análisis de procesos, con el fin de intentar mejorar los resultados, se ha realizado otra propagación en la que se ha modificado el nivel del mar, aumentándolo en 0.2 m. Esto se ha pensado intentado conseguir que los oleajes que llegan al AVD durante las pleamares sean de menor magnitud y que se peralten entre dicho correntímetro y el EMC. En las Tabla 3 y 4, se muestra la comparación entre las correlaciones del montaje de Winyu y Tomoya con el nivel medio y el modificado. Se contempla que las correlaciones son ligeramente mejores al aumentar al nivel del mar. No obstante, también sucede que se sobreestiman más los resultados. Por este motivo, para los siguientes análisis, se ha continuado con el montaje de Winyu y Tomoya con el nivel medio del mar original.

Tabla 3. Tabla de correlaciones entre datos de oleaje medidos y simulados con Winyu y Tomoya y el nivel del mar original y modificado. OLUCA+COPLA, primera campaña.

	AWAC			AVD			EMC		
	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE
N.M.M.	0.04	-0.17	0.24	0.64	-0.22	0.30	0.52	-0.09	0.22
N.M.M.+0.2	0.04	-0.17	0.24	0.64	-0.28	0.33	0.59	-0.13	0.22

Tabla 4. Tabla de correlaciones entre datos de corriente medidos y simulados con Winyu y Tomoya y el nivel del mar original y modificado. OLUCA+COPLA, primera campaña.

	AWAC			AVD			EMC		
	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE
N.M.M.	0.02	0.11	0.14	0.04	0.00	0.10	0.00	-0.04	0.09
N.M.M.+0.2	0.03	0.11	0.14	0.17	0.00	0.09	0.00	-0.04	0.09

6.2 SWAN+SHORECIRC.

Coste computacional = 3.0 min/caso

6.2.1 Correlación de valores.

Oleaje.

El montaje realizado para SWAN+SHORECIRC ha permitido obtener unos resultados de oleaje que se asemejan, aceptablemente, a los medidos (Figura 33):

1. En primer lugar, con esta herramienta se ha obtenido una correlación mayor entre los datos del AWAC que, aunque el valor de R² no es demasiado alto (0.38), se observa una tendencia ascendente. Pese a esto, la nube de puntos muestra una dispersión notable, con una sobreestimación casi generalizada de los resultados.
2. En cuanto al correntímetro AVD, a pesar de la sobreestimación que ocurre por un desajuste con respecto a la diagonal, la correlación que hay entre los datos medidos y los del modelo es bastante buena, con un R² de 0.72.
3. Finalmente, los datos en la ubicación del EMC no presentan dicho desajuste con respecto a la diagonal y, la correlación es similar a la del AVD (R² = 0.70).

Corriente.

Pese a los buenos resultados, en lo que al oleaje se refiere, las corrientes simuladas no presentan una correlación con las medidas. Los valores de R² en todos los correntímetros son prácticamente nulos (Figura 33).

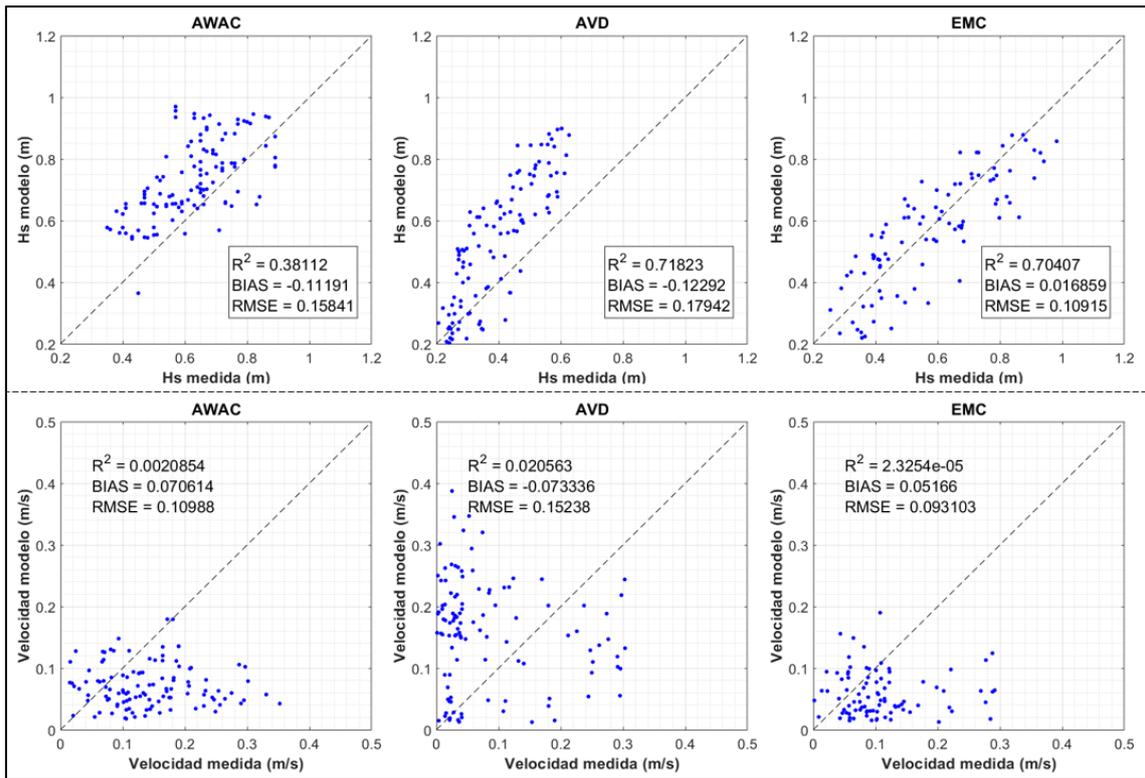


Figura 33. Correlación de oleaje y corrientes en cada uno de los correntímetros. SWAN+SHORECIRC, primera campaña.

6.2.2 Análisis de procesos.

Oleaje.

La modelación con SWAN+SHORECIRC ha permitido simular algunos procesos relacionados con el oleaje importantes para la predicción. En la Figura 34 se observan las series temporales comparadas, de las cuales se extrae que:

1. Se ha conseguido simular, en determinados momentos, la dependencia de la altura de ola con el nivel del mar en la ubicación del AWAC.
2. En la ubicación del AVD, al igual que ocurría con la herramienta anterior, el modelo sobreestima el oleaje durante las pleamares, pero en las bajamares los resultados son muy similares.
3. En cuanto al EMC, la herramienta ha permitido simular, casi a la perfección, la oscilación en la altura de ola en función del nivel del mar.

Los mapas de propagación que se han obtenido para esta herramienta se corresponden con las mismas fechas comentadas para OLUCA+COPLA y muestran que, durante las bajamares, el correntímetro AWAC se encuentra justo en el límite de la zona de rompientes, que podría explicar la oscilación en los valores de Hs. En las pleamares, los correntímetros están situados en una zona de concentración y, por esa razón, muestran unos valores de Hs mayores en la zona de rompientes.

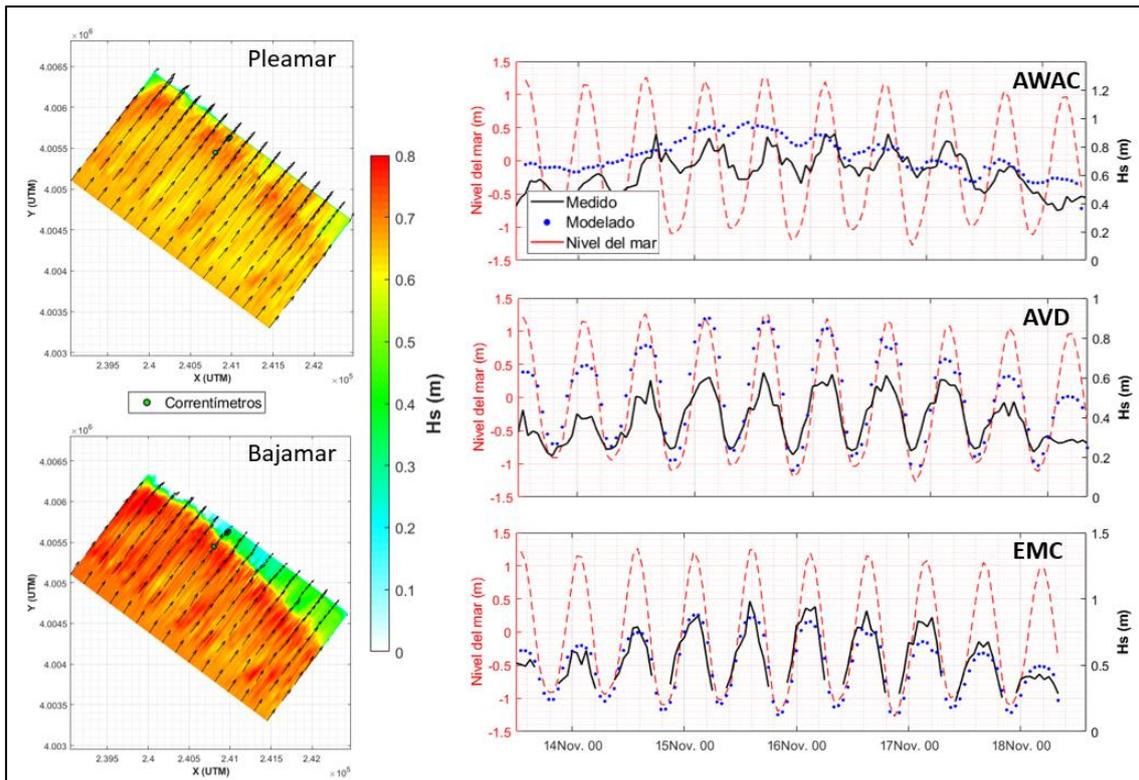


Figura 34. Mapas de propagación en pleamar y bajamar y series temporales de oleaje simulado, comparado con las medidas y el nivel del mar. SWAN+SHORECIRC, primera campaña.

Corriente.

En cuanto a los procesos de los patrones de corrientes:

1. En la ubicación del correntímetro AWAC, las corrientes simuladas muestran una fluctuación casi periódica, con máximos durante las bajamares.
2. En el AVD se obtuvieron las corrientes más intensas, cuyos picos suceden durante las pleamares, al contrario que se veía en el AWAC y también en contraposición con lo medido.

Los mapas de corrientes en bajamar y en pleamar no muestran un cambio en la dirección dependiente del nivel del mar. Lo que se observa es un chorro de corriente que va desde el NW hacia el SE, es decir, hacia los correntímetros, pero que se desacelera antes de llegar a estos. No obstante, en la pleamar y muy próximo a la zona donde están los correntímetros, se observa una corriente que se aleja de la playa, similar a una corriente de retorno, que se podría relacionar con el registro del AVD.

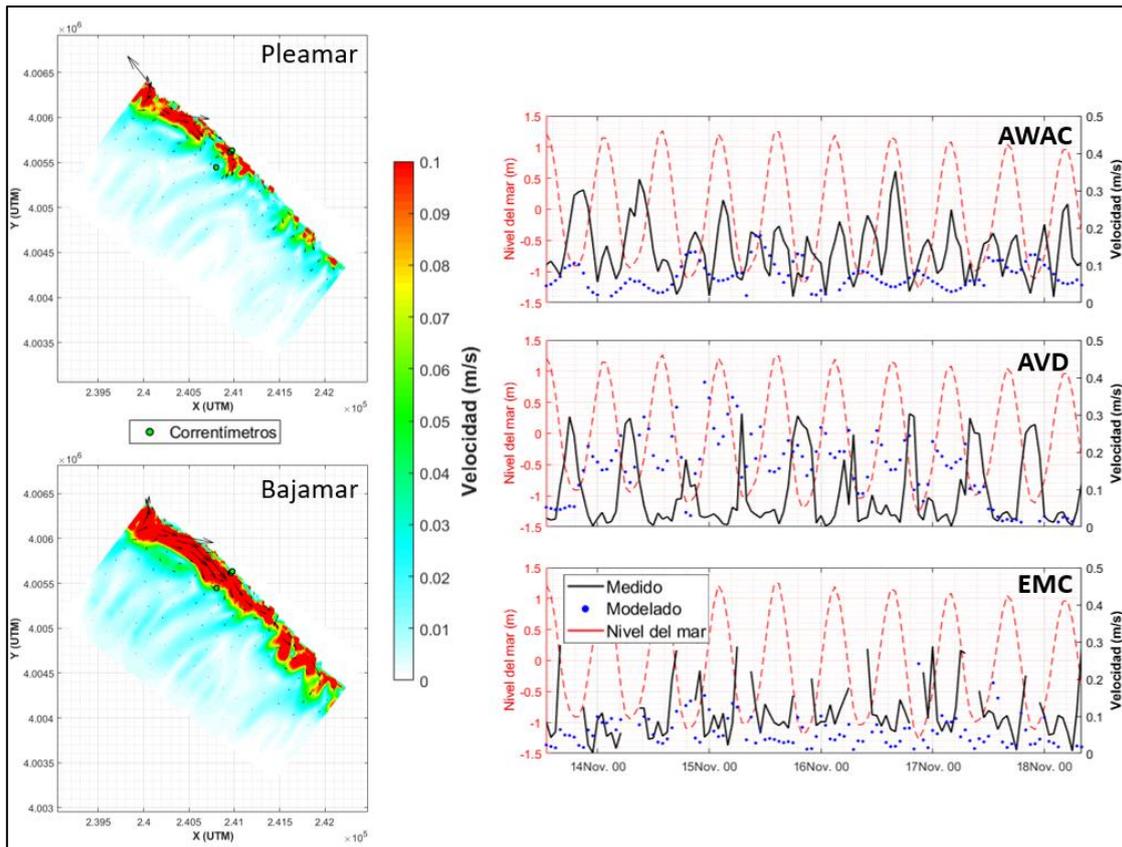


Figura 35. Mapas de corriente en pleamar y bajamar y series temporales de corrientes simuladas, comparadas con las medidas y el nivel del mar. SWAN+SHORECIRC, primera campaña.

6.3 SWASH.

Coste computacional = 20.0 min/caso

6.3.1 Correlación de valores.

Dada la inestabilidad de SWASH, no se han ejecutado todos los casos por errores durante las simulaciones. Los instantes que sí se han podido modelar, se presentan en la Figura 36.

Oleaje.

1. La correlación en el correntímetro AWAC es muy baja, con una nube muy dispersa, aunque sí parece haber una tendencia ascendente próxima a la diagonal.
2. En el AVD, parece existir una correlación, pero con una subestimación casi generalizada.
3. Por último, en el EMC, existe una tendencia ascendente, con una pendiente similar a la diagonal, pero esta desplazada hacia valores más bajos.

Corriente.

De forma global, no existe una correlación entre los valores de corriente simulados y los medidos, ya que existe una dispersión muy grande.

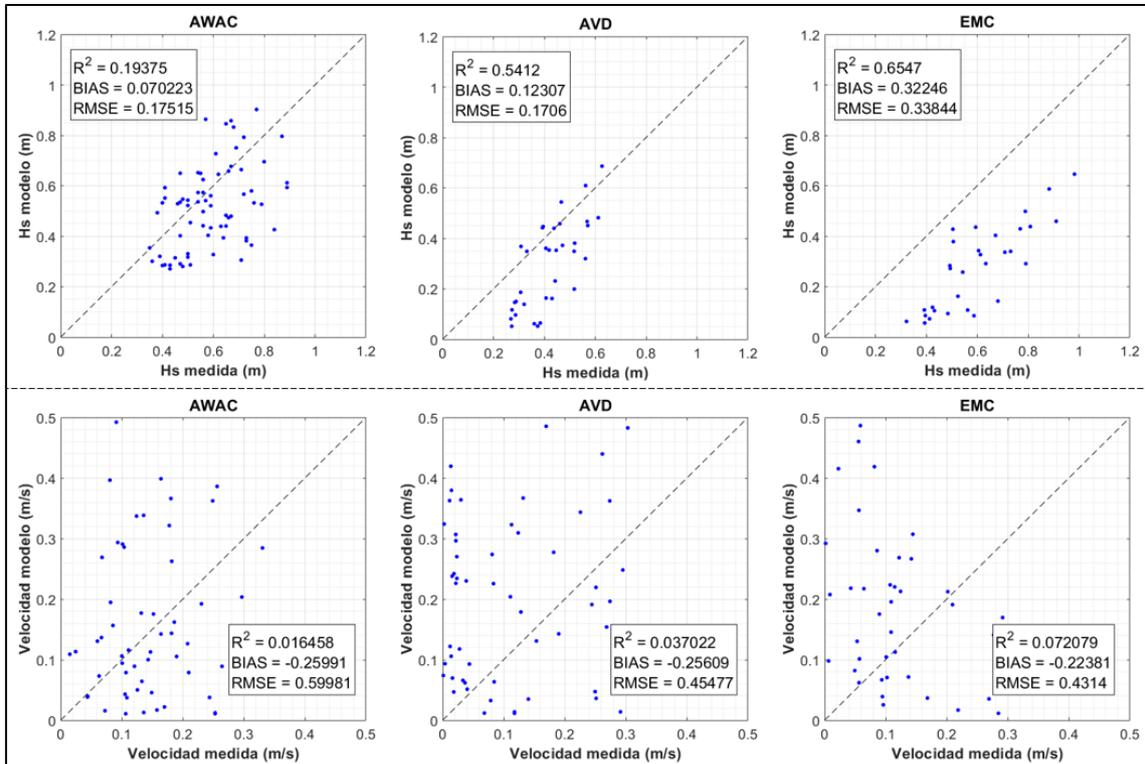


Figura 36. Correlación de oleaje y corrientes en cada uno de los correntímetros. SWASH, primera campaña.

6.3.2 Análisis de procesos.

Oleaje.

Observando las series temporales de oleaje, los instantes simulados no muestran de forma consistente la dependencia de Hs con el nivel del mar en la ubicación del correntímetro AWAC. No obstante, dicho proceso sí se observa en el AVD y EMC. De forma generalizada, el tramo final de la serie simulada muestra una mayor subestimación que el período anterior (Figura 37).

Corriente.

En cuanto a las corrientes, las series temporales no permiten dilucidar ningún proceso que se pueda correlacionar de alguna forma con los datos medidos o con el nivel del mar (Figura 38).

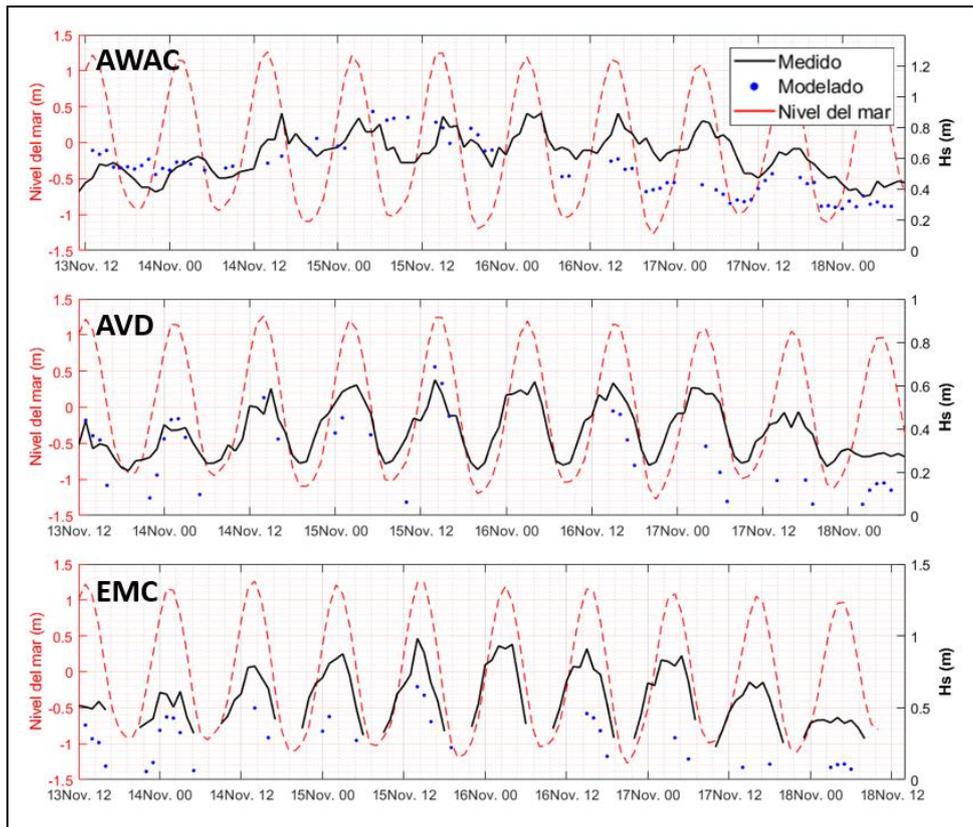


Figura 37. Series temporales de oleaje simulado, comparado con las medidas y el nivel del mar. SWASH, primera campaña.

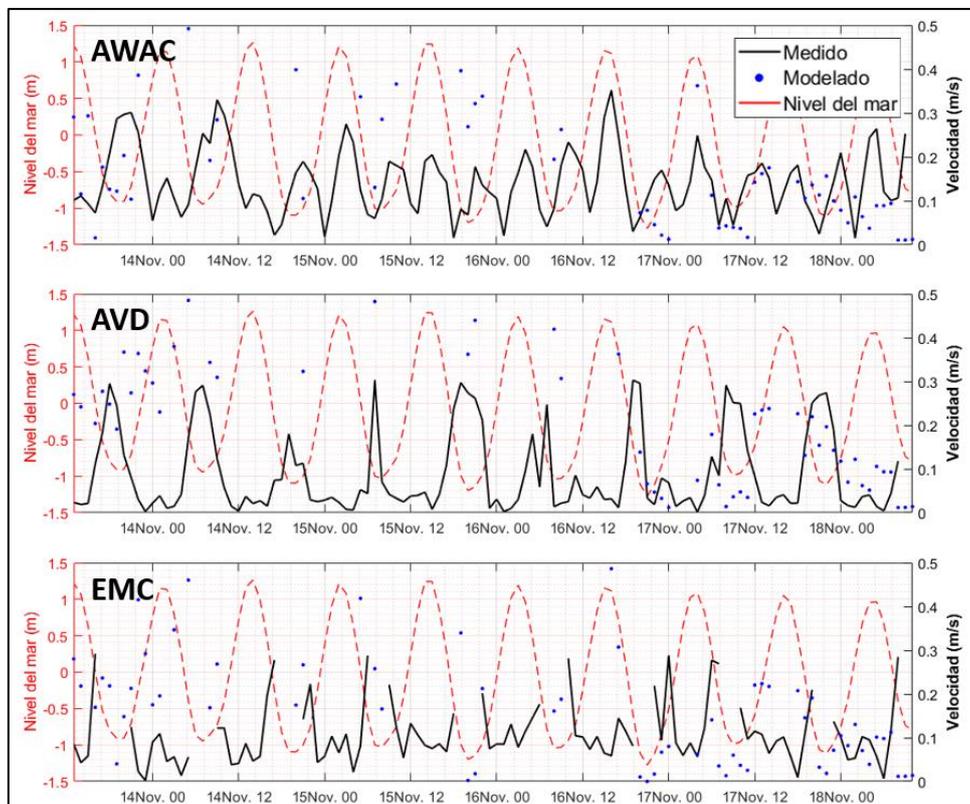


Figura 38. Series temporales de corrientes simuladas, comparadas con las medidas y el nivel del mar. SWASH, primera campaña.

7 Segunda verificación: Resultados de la segunda campaña.

Como verificación de las capacidades de los montajes realizados, en esta parte del documento se analizarán los resultados de la simulación de la segunda campaña, comparando los resultados con los medidos por los correntímetros AWAC y AVD. Este análisis será más escueto que el realizado para la simulación de la primera campaña, ya que consiste en una comprobación de esa.

7.1 OLUCA+COPLA.

La segunda campaña se ha modelado con el montaje de OLUCA+COPLA con el criterio de Winyu y Tomoya y con el nivel medio del mar como referencia, como se había comentado. Por desgracia, debido a las limitaciones que esta herramienta presenta con respecto a la dirección del oleaje, no se han podido propagar los casos en los que hay medidas del correntímetro AWAC. Por este motivo, solo se analizarán los resultados en el correntímetro AVD.

Los resultados obtenidos en la ubicación del AVD se presentan en la Figura 39. Comenzando, poniendo el foco en el oleaje, la correlación que se ha obtenido es mejor que el obtenido para las mediciones de la primera campaña, con un R^2 de 0.76. No obstante, se produce una sobreestimación generalizada de Hs. Esta es mucho mayor durante las pleamares, pero aún en las medias mareas y en las bajamares, suelen darse valores por encima de los medidos.

En cuanto a las corrientes, al igual que se había observado en la primera campaña, no se ha determinado ninguna correlación entre los datos medidos y los simulados. Los picos de velocidad simulados suelen darse durante las bajamares. Este suceso ocurre en algunas ocasiones en los datos medidos, pero no de forma generalizada.

7.2 SWAN+SHORECIRC.

En cuanto a la simulación de la segunda campaña con SWAN+SHORECIRC, sí se han podido propagar los casos en los que hay registros del AWAC. Estos se contienen en la Figura 40. La correlación obtenida para el oleaje en dicho período es bastante buena ($R^2 = 0.63$), aunque se produce una sobreestimación al final del registro del AWAC, ya que la tormenta predicha comenzó antes que la real. No obstante, la correlación en la corriente es bastante peor, no llegando a simular el pico de corriente que se muestra antes del comienzo de los oleajes intensos.

En el AVD, la correlación es similar a la observada en la primera campaña ($R^2 = 0.75$) (Figura 41). Sin embargo, la sobreestimación es mayor que entonces, tanto

en bajar mar como en pleamar. En las corrientes, al igual que se ha ido viendo a lo largo del documento, no se ha observado ninguna correlación ni en valores ni en patrones.

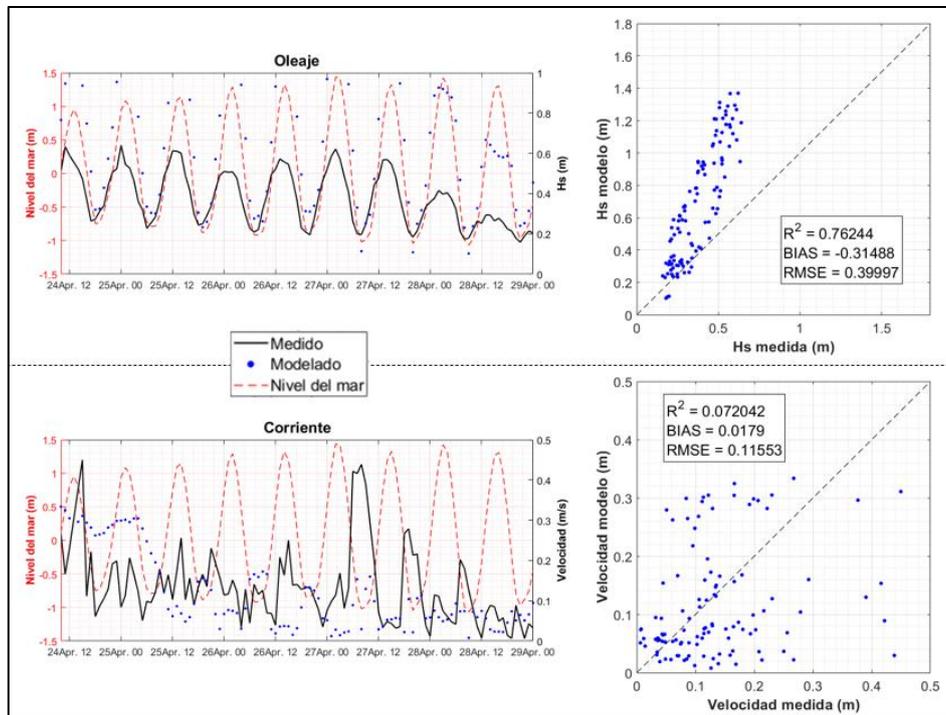


Figura 39. Correlación y comparación de series temporales de oleaje y corriente en AVD. OLUCA+COPLA, segunda campaña.

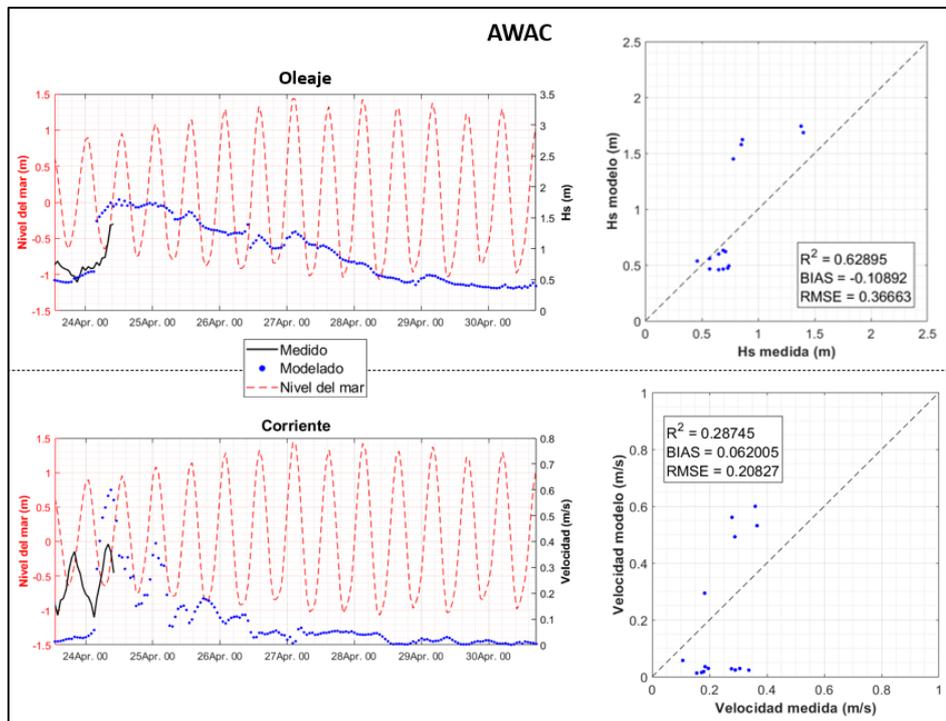


Figura 40. Correlación y comparación de series temporales de oleaje y corriente en AWAC. SWAN+SHORECIRC, segunda campaña.

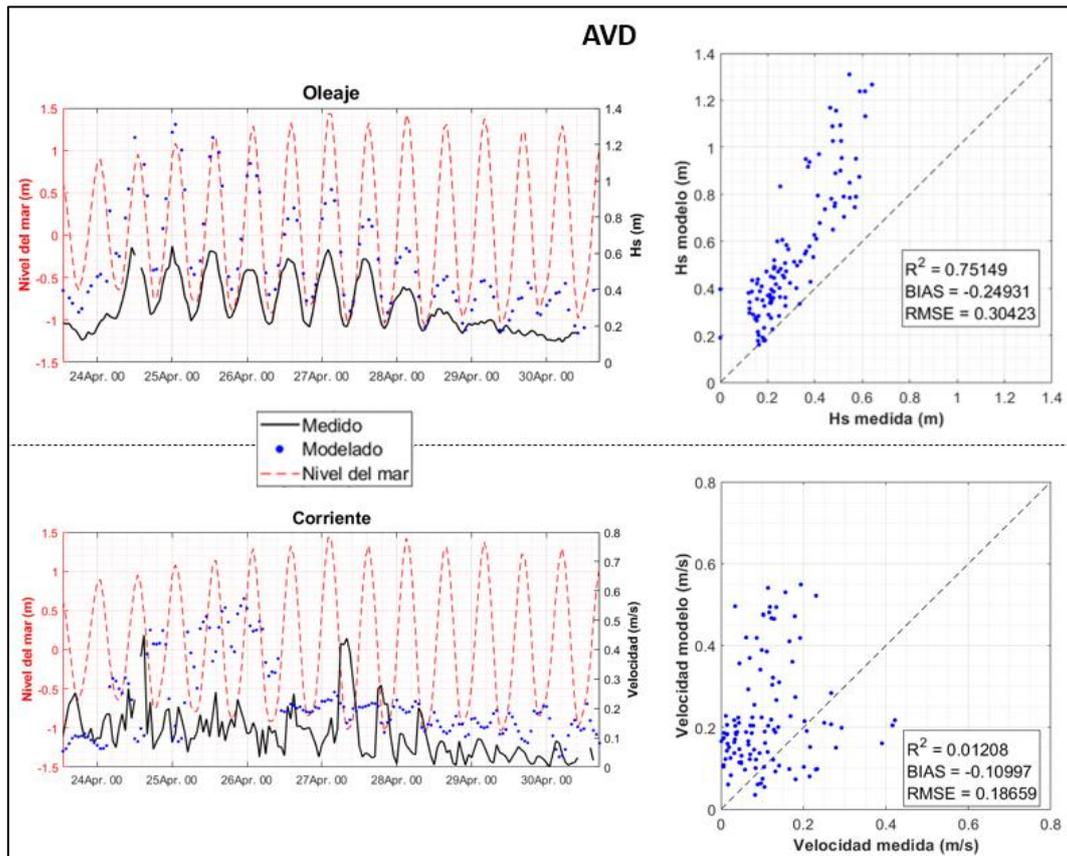


Figura 41. Correlación y comparación de series temporales de oleaje y corriente en AVD. SWAN+SHORECIRC, segunda campaña.

7.3 SWASH.

Las simulaciones con SWASH también permitieron realizar las propagaciones en el intervalo de tiempo registrado por el AWAC. No obstante, pese al valor de R^2 de 0.90 que se obtiene en este correntímetro, en la serie temporal de la Figura 42 se observa que los resultados del modelo no se asemejan a los medidos. Las corrientes tampoco han mostrado valores a los registrados.

En cuanto a la ubicación del AVD, los resultados muestran una correlación muy mala con los valores medidos ($R^2 = 0.16$) (Figura 43). En algunos instantes se observa una pequeña tendencia similar a la medida, en la que los valores más altos se dan en los momentos de pleamar. Sin embargo, aún en dichos períodos hay una subestimación generalizada.

Cabe destacar también que el modelo no ha conseguido reproducir la mayoría de los instantes de oleajes intensos por problemas de inestabilidad.

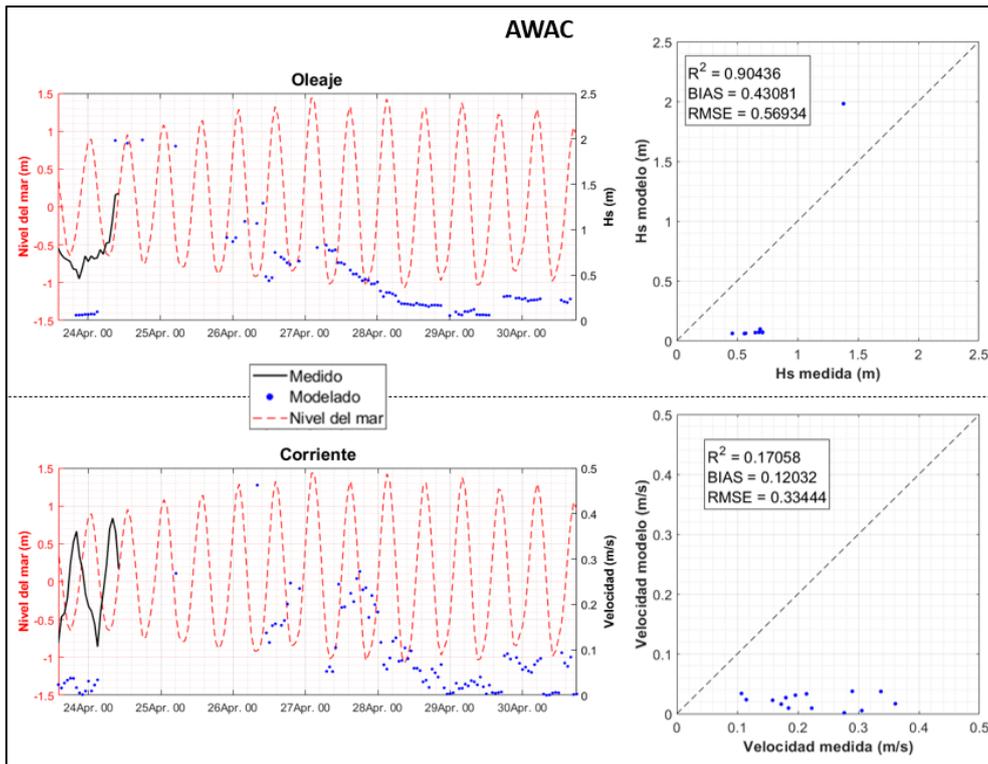


Figura 42. Correlación y comparación de series temporales de oleaje y corriente en AWAC. SWASH, segunda campaña.

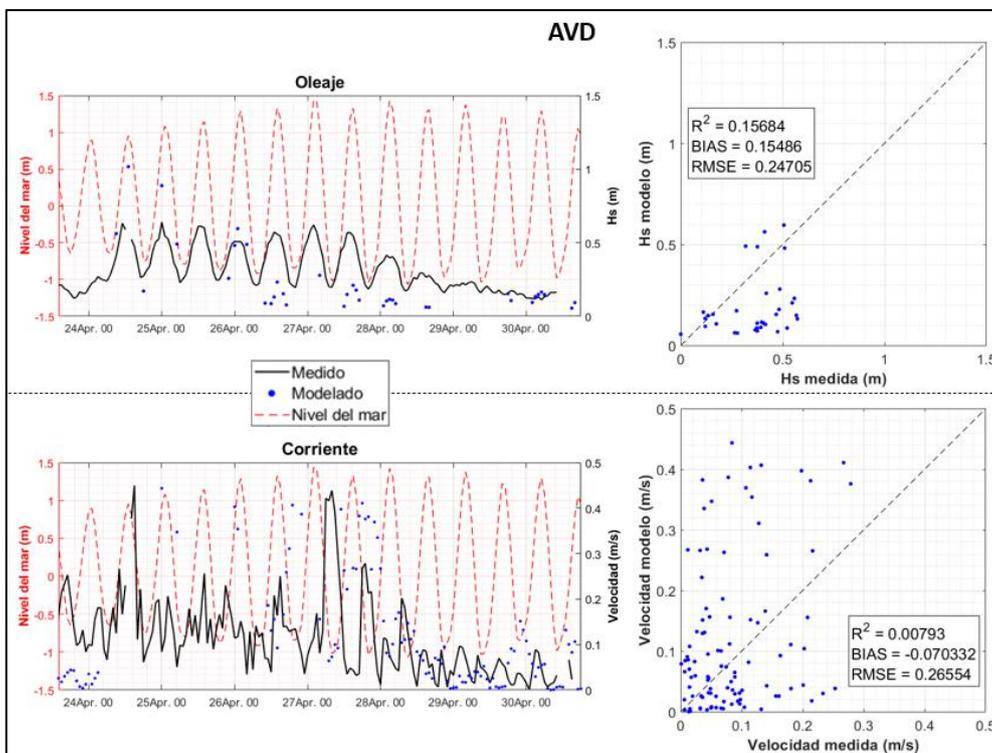


Figura 43. Correlación y comparación de series temporales de oleaje y corriente en AVD. SWASH, segunda campaña.

8 Cálculo y comparación de MSI.

En este capítulo del documento, se describe la metodología de obtención del *Modified Surf Index* para los casos ejecutados con las herramientas OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC. Debido a la carencia de resultados de dirección del oleaje y las irregularidades que se presentaron para las ejecuciones de SWASH, no se ha realizado este paso para dicho modelo.

8.1 Parámetros relevantes y obtención del MSI.

Como ya se comentó en el apartado 1.1.2, existen una serie de variables de la zona de rompientes que repercuten, en gran medida, en la viabilidad de un desembarco anfibio. Por este motivo, el MSI intenta servir como apoyo en la toma de decisiones de estas operaciones, a partir de dichos parámetros.

La metodología de obtención del MSI consiste en el uso de diferentes tablas de corrección para cada variable, obteniendo valores para una serie de parámetros físicos en rompientes. Una vez se han aplicado todas las correcciones, estos parámetros reciben, cada uno, un valor propio de entrada, representativo de su peso en el MSI. Los valores de entrada se suman, obteniendo el MSI final.

En la Tabla 5 se identifican los parámetros físicos que se utilizan en este documento, junto con un ejemplo de modificación y obtención de los valores de entrada, hasta obtener el valor final de MSI. Se debe puntualizar que, para la variable T_b que se explicita, se ha utilizado T_p .

Tabla 5. Tabla de ejemplo de obtención de MSI, con la descripción de los parámetros físicos en rompientes.

Parámetros físicos en rompientes	Modificación	Entrada
ALFA Altura de ola significativa en rompiente, en pies (H_{sb}) Ej. $H_{sb} = 4.5$ ft	No se modifica, el valor es el mismo que H_{sb}	+4.5
CHARLIE Período en rotura, en s (T_b) Ej. $T_b = 7$ s	Valor de la tabla correspondiente a $H_{sb} = 4.5$ m y $T_b = 7$ s	+1.6
DELTA Tipo de rotura (I_r) Ej. 70 % Decrestamiento 30% Voluta	Se introduce el valor de la tabla con un mayor porcentaje. En este caso, se busca el valor para un 70% de olas en decrestamiento, con $H_{sb} = 4.5$ m	-2.8
ECHO Ángulo de incidencia a la costa en rotura, en ° (α_b) Ej. $\alpha_b = 15^\circ$	Valor de la tabla correspondiente a $H_{sb} = 4.5$ m y $\alpha_b = 15^\circ$	+2.4
FOXTROT Corriente litoral, en nudos (V) Ej. $V = 0.9$ kt	Valor de la tabla correspondiente a $V = 0.9$ kt	+2.7
MSI = 8.4		

Cada tipo de embarcación anfibia tiene sus propios rangos de MSI con los que definir la viabilidad de su desembarco. Como ejemplo, el americano LCM-8 establece un desembarco favorable con un MSI igual o menor a 7. Entre 7 y 8, este se considera marginal y por encima de 8 se descarta la posibilidad de desembarco.

8.2 Resultados de MSI.

Los resultados del MSI se han evaluado para las dos campañas, a partir de un evento de pleamar y uno de bajamar, en cada una de ellas. En este apartado, se verán las comparaciones de los mapas obtenidos con las dos herramientas que se han analizado y se analizará la importancia de los parámetros físicos en puntos de control, próximos a la zona de rompientes.

8.2.1 Primera campaña.

Los instantes que se han escogido para la evaluación del MSI en la primera campaña y que cuentan con unas condiciones de forzamiento similares, son:

- BAJAMAR: 14/11/2020 7:00
- PLEAMAR: 14/11/2020 1:00

En la Figura 44 se puede analizar el primero de estos, donde se observa que ambos mapas muestran valores de MSI parecidos a lo largo de la extensión. Si bien esto es cierto, OLUCA+COPLA da resultados ligeramente más altos y definidos en la zona de rompientes. Además, con SWAN+SHORECIRC se obtienen valores levemente más altos en las zonas de concentración y sombra de oleaje tras el paso por la barra. En cuanto al análisis más en detalle en los puntos de control, los valores obtenidos con OLUCA+COPLA son mayores en todos ellos. El parámetro físico con mayor importancia es ALFA (referente a H_{sb}) en todos los casos excepto en el punto C_1 de SWAN+SHORECIRC. Dicho punto, se encuentra en un tramo de la playa con una corriente muy intensa, provocando que FOXTROT es el más importante. Con la excepción de dicho caso, ECHO es el segundo parámetro con más peso del cálculo de MSI, por lo que la omisión de este parámetro en una estimación con SWASH resultaría en valores subestimados notablemente. Por último, cabe destacar la importancia que DELTA tiene para reducir la magnitud del MSI. En especial, en los resultados de OLUCA+COPLA, este parámetro llega a reducir hasta en 2 puntos la magnitud del MSI, por lo que el tipo de rotura cobra una gran importancia.

En cuanto a los resultados en pleamar, los resultados se contienen en la Figura 45. Los mapas de MSI presentan, a nivel global, valores inferiores a los comentados para la bajamar, con una magnitud aproximada de 3. Más cerca de la costa, en la zona de rompientes, la magnitud aumenta, pero no llega a la misma magnitud que se vio en bajamar. En cuanto a los puntos de control, ALFA vuelve a ser el parámetro más importante, esta vez sí, en todos los casos, seguido por ECHO. FOXTROT vuelve a presentar un valor importante en el punto C_1 de SWAN+SHORECIRC, pero siendo de la mitad que durante las bajamares.

Se destaca también que, CHARLIE, referente al período, es un parámetro con una importancia muy baja en el cálculo del MSI.

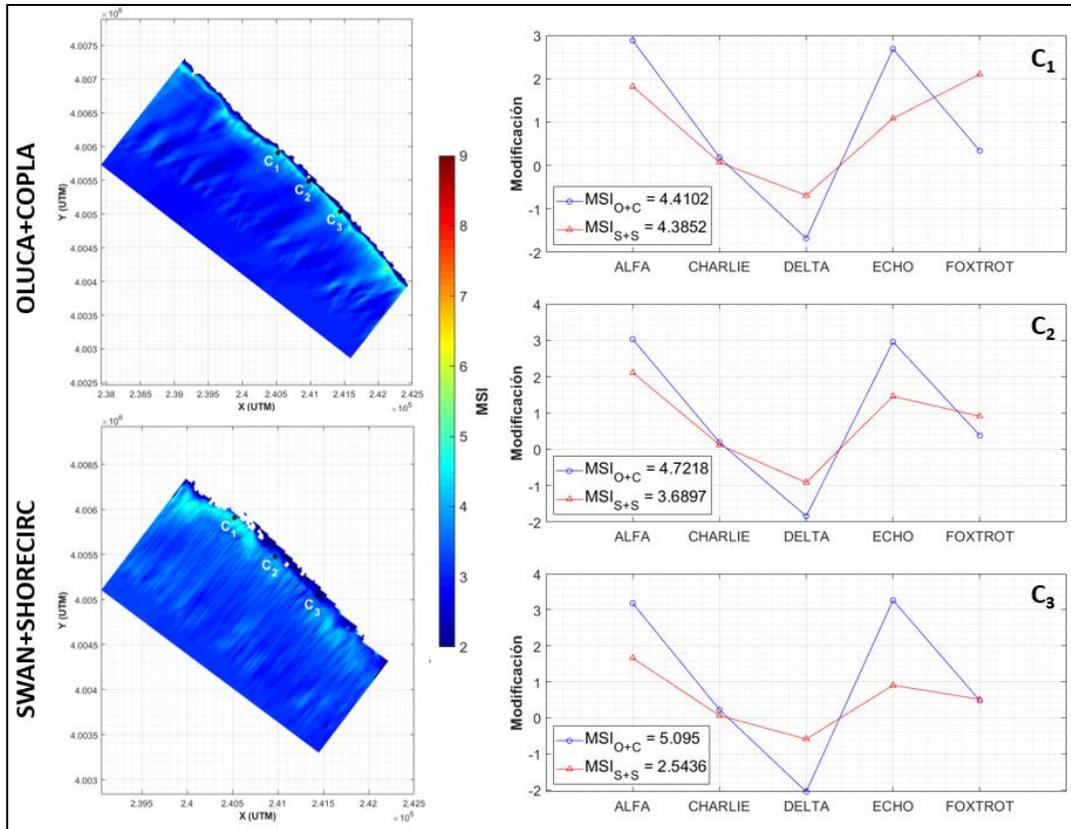


Figura 44. MSI en bajamar, primera campaña.

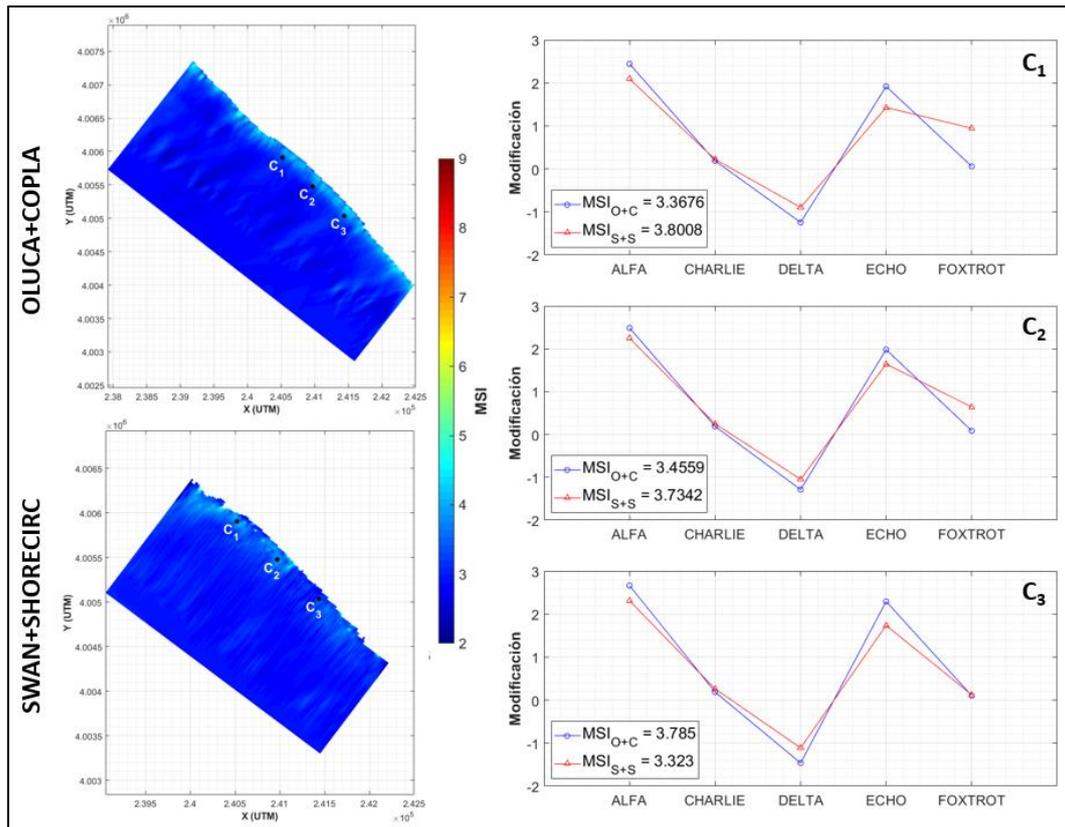


Figura 45. MSI en pleamar, primera campaña.

8.2.2 Segunda campaña.

Para la evaluación del MSI de la segunda campaña, se han escogido dos instantes de unas condiciones de forzamiento similares, durante el período de oleajes intensos:

- BAJAMAR: 24/04/2020 18:00
- PLEAMAR: 24/04/2020 13:00

El instante de bajamar está recogido en la Figura 46. Los valores de MSI obtenidos con OLUCA+COPLA muestran valores más altos que con SWAN+SHORECIRC. Debido a la existencia de la barra comentada en la descripción de la batimetría, OLUCA+COPLA reflejan zonas claras en las que el desembarco es menos favorable, con patrones de MSI más altos que en las regiones adyacentes. Este efecto, aunque parece visible, no es tan claro en las simulaciones de SWAN+SHORECIRC. Además, OLUCA+COPLA indican una zona de rompientes más peligrosa que SWAN+SHORECIRC. En cuanto a los puntos de control establecidos, es importante resaltar que el parámetro ECHO es el que aporta un mayor valor al MSI, excepto en el punto C₃ de SWAN+SHORECIRC, por lo que la dirección incidente del oleaje durante la segunda campaña podría provocar grandes problemas para el desembarco anfíbio. El segundo es ALFA, debido a la magnitud de las alturas de ola que llegan a la playa en dicho período. Las corrientes, representadas por FOXTROT, son el tercer parámetro que más valor aporta al MSI y, además, la importancia en las simulaciones con SWAN+SHORECIRC es mayor. Gracias al tipo de rotura del oleaje

sobre la playa, en decrecimiento, DELTA permite reducir el valor final de MSI en una cantidad destacable, que en las simulaciones con OLUCA+COPLA llega a ser de 4 puntos.

Pasando ahora al instante de pleamar, que se presenta en la Figura 47, OLUCA+COPLA vuelve a mostrar valores más altos de MSI en toda la superficie que SWAN+SHORECIRC. También se vuelven a observar los patrones de mayor MSI debido a la barra en la primera de las herramientas. Al igual que ocurría en el caso de bajar, al comienzo de la zona de rompientes, el MSI obtenido con OLUCA+COPLA es mayor que con SWAN+SHORECIRC. Poniendo el foco en los puntos de control, los valores son significativamente más altos que en el caso de bajar, ya que el oleaje fue más intenso en dicho instante y los puntos de control están situados más próximos al inicio de la zona de rompientes. El parámetro con mayor importancia para el MSI continúa siendo ECHO, es decir, el ángulo de incidencia, mientras que ALFA ocupa el segundo lugar. En este caso, la corriente cobra un poco menos de importancia que en el anterior.

En la anterior campaña se observó que CHARLIE es un parámetro con una afección al MSI muy baja. Lo observado durante la segunda campaña es que cobra una importancia ligeramente mayor, pero sigue siendo el que menos afecta.

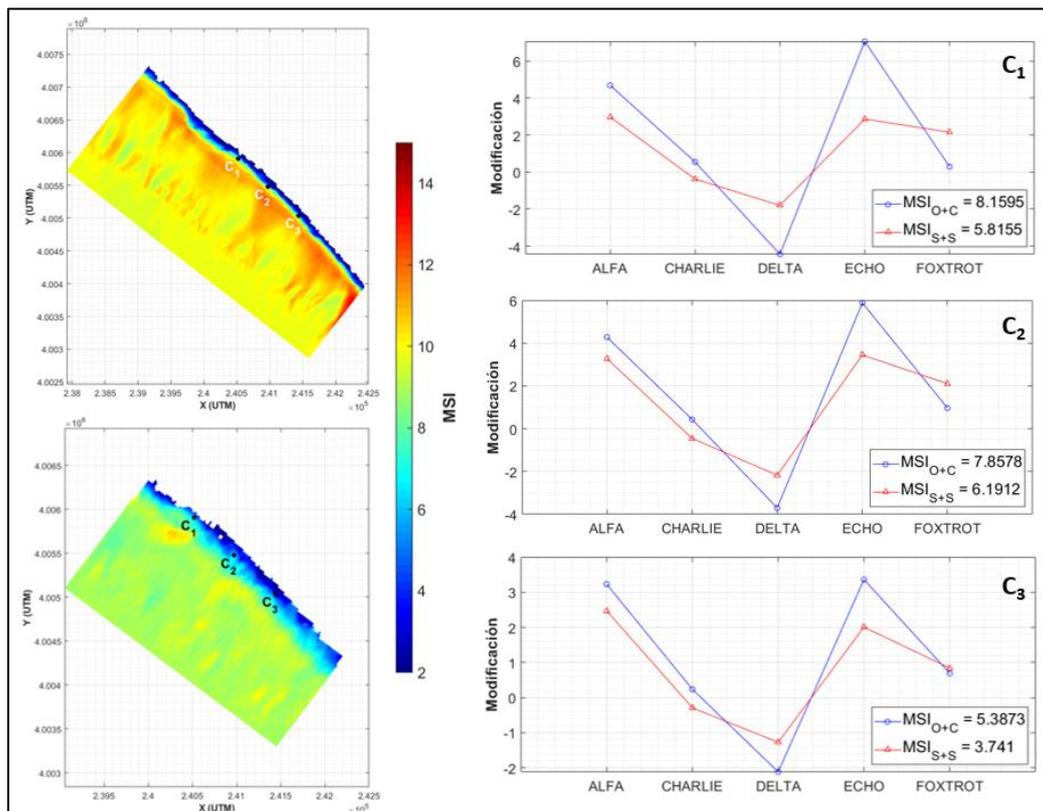


Figura 46. MSI en bajamar, segunda campaña.

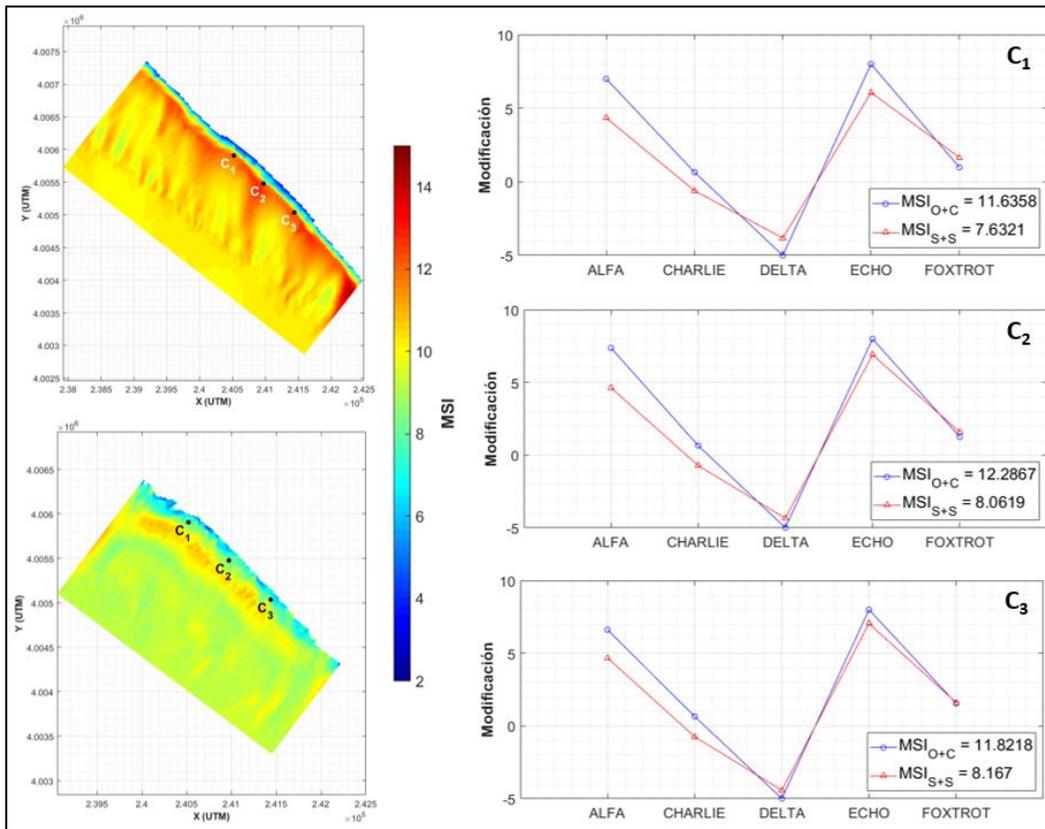


Figura 47. MSI en pleamar, segunda campaña.

9 Hipótesis de origen de incongruencias.

A lo largo del documento, se ha observado que, pese a obtener buenas correlaciones en algunos de los montajes y ejecuciones, de forma generalizada se dan una serie de irregularidades:

1. Los modelos no consiguen representar adecuadamente la dependencia de Hs con el nivel del mar en la ubicación del correntímetro AWAC durante la primera campaña.
2. Los datos simulados en la ubicación del AVD en las dos campañas están sobreestimados.
3. Los patrones de corrientes existentes en la realidad, que dependen del nivel del mar, no son representados por los modelos.

Los modelos utilizados han sido validados en numerables ocasiones, por lo que su capacidad para representar los procesos que se intentan simular en este trabajo están demostrados. Teniendo esto en cuenta, el origen de estos problemas es probable que se encuentre en que alguno de los aspectos implicados en los montajes haya desencadenado una especie de efecto en cadena. Es decir, teniendo un punto de partida erróneo, se obtiene un resultado de oleaje no realista, que genera unas corrientes diferentes a las existentes.

En este capítulo se indicarán algunos puntos del trabajo que pudieron afectar a los resultados finales obtenidos con los montajes de OLUCA+COPLA SWAN+SHORECIRC.

9.1 Origen de los datos de forzamiento.

Uno de los primeros aspectos que se deben replantear es el forzamiento que se utilizó. Como se comentó en el apartado 5.5.2, el forzamiento de oleaje se tomó de la base de datos de predicción de Puertos del Estado. La web de dicho organismo público cuenta con una opción de verificación de los datos de predicción, comparándolos con las mediciones de las diferentes boyas. La más cercana a la zona de estudio que tiene mediciones en los períodos de las dos campañas es la del Golfo de Cádiz. En la Figura 48 se ha representado la ubicación de la boya, con respecto a la zona de estudio, junto con la serie temporal referidas a las campañas de medición. En dicha figura se observa que, pese a que los datos predichos suelen ser bastantes similares con los medidos, en determinados momentos puede producirse una desigualdad que puede llegar a subestimar o sobreestimar hasta en 0.5 m.

Cabe destacar que esta verificación solo es realmente válida para los nodos de la malla de Puertos del Estado más próximos a la boya. Por este motivo, también se debe tener en cuenta que esta verificación no tiene que ser igual en los nodos escogidos frente a la zona de estudio.

Para comprobar realmente el error que el forzamiento utilizado ha podido inducir en las propagaciones, se ha realizado una prueba con SWAN+SHORECIRC, utilizando una malla general, que incluya únicamente la ubicación de los correntímetros durante la primera campaña, con una resolución de 25 m. Dentro de dicha malla, se ha instaurado otra de detalle, con la misma resolución que la general, que también es la misma que se había utilizado en las simulaciones. En este nuevo montaje, se ha utilizado como forzamiento el registro del correntímetro AWAC, de tal forma que se espera que los datos simulados en dicha ubicación tengan una correlación perfecta y se pretende observar la diferencia con respecto a los resultados originales.

Los resultados obtenidos con esta prueba de verificación del forzamiento se muestran en la Figura 49. Como se esperaba, la correlación en el AWAC con dicho forzamiento es perfecta, lo que indica que el montaje es correcto. No obstante, en las ubicaciones del AVD y del EMC se ha obtenido un resultado muy similar al original. Por esta razón, la primera hipótesis de origen de contingencias quedaría, a priori, descartada.

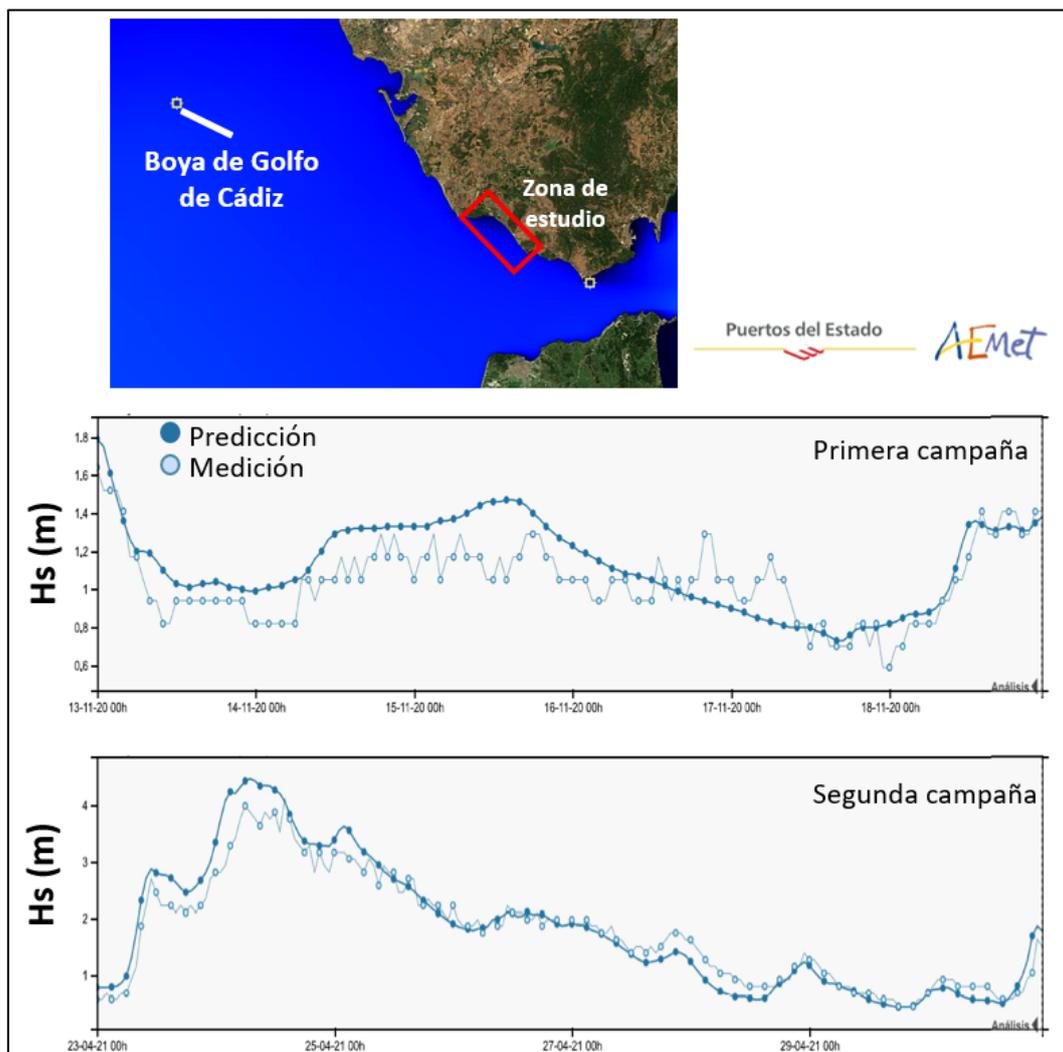


Figura 48. Serie temporal de verificación de Hs durante la primera campaña. Fuente: Puertos del Estado.

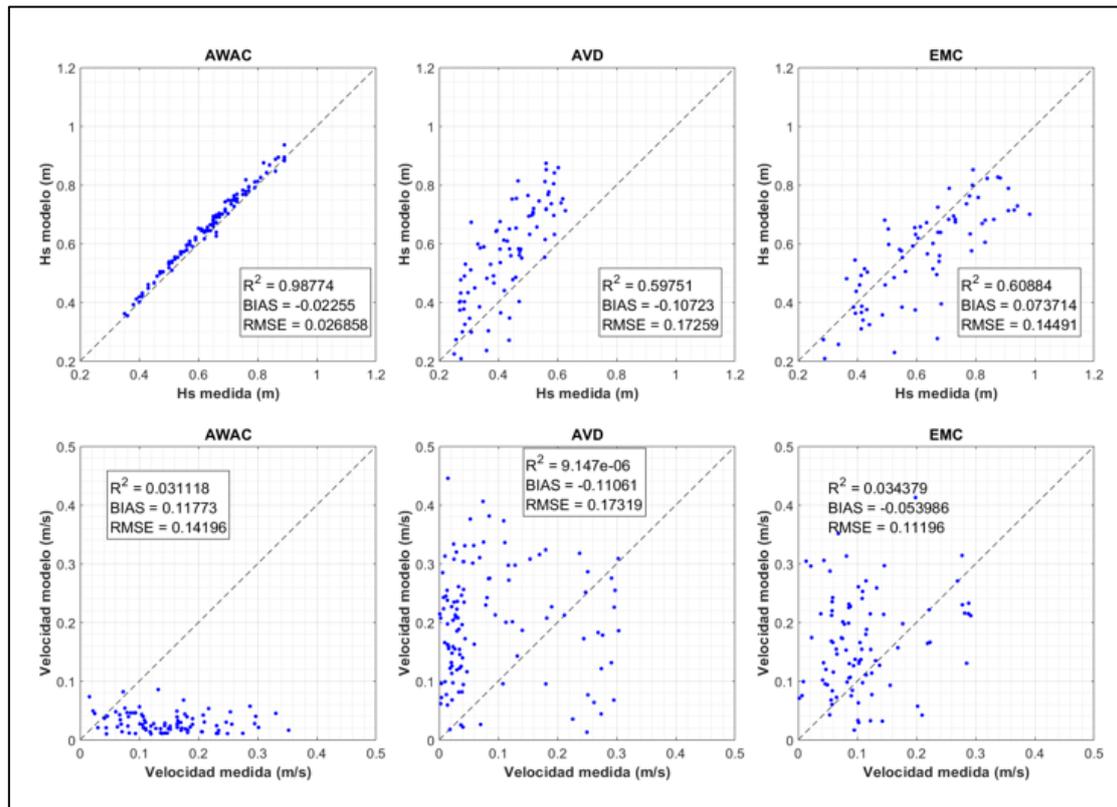


Figura 49. Correlación de oleaje y corriente de forzamiento con datos del AWAC. SWAN+SHORECIRC, primera campaña.

9.2 Resolución de las mallas de detalle.

La segunda hipótesis planteada consiste en que las resoluciones que se han utilizado en los montajes de las mallas de detalle no son suficientes para representar correctamente las condiciones del oleaje en la zona de rompientes. En el caso de OLUCA+COPLA, la malla de detalle cuenta con una resolución espacial de 20 m. En SWAN+SHORECIRC, la resolución en el eje longitudinal a la playa es de 25 m, mientras que la transversal es variable.

En ejecuciones previas a las mostradas en este documento, se ha observado que una resolución de 25 m en SWASH no permitía representar el oleaje correctamente, por lo que fue necesario doblar la resolución con dicha herramienta. Por lo tanto, este podría ser el origen de los problemas encontrados durante las propagaciones. No obstante, se debe tener en cuenta que un aumento en la resolución vendría acompañado también de un coste computacional más elevado.

Para intentar comprobar esta hipótesis, se ha realizado una ejecución de la primera campaña con OLUCA+COPLA aumentando la resolución a 12.5 m. Los resultados obtenidos se comparan en la

Tabla 6. Tabla de correlaciones entre datos de oleaje medidos y simulados con 25 y 12.5m de resolución en la malla de detalle. OLUCA+COPLA, primera campaña.

	AWAC			AVD			EMC		
	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE	R ²	BIAS	RMSE
N.M.M.	0.04	-0.17	0.24	0.64	-0.22	0.30	0.52	-0.09	0.22
N.M.M.+0.2	0.05	-0.18	0.25	0.62	-0.22	0.31	0.50	-0.10	0.22

9.3 Batimetría no representativa.

La última hipótesis que se plantea como posible causa de las diferencias encontradas entre los datos simulados y los medidos es que la batimetría no sea representativa del fondo durante las campañas. Se debe tener en cuenta que, cada registro batimétrico, es realmente representativa de un día único. Por este motivo, utilizar la misma batimetría para las propagaciones de días diferentes, es una aproximación que, sobre todo, cerca de la costa, puede inducir errores indeseados.

Un ejemplo de que puede no ser representativa es lo ocurrido durante la segunda campaña, en la que el correntímetro EMC quedó completamente sepultado por el avance de una barra de arena. El AVD también se cubrió parcialmente. Sin embargo, dicha barra no se muestra en la batimetría original.

10 Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

A lo largo de este documento, se han presentado los resultados de las simulaciones que se han realizado con el fin de determinar la validez que tres herramientas numéricas tienen para el apoyo al desembarco anfibio. A partir de los resultados obtenidos, las conclusiones que se pueden extraer son:

1. Las ejecuciones realizadas no han conseguido reproducir correctamente los procesos que se dan en la zona de estudio. De esta forma, los resultados obtenidos no se corresponden adecuadamente con los medidos.
2. Dicho desajuste en los resultados tiene un origen, por el momento desconocido, pero sobre el que se ha hipotetizado. De las ideas planteadas, a priori, se han descartado las posibilidades de que el problema sea de los datos de forzamiento o de las resoluciones utilizadas y se apunta más hacia una batimetría no representativa de la zona de estudio durante las campañas.
3. Pese a los problemas encontrados, se ha determinado que OLUCA+COPLA y SWAN+SHORECIRC son dos herramientas que permiten calcular el MSI, pudiendo ser de ayuda en maniobras de desembarco anfibio. SWAN+SHORECIRC parece ser una herramienta más fiable, ya que en los dos casos ha mostrados correlaciones, en la zona de rompientes, con $R^2 > 0.7$
4. Por el contrario, SWASH es una herramienta que aún tiene muchas limitaciones en cuanto a coste computacional y estabilidad, además de que no aporta resultados de dirección, por lo que se descarta su uso en este campo.

De cara a un futuro, los trabajos que se proponen consisten en la realización de un estudio de las mismas características que este, pero utilizando como punto de partida una batimetría diferente. De esta forma, se espera obtener unos mejores resultados.

Además, se puede plantear una herramienta alternativa que permita utilizar SWASH en este ámbito de trabajo, ayudándose de otros modelos. El planteamiento que se propone es el siguiente:

Alternativa de SWASH.

Una propuesta factible podría ser una herramienta similar al SWANSURF, comentada en el apartado 1.2.2. El esquema del montaje de dicha herramienta se presenta en la Figura 50. Consiste en un SWAN, en el cual se propaga el oleaje hacia la costa, con un forzamiento espectral en diferentes puntos de los contornos de la malla (puntos rojos). Tras la propagación con SWAN, se tomarían los espectros de los puntos indicados en amarillo como forzamiento para uno o una serie de perfiles de SWASH.

De esta forma, se podrían obtener resultados de Hs, Tp y corrientes a lo largo de los perfiles de SWASH, y quedaría resuelto el problema de la obtención de la dirección, ya que se obtendría de la malla de detalle de SWAN.

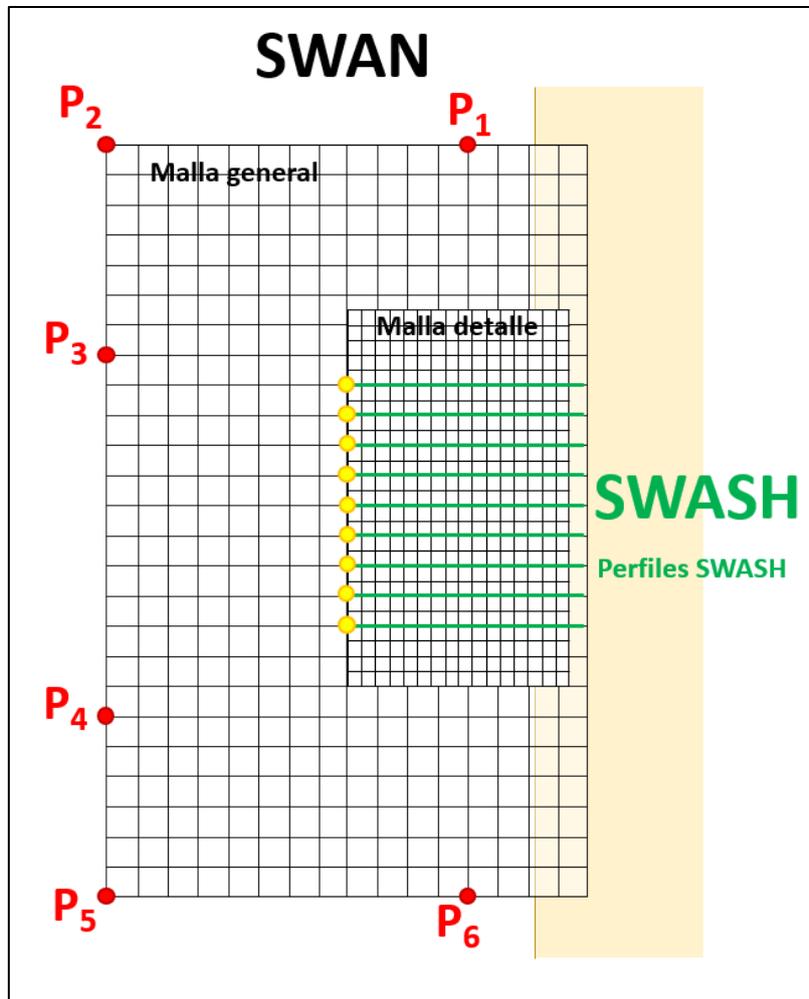


Figura 50. Esquema de posible herramienta SWAN+SWASH.

11 Bibliografía.

- (GIOC), G. de I. O. y de C. (2001a). *Modelo de corrientes de rotura en playas*.
- (GIOC), G. de I. O. y de C. (2001b). *Modelo de propagación de oleaje espectral. Manual de referencia Oluca-SP3.0*.
- (IHM), I. H. de la M. (2019). *Memoria Anual*.
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves. In *Coastal Engineering* (pp. 569–587). <https://doi.org/doi:10.1061/9780872621909.034>
- Berkhoff, J. C. W. (1972). Computation of Combined Refraction-Diffraction. In *Coastal Engineering* (pp. 471–490). <https://doi.org/10.1061/9780872620490.027>
- Booij, N., Holthuijsen, L. H., & Ris, R. C. (1996). The “Swan” Wave Model for Shallow Water. In *Coastal Engineering* (pp. 668–676). <https://doi.org/10.1061/9780784402429.053>
- Christie, G. (2006). *The SWANSURF Wave Model: Implementation and User Manual*.
- Delgado-Tamariz, D. A. (2019). *Análisis de viabilidad del uso del modelo XBeach para la evaluación temprana del desembarco anfibio en costa*. Universidad de Cantabria.
- Elias, E. P. L., Walstra, D. J. R., Roelvink, J. A., Stive, M. J. F., & Klein, M. D. (2000). Hydrodynamic Validation of Delft3D with Field Measurements at Egmond. *27th International Conference on Coastal Engineering*, 2714–2727.
- Guedes, R. M. C., Lobato, A. A. F., Johnson, D., Ruglys, M., & Garrett, S. (2015). SurfZoneView: a modelling-based tool to assess surf zone conditions and support amphibious beach landing operations. *Coasts & Ports Conference*. <https://www.researchgate.net/publication/289509990>
- Hsu, Y. L., Dykes, J. D., & Allard, R. A. (2006). *Software Development for Producing Standard Navy Surf Output from Delft3D*.
- Hsu, Y. L., Dykes, J. D., & Allard, R. A. (2008). *Validation Test Report for Delft3D*.
- Hsu, Y. L., Mettlach, T. R., & Earle, M. D. (2000). *Improvement and Validation of the Navy Longshore Current Model*.
- Hsu, Y. L., Mettlach, T. R., & Earle, M. D. (2002). *Validation Test Report for the Navy Standard Surf Model*.
- Kirby, J. T., Dalrymple, R. A., & Shi, F. (1994). *Combined Refraction/Diffraction Model. Ref/Dif 1 Version 3.0. Documentation and User's Manual*.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2004.07.014>
- Male, B. R. (2020). *Rapid Remote Determination of Hydrographic Data for Modified Surf Index Calculations and Naval Applications*. Massachusetts Institute of

Technology.

- Mettlach, T. R., Earle, M. D., & Hsu, Y. L. (2002). *Software Design Document for the Navy Standard Surf Model Version 3.2*.
- Rattanapitikon, W., & Shibayama, T. (1998). Energy Dissipation Model for Regular and Irregular Breaking Waves. *Coastal Engineering Journal*, 40(4), 327–346. <https://doi.org/10.1142/S0578563498000194>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11–12), 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2009.08.006>
- Roelvink, J. A., & Van Banning, G. K. F. M. (1995). Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. *Oceanographic Literature Review*, 42(11), 925.
- The SWAN Team. (2006). *SWAN: User Manual*.
- Thornton, E. B., & Guza, R. T. (1983). Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C10), 5925–5938. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>
- Van Dongeren, A. R., Sancho, F. E., Svendsen, I. A., & Putrevu, U. (1994). SHORECIRC: A Quasi 3-D Nearshore Model. In *Coastal Engineering* (pp. 2741–2751).
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992–1012. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2011.05.015>