



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



Análisis de la eficiencia de un campo de vegetación para reducir el run-up sobre un dique en la costa

Trabajo realizado por:
Natalí Delgado Orozco

Dirigido:
María Emilia Maza Fernández
Mariana Roldán Upegui

Titulación:
Máster
Universitario en
Costas y Puertos

Santander, septiembre de 2023

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi profunda gratitud a las personas que han sido el pilar fundamental de mi vida, mis padres y mi querida hermana Vale. Su amor incondicional, apoyo constante y motivación incansable han sido la fuerza que me impulsó a alcanzar mis metas. Gracias por ser mi fuente de inspiración. Así mismo, expreso mi agradecimiento a la Fundación Carolina por otorgarme la beca que me permitió realizar estudios de posgrado en España y vivir esta gran experiencia.

En segundo lugar, quiero extender mi reconocimiento a mis dos directoras, María Maza y Mariana Roldán. Su profesionalismo y dedicación han sido ejemplares, han sido excelentes guías y mentoras durante el desarrollo de este trabajo. Mi admiración hacia ustedes.

También, agradezco a los profesores que han sido parte fundamental de mi formación durante este año. Cada uno es un excelente profesional y personas extraordinarias. Ha sido un privilegio contar con su orientación y conocimiento en mi camino académico. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mis compañeros de máster. Cada uno ha aportado valiosas contribuciones a lo largo de este año, aprecio profundamente las explicaciones, la paciencia y la diversión que compartimos, estoy convencida que he tenido el mejor grupo de clase y quiero destacar especialmente a cuatro personas que han dejado una huella imborrable en mi experiencia:

Carla, gracias por ser la fortaleza y la entereza que todos necesitamos en momentos de desafío. Tu determinación ha sido inspiradora. Gabriel, gran ser humano, gracias por ser tu generosidad, paciencia y apoyo constante, gracias por escucharme y aconsejarme, gracias por enseñarme Matlab en modo profesor y por el viaje en tren, mil éxitos y felicidad para ti, espero que un día ya no te comas más las uñas ¡te lo mereces!

Isa, quiero expresarte mi más sincero agradecimiento por tu amistad incondicional y por ser una parte fundamental de nuestro increíble equipo de trabajo. Tu apoyo constante y tu motivación fueron verdaderamente esenciales durante este último año. No solo has sido una amiga increíble, sino también una fuente de diversión y alegría en cada trabajo que hemos realizado juntas. Tu energía positiva y tu compromiso son inspiradores.

Mariana, quiero expresar mi profundo agradecimiento por tus consejos sabios, tu amistad y tu increíble habilidad para guiar y apoyar en todo momento. Tu capacidad para sacar lo mejor de cada uno de nosotros es asombrosa. Tu orientación y apoyo han sido invaluable para mí y para todos los que te rodean. Gracias por ser una amiga excepcional.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	9
1.1. Estado del arte.....	11
1.1.1. Soluciones híbridas para protección costera.....	11
1.1.2. Protección costera empleando vegetación	12
1.1.3. Run-up y reducción de este sobre un dique con costa.....	14
2. Objetivos.....	17
2.1.1. Objetivo General	17
2.1.2. Objetivos Específicos.....	17
3. Metodología	17
4. Modelado numérico.....	21
3. Selección de casos de estudio y montaje numérico.....	21
3.1. Selección de casos de estudio.....	21
3.2. Características físicas e hidrodinámicas de los casos de estudio	24
3.3. Dimensiones definidas para los dominios numéricos y para los elementos que componen la solución híbrida en cada caso de estudio.....	27
3.4. Esquema dominios IH2VOF	30
3.5. Mallado numérico.....	31
3.6. Número de olas.....	35
3.7. Calibración del modelo	35
3.8. Resumen de casos	38
4. Discusión de resultados.....	39
5. Líneas de trabajo futuro	53
6. Conclusiones.....	55
7. Referencias.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados a partir de los resultados reportados por el artículo científico.....	24
Tabla 2. Variables empleadas en el esquema del sistema dique- zona costera...	24
Tabla 3. Parámetros hidrodinámicos a trabajar.	27
Tabla 4. Dimensiones de los casos por tipología - Modelo IH2VOF	28
Tabla 5. Resultados obtenidos Ru 2% simulaciones tipo 2, 3 y 4	37
Tabla 6. Resumen de casos.....	38
Tabla 7. Comparación de resultados: reducción del porcentaje de run-up en un dique impermeable.....	40
Tabla 8 Resultados obtenidos: formulación Eurotop 2007.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable. Fuente: (Eurotop, 2018).....	15
Figura 2. Run-up en función del parámetro de rotura para pendientes impermeables.....	16
Figura 3. Diagrama de flujo – metodología.....	20
Figura 4. Esquema de resultados artículo de estudio.	23
Figura 5. Esquema de representación de las variables a considerar en el análisis de run-up.....	25
Figura 6. Esquema de tipologías de simulaciones en IH2VOF.....	30
Figura 7. Discretización mallada numérico Simulación Tipo 1.....	31
Figura 8. Discretización mallado numérico Simulación Tipo 2, 3 y 4.	32
Figura 9. Mesh Quality IH2VOF: Simulación tipo 1.	33
Figura 10. Mesh Quality IH2VOF: Simulaciones tipo 2,3 y 4.....	34
Figura 11. Reducción del run-up del 2% en el artículo y con el modelo IH2VOF.	41
Figura 12. Comparación de resultados obtenidos en % de reducción del run-up del 2% sobre un dique impermeable.....	43
Figura 13 Run-up relativo obtenido a partir de la formulación de Eurotop 2007.	48
Figura 14. Relación entre el Run-up obtenido a partir del modelo numérico y el obtenido mediante formulación de Eurotop.....	50

RESUMEN

Título:	Análisis de la eficiencia de un campo de vegetación para reducir el run-up sobre un dique en la costa
Autor:	Natalí Delgado Orozco
Directoras:	María Emilia Maza Fernández Mariana Roldan Upegui
Fecha:	Septiembre, 2023
Palabras clave:	Run-up, vegetación intermareal, soluciones híbridas, protección costera.

En este trabajo, se realiza un análisis sobre la validez de la hipótesis de superposición de procesos en la estimación del run-up en soluciones híbridas, en concreto en aquellas formadas por la combinación de un campo de vegetación y un dique de pendiente uniforme. Así mismo, se verifica la aplicabilidad que tienen las formulaciones existentes para el cálculo del run-up en este tipo de soluciones.

Para poder llevar a cabo este estudio, se utilizó el modelo CFD IH2VOF, para considerar de manera integral todos los procesos de transformación del oleaje al interactuar con elementos como cambios en la batimetría, vegetación y dique. Este enfoque se diferencia del utilizado con anterioridad en la literatura, en el que se considera la propagación del oleaje a través de la vegetación utilizando un modelo numérico o formulaciones analíticas sin considerar la existencia del dique y, posteriormente, se calcula el run-up sobre la estructura considerando la altura de la ola tras el campo de vegetación como la altura de ola incidente a pie de dique y utilizando formulaciones analíticas, como las propuestas por el Eurotop.

En total se estudiaron 9 casos de tipologías diferentes, previamente establecidos a partir de los resultados obtenidos por el estudio "The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes". Los parámetros de cada caso se definieron de acuerdo al estudio mencionado para poder reproducir casos ya analizados en dicho estudio y poder realizar la comparación de los resultados obtenidos con este estudio de la literatura en el que se siguió la metodología convencional en la que se atenúa primero la energía del flujo considerando la

vegetación, sin considerar la existencia del dique, para con ello obtener la altura de ola incidente a pie de dique y obtener el run-up en base a formulaciones analíticas.

Los resultados revelaron en primera instancia diferencias significativas de los resultados obtenidos a través del modelo IH2VOF y los valores reportados en el estudio. Estas discrepancias indican una sobreestimación en los resultados de disminución de run-up producido por la vegetación y el cambio batimétrico asociado a ella presentados en el artículo científico con respecto a las reducciones encontradas con el modelo IH2VOF, exceptuando un caso en el que ocurre lo contrario, el run-up no se reduce e incluso aumenta en un 106%. Por tanto, se deduce la necesidad de un análisis más detenido de los procesos de interacción entre el flujo y los elementos que componen la solución híbrida, ya que la superposición de procesos puede conducir a una sobreestimación de la capacidad de reducción de run-up producida por el campo de vegetación y, por lo tanto, unos valores reales de run-up mayores a los estimados. Esto puede tener implicaciones muy importantes por ejemplo en la definición de la cota de coronación de la estructura rígida, que podría ser subestimada.

Además, se observó que la influencia de la vegetación en la reducción del run-up fue más evidente en casos con vegetación de mayor longitud y vegetación emergida, dado que estas características manifestaron transformaciones notables del oleaje que requieren una consideración adecuada.

Así mismo, se realizó una comparativa entre los resultados obtenidos a partir de formulación analítica, en concreto el Eurotop, y los obtenidos con el modelo numérico. Para ello, se simularon los casos con sólo vegetación para obtener la altura de ola incidente a pie de estructura, con la cual se aplicó la formulación del Eurotop correspondiente para el cálculo del run-up. En algunos casos se obtuvo una sobreestimación del run-up (casos 1, 6 y 7), mientras que, en la mayoría, se obtuvo una subestimación (casos 3, 4, 5, 7, 8 y 9), siendo solo un caso el que encajaba en la curva propuesta por la formulación. Esto sugiere que las fórmulas desarrolladas para estructuras rígidas no son directamente aplicables a casos de soluciones híbridas y más estudio es necesario para dar lugar a nuevas formulaciones que permitan estudiar este tipo de soluciones.

ABSTRACT

Title:	Analysis of the efficiency of a vegetation field to reduce run-up on a dike at the coast
Author:	Natalí Delgado Orozco
Supervisors:	María Emilia Maza Fernández Mariana Roldan Upegui
Date:	September, 2023
Key words:	Run-up, intertidal vegetation, hybrid solutions, coastal protection.

In this work, an analysis is made on the validity of the hypothesis of overlapping processes in the estimation of the run-up in hybrid solutions, specifically in those formed by the combination of a vegetation field and a dam of uniform slope. Likewise, the applicability of existing formulations for the calculation of run-up in this type of solutions is verified.

To carry out this study, the IH2VOF CFD model was used to comprehensively consider all wave transformation processes when interacting with elements such as changes in bathymetry, vegetation, and dike. This approach differs from the one previously used in the literature, in which the propagation of the wave through the vegetation is considered using a numerical model or analytical formulations without considering the existence of the dam and, subsequently, the run-up on the structure is calculated considering the height of the wave after the vegetation field as the incident wave height at the foot of the dike and using analytical formulations, such as those proposed by Eurotop.

In total, 9 cases of different typologies were studied, previously established from the results obtained by the study "The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes". The parameters of each case were defined according to the aforementioned study in order to reproduce cases already analyzed in said study and to be able to compare the results obtained with this study of the literature in which the conventional methodology was followed in which the energy of the flow is first attenuated considering the vegetation, without considering the existence of the dam, to thereby obtain the incident wave height at the foot of the dike and obtain the run-up based on analytical formulations.

The results revealed in the first instance significant differences from the results obtained through the IH2VOF model and the values reported in the study. These discrepancies indicate an overestimation in the results of decrease of run-up produced by vegetation and the bathymetric change associated with it presented in the scientific article with respect to the reductions found with the IH2VOF model, except in one case in which the opposite occurs, the run-up is not reduced and even increases by 106%. Therefore, it follows the need for a more detailed analysis of the interaction processes between the flow and the elements that make up the hybrid solution, since the overlapping of processes can lead to an overestimation of the run-up reduction capacity produced by the vegetation field and, therefore, real run-up values higher than estimated. This can have very important implications for example in the definition of the crown dimension of the rigid structure, which could be underestimated.

In addition, it was observed that the influence of vegetation in the reduction of run-up was more evident in cases with longer vegetation and emerged vegetation, since these characteristics manifested remarkable transformations of the waves that require adequate consideration.

Likewise, a comparison was made between the results obtained from analytical formulation, specifically the Eurotop, and those obtained with the numerical model. To this end, the cases with only vegetation were simulated to obtain the incident wave height at the foot of the structure, with which the corresponding Eurotop formulation was applied for the calculation of the run-up. In some cases, an overestimation of the run-up was obtained (cases 1, 6 and 7), while, in the majority, an underestimation was obtained (cases 3, 4, 5, 7, 8 and 9), being only one case that fit the curve proposed by the formulation. This suggests that the formulas developed for rigid structures are not directly applicable to cases of hybrid solutions and more study is necessary to give rise to new formulations that allow studying such solutions.

1. Introducción

La protección costera es una preocupación fundamental en la gestión de la costa en todo el mundo. La creciente amenaza de eventos climáticos extremos, como tormentas más intensas y el aumento del nivel del mar que generan riesgo de inundación de la costa, junto con la expansión de actividades humanas en áreas costeras, ha intensificado la necesidad de soluciones efectivas y sostenibles para proteger estas regiones vulnerables. En este contexto, la búsqueda de soluciones híbridas para la protección costera ha surgido como un enfoque de avance en la ingeniería de costas y puertos (Borsje, 2011).

Las soluciones híbridas se caracterizan por la combinación estratégica de múltiples técnicas y estructuras de protección costera en un único sistema integral. Esta aproximación busca reunir las ventajas individuales de diferentes enfoques, como diques tradicionales, estructuras de rompeolas, playas artificiales, y sistemas de vegetación costera, para proporcionar un nivel óptimo de protección y resiliencia (Van Loon-Steensma, 2016).

La motivación principal para el estudio y desarrollo de soluciones híbridas radica en varios factores clave como son: aumento de la complejidad de las amenazas costeras por efectos de cambio climático, el cual ha exacerbado la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, enfoque en la resiliencia, dado que las soluciones híbridas promueven en la costa la capacidad de adaptación y recuperación, fomentan la funcionalidad de las áreas costeras a largo plazo, minimizan el impacto ambiental y se ha determinado que la inversión en infraestructura de protección costera es sustancial, ya que este tipo de soluciones buscan optimizar la inversión, maximizando los beneficios a larga plazo y reduciendo los costos operativos y de mantenimiento (Anderson, 2014).

Considerando lo anterior, en los últimos años, han aumentado de forma significativa los estudios que se centran en la integración de los ecosistemas costeros en los sistemas de protección costera, reconociéndolos como valiosos complementos a los métodos de ingeniería tradicionales y en este sentido, se ha demostrado que los ecosistemas costeros pueden desempeñar un papel fundamental en la protección costera contra eventos climáticos extremos (Gedan, 2011). Por ejemplo, las marismas tienen el potencial de reducir el impacto de marejadas ciclónicas y oleaje en las defensas contra inundaciones. En este contexto, en este trabajo se busca estudiar la reducción del run-up obtenido sobre un dique que hace parte de una solución híbrida formada por esta estructura y un campo de vegetación de marisma, realizando un análisis comparativo con un estudio previo titulado "The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave

loads on coastal dikes”, publicado en el año 2016, el cual, como se explicará más adelante, utiliza para la estimación del run-up un enfoque metodológico diferente al que se propone en el presente trabajo.

El artículo mencionado analiza cómo un campo de vegetación de marisma influye en la amortiguación o el aumento tanto de la altura de ola, como del run-up y el overtopping que ocurren en un dique en condiciones de tormenta severa. Este análisis se basa en una combinación de mediciones de campo y modelos numéricos que relacionan mediciones en dos tipos de marismas saladas, con dos variedades de vegetación: *Spartina Anglica* y *Scirpus maritimus*, adaptadas a ambientes salados y salobres, respectivamente. El modelo SWAN se empleó para calcular la reducción en la altura de la ola incidente en varias configuraciones de playa y diferentes calados. Además, el artículo investiga la reducción del run-up y el overtopping debido a la presencia de estos ecosistemas costeros.

Para la estimación del run-up sobre un dique que tiene en frente un campo de marisma, en el artículo mencionado se aplica una superposición de procesos. Esta superposición consiste en propagar el oleaje a través del campo vegetado utilizando un modelo numérico, (en este caso SWAN), para luego utilizar la altura de ola que sale del campo de vegetación como insumo para calcular el run-up a partir de formulaciones existentes en el EurOtop 2007 (Manual on wave overtopping of sea defences and related structures) que dependen de una altura de ola incidente a pie de estructura.

El presente trabajo se enfoca en verificar la validez de la hipótesis de superposición de procesos para algunos casos de estudio tomados del estudio previo mencionado de Vuik et al. (2016). Para ello se propone un enfoque metodológico diferente, en el cual, se utiliza el modelo CFD IH2VOF, capaz de resolver las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier-Stokes), como herramienta numérica que permite obtener el run-up teniendo en cuenta de manera integral y conjunta todos los procesos de transformación que el oleaje puede sufrir al interactuar simultáneamente con los diferentes elementos que componen la solución híbrida (en este caso un cambio batimétrico que llamaremos playa, siguiente el artículo mencionado, la vegetación de marisma y un dique de pendiente constante).

La superposición de procesos hace referencia al enfoque tradicional para la estimación del run-up en soluciones híbridas (enfoque utilizado por Vuik et al., 2016), donde se propaga el oleaje a través de un campo de vegetación con ayuda de un modelo numérico y, posteriormente, la altura de ola resultante al final del

campo de vegetación se utiliza como altura de ola incidente de insumo para el cálculo del run-up a partir de formulaciones existentes, como las del EurOtop 2018. Es decir, no se tiene en cuenta las interacciones que se producen en la solución completa en la que están presentes los diferentes elementos y las reflexiones de oleaje que cada uno de ellos produce.

La modelación numérica presentada en este trabajo se basa en casos seleccionados del artículo científico de referencia, que establece dos longitudes de vegetación fijas y diferentes calados sobre la vegetación, generando resultados de run-up sobre la estructura rígida. Así, se configuran múltiples escenarios en el modelo IH2VOF para reflejar las características especificadas en el artículo, como la pendiente de la playa y del dique, así como las condiciones de oleaje y los parámetros relacionados con la vegetación.

A través de estas simulaciones, se analizan los valores de run-up integrando todos los procesos de transformación del oleaje. Esto permite comparar los resultados con los rangos de reducción de run-up reportados en el artículo de referencia y, en caso de discrepancias, identificar o discutir las posibles causas de estas diferencias.

1.1. Estado del arte

1.1.1. Soluciones híbridas para protección costera

En el ámbito de la ingeniería de costas, las soluciones híbridas han surgido como un enfoque prometedor para abordar la creciente complejidad de los desafíos relacionados con los eventos o fenómenos de origen meteomarinero (erosión costera y la vulnerabilidad ante el aumento del nivel del mar) que ponen en riesgo la seguridad de las zonas costeras (Jones et al., 2012).

En este sentido, las soluciones híbridas buscan combinar las estructuras rígidas convencionales como diques y espigones, con sistemas de restauración de ecosistemas costeros, como marismas, manglares y dunas, con el propósito de mitigar la erosión costera, disipar la energía de las olas, potenciar la resiliencia, minimizar los impactos ambientales adversos y maximizar la viabilidad a largo plazo de las intervenciones (Shores, 2015).

Se enfatizan las virtudes inherentes de las soluciones híbridas, tales como la optimización de la resiliencia, la promoción de la conservación ecológica y la adaptabilidad a condiciones cambiantes. No obstante, se reconocen los desafíos,

que incluyen la complejidad del diseño multidisciplinario, la necesidad de una evaluación exhaustiva de las particularidades locales y la demanda de inversiones financieras significativas (Borsje, 2011).

1.1.2. Protección costera empleando vegetación

La contribución de los campos de vegetación a la atenuación del oleaje y la protección de la zona costera se refiere al papel fundamental de la vegetación costera en la modificación y amortiguación de la energía de las olas incidentes en una zona litoral. Esta interacción entre las plantas acuáticas y la hidrodinámica del agua se traduce en la disminución de la magnitud y energía del oleaje, lo que resulta en una reducción de eventos como: la erosión costera y la amenaza de inundaciones. Los campos de vegetación, como manglares, pastos marinos y dunas, interceptan parte de la energía cinética de las olas, actuando como elementos de atenuación de energía (Maza, 2013).

Este proceso implica la resistencia mecánica de las plantas a la propagación de las olas, así como la creación de zonas de frenado y turbulencia en el flujo de agua. La efectividad de esta atenuación del oleaje depende de varios factores, como la densidad, altura y estructura de la vegetación, así como las características del oleaje incidente. La consideración de estos procesos y la implementación estratégica de vegetación costera se han consolidado como un enfoque esencial en la protección y conservación de la zona costera, al reducir la erosión, promover la sedimentación y preservar la integridad de los ecosistemas litorales (Garzon et al., 2019).

Ahora bien, la eficacia de la vegetación en la atenuación del oleaje está influenciada por diversas características intrínsecas de las plantas y su disposición en el entorno costero. Estas características determinan la capacidad de la vegetación para interactuar con las olas y disipar su energía. Entre las características clave se incluyen (Shores, 2015):

- **Densidad y cobertura:** La densidad de la vegetación y su cobertura superficial son aspectos cruciales. Una densidad adecuada y una cobertura uniforme permiten una mayor intercepción y dispersión del oleaje, lo que resulta en una mayor reducción de la energía de las olas.
- **Flexibilidad y elasticidad:** La flexibilidad y la elasticidad de los tallos y hojas de las plantas permiten absorber y disipar la energía de las olas a medida que se flexionan bajo el impacto. Esta característica reduce la fuerza y altura del oleaje al interactuar con la vegetación.

- **Altura y estructura:** La altura de la vegetación es significativa, ya que plantas más altas tienen un mayor efecto en la disipación de energía. Además, una estructura densa y estratificada, con diferentes alturas de vegetación, puede contribuir a la amortiguación.
- **Raíces y anclaje:** Un sistema de raíces fuerte y extendido ayuda a anclar las plantas en el sustrato costero, lo que les permite resistir la acción de las olas y mantener su posición. Esto mejora la capacidad de las plantas para interactuar con las olas de manera efectiva.
- **Flexibilidad temporal:** La vegetación que puede tolerar variaciones estacionales en la carga de oleaje, como cambios en la altura y frecuencia de las olas, es más efectiva en la atenuación del oleaje durante todo el año.
- **Especies adaptadas al ambiente:** Se debe seleccionar especies vegetales que sean nativas o adaptadas al entorno costero específico. Estas especies tienen una mayor probabilidad de sobrevivir y prosperar en condiciones de oleaje y salinidad.
- **Sistema radicular y coherencia:** La presencia de sistemas radiculares densos y coherentes aumenta la resistencia a la erosión costera y mejora la capacidad de la vegetación para retener el suelo y los sedimentos.

La combinación de estas características determina la eficacia de la vegetación en la atenuación del oleaje y, por ende, su capacidad para proporcionar protección a la zona costera. Es importante tener en cuenta estas características al diseñar y seleccionar especies de vegetación en proyectos de restauración y gestión de zonas costeras.

El modelado de la vegetación se fundamenta en las características geométricas y biomecánicas de las plantas. Sin embargo, en numerosos estudios, se ha simplificado la representación de la vegetación como cilindros rígidos con el propósito de simplificar el análisis de su interacción con el flujo y ser capaces de modelarlo. Al mismo tiempo, se han desarrollado modelos que utilizan las ecuaciones RANS para explorar con un alto nivel de detalle cómo interactúan las olas y la vegetación. Un ejemplo de esto es el modelo IH2VOF, que ha incorporado un módulo de vegetación para considerar una fuerza de resistencia en la ecuación de momento, con el objetivo de simular cómo la vegetación reduce el impacto de

las olas (Maza, 2013). La formulación de esta fuerza de resistencia se explica de la siguiente manera:

$$\overline{F_D} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot a \cdot N \cdot \bar{u} \cdot |\bar{u}| \quad (1)$$

Donde ρ representa la densidad del flujo, a corresponde al área frontal de la planta, C_D es el coeficiente de arrastre, N es la cantidad de plantas por unidad de área y \bar{u} es la velocidad promedio del flujo.

1.1.3. Run-up y reducción de este sobre un dique

El "run-up" se refiere al aumento temporal y localizado de la altura del nivel del agua en una costa o estructura costera, como un dique impermeable, debido al impacto de olas, mareas u otras perturbaciones hidrodinámicas. Este fenómeno resulta de la interacción entre la propagación de la energía de las olas y la topografía del terreno, lo que puede llevar a una elevación significativa del nivel del agua por encima de la altura esperada debido únicamente a las condiciones de oleaje.

El run-up se caracteriza por su naturaleza transitoria y su dependencia de factores como la geometría del dique, la altura y el periodo de las olas incidentes, la configuración del lecho marino y otros parámetros hidrodinámicos locales. La comprensión precisa del run-up es esencial para la evaluación de la seguridad y estabilidad de las estructuras costeras y para la protección de las áreas pobladas adyacentes.

Ahora bien, la "reducción del run-up sobre un dique" denota el conjunto de enfoques y técnicas destinados a mitigar la elevación transitoria del nivel del agua en la proximidad de un dique costero, inducida por la acción de las olas o el oleaje incidente. Este fenómeno hidrodinámico, conocido como "run-up", resulta de la interacción entre las características de las olas y la configuración topográfica de la costa y el dique.

La reducción del run-up se orienta hacia la minimización de los efectos adversos del fenómeno, ya sea mediante la adopción de medidas estructurales, como modificaciones en la geometría del dique, o mediante enfoques basados en la gestión de ecosistemas costeros, como la implementación de vegetación costera frente al dique para disipar la energía de las olas.

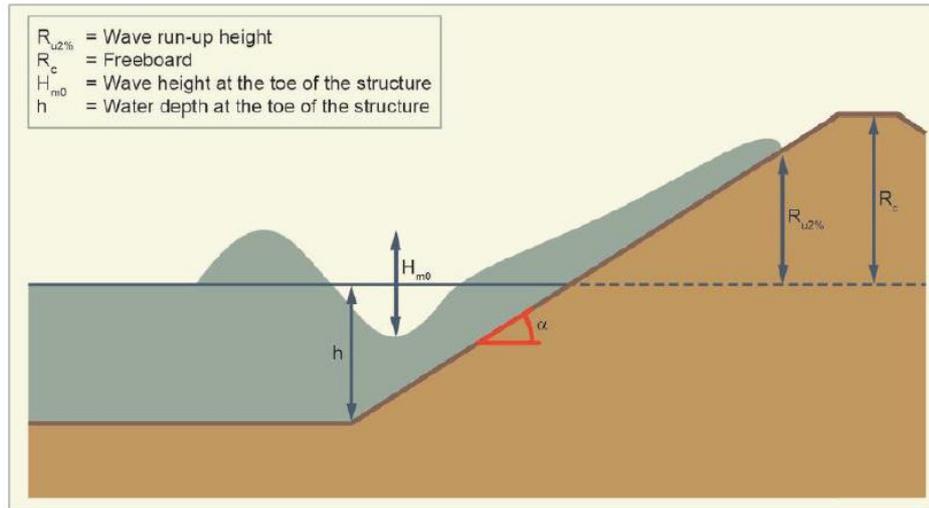


Figura 1. Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable. Fuente: (Eurotop, 2018).

La Figura 1 ofrece una representación gráfica del concepto de run-up, donde h denota el calado a nivel de la estructura, H_{m0} representa la altura de la ola incidente asociada al momento de orden cero, la cual también está relacionada con la altura de ola significativa H_s , que representa la media del tercio de las olas más grandes en el estado del mar. Además, R_c indica el francobordo del dique. Históricamente, el diseño de diques se ha basado en el valor de $R_{u2\%}$, que se refiere al nivel de run-up superado solo por el 2% de las olas incidentes en un estado de mar determinado (Eurotop, 2018).

Según las directrices de Eurotop (2018), la fórmula general para evaluar el run-up relativo R_{u2}/H_{m0} depende del parámetro de rotura $\xi_{m-1.0}$, el cual relaciona la pendiente del talud y la inclinación de la ola, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$\xi_{m-1.0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{(H_{m0})/(L_{m-1.0})}} \quad (2)$$

Es importante señalar que la longitud de onda en aguas profundas, $L_{m-1.0} = gT_{m-1.0}^2/2\pi$, depende del período medio de la energía, $T_{m-1.0}$, que es la elección más adecuada para el cálculo del run-up cuando el espectro de olas presenta formas complejas o cuando se utilizan espectros teóricos como JONSWAP o TMA de acuerdo con lo establecido por Eurotop (2018).

La relación entre el run-up relativo para un dique de pendiente constante impermeable y el parámetro de rotura se divide en dos tramos con comportamientos diferentes, los cuales se representan en la Figura 2 utilizando las ecuaciones siguientes:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \quad (3)$$

Para la tendencia media del primer tramo ($\mu=1.65$; $\sigma=0.10$), se tiene:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \quad (4)$$

Donde γ_b representa el efecto de una berma, pero en los análisis realizados en este trabajo, no se considera la presencia de ninguna berma, por tanto, el valor asignado es 1.

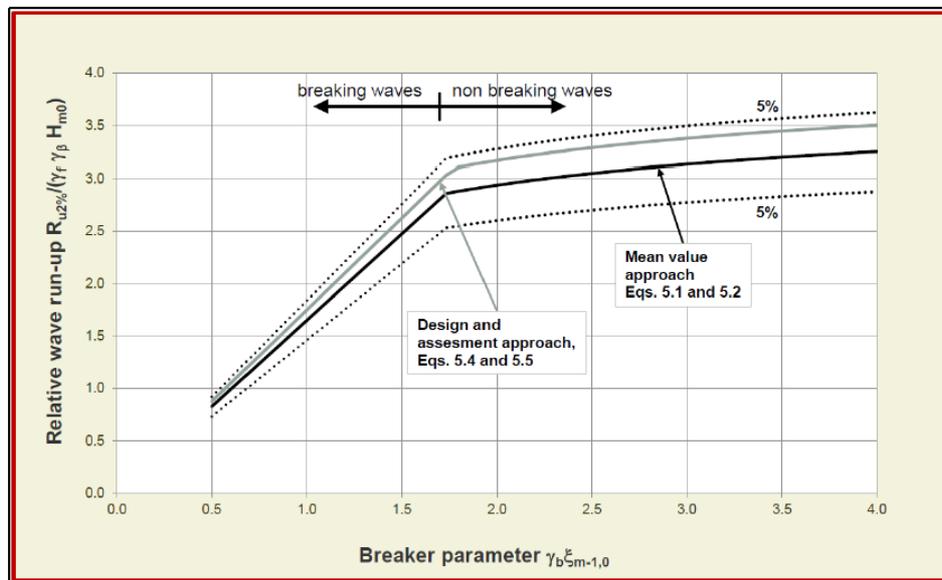


Figura 2. Run-up en función del parámetro de rotura para pendientes impermeables.
Fuente: (Eurotop, 2018).

La Figura 2 muestra las expresiones presentadas en las ecuaciones 3 y 4. El run-up relativo aumenta de manera lineal a medida que el parámetro de rotura $\xi_{m-1,0}$ aumenta en el primer rango, que corresponde a olas rompiendo con un parámetro de rotura menor a 1.8. Por otro lado, para olas que no rompen y valores altos del parámetro de rotura, la tendencia es creciente de manera lineal, pero con una pendiente menor (Eurotop, 2018).

2. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Analizar la eficiencia de un campo de vegetación para reducir el run-up sobre un dique en la costa.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Revisar la validez de la hipótesis de superposición de procesos para la estimación del run-up.
- Analizar la aplicabilidad que tienen las formulaciones existentes para el cálculo del run-up en soluciones híbridas.

3. Metodología

En esta sección, se describen los procedimientos llevados a cabo para el alcance de los objetivos específicos planteados. Como se mencionó en la sección 1, los resultados de reducción de run-up presentados en el artículo de Vuik et al. (2016), "The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes", se utilizaron como punto de partida para establecer una comparativa entre: 1) el enfoque metodológico utilizado en dicho estudio para la estimación del run-up en una solución híbrida (superposición de procesos) y 2) el enfoque que se utiliza en el presente trabajo en el que se estudia la solución híbrida en su conjunto estudiando los procesos de transformación de oleaje asociados. Por lo tanto, en un primer paso, se realiza una selección de 9 casos o configuraciones de solución híbrida estratégicas del estudio de referencia, las cuales se utilizarán a lo largo de todo el presente estudio para realizar los análisis posteriores. Las características geométricas, físicas e hidrodinámicas de estos 9 casos, así como los criterios que se siguieron para su selección, se detallan posteriormente en la sección 3.1.

Para el desarrollo del presente trabajo se propone la aplicación de una metodología netamente basada en modelado numérico utilizando un modelo CFD para la obtención del run-up en las soluciones híbridas a estudiar, pues estos modelos son capaces de resolver en detalle muchos de los procesos más complejos que resultan de la interacción flujo-vegetación-playa-estructura gris. En este caso, el modelo CFD a utilizar es el IH2VOF, cuyas capacidades, características principales y ecuaciones de gobierno se explican a profundidad en el anexo 1. Para resolver adecuadamente los procesos derivados de la interacción del flujo con la vegetación intermareal presente en las soluciones híbridas a

estudiar, el IH2VOF necesita la definición de un coeficiente de arrastre C_D . Por ello, el siguiente paso implica la calibración del modelo IH2VOF mediante la obtención de un C_D adecuado para los casos de estudio. Esta calibración es necesaria para garantizar que los resultados obtenidos sean comparables con los del artículo científico de referencia. La calibración del C_D se realizó simulando en el IH2VOF con diferentes valores de este parámetro para 4 de los 9 de los casos de estudio seleccionados y considerando casos en los que sólo está presente la vegetación y no existe el dique. Para definir el C_D más adecuado para los casos de estudio, se calculó para cada caso simulado la reducción de la altura de ola significativa H_s al final del campo de vegetación y se comparó con la reducción de H_s reportada en la figura 4 del artículo de referencia, pudiendo así seleccionar el C_D que condujera a las reducciones de H_s más similares a las de dicho estudio.

Las pruebas de los C_D se llevaron a cabo teniendo en cuenta que el modelo no incluye el proceso de fricción por fondo, mientras que el estudio de referencia sí, razón por la cual en este caso se esperaba obtener un C_D mayor al 0.4 reportado por el artículo de referencia, para así asegurar una adecuada reducción de la altura de ola debida únicamente al coeficiente de arrastre. Siguiendo esta premisa, se seleccionan para la calibración cuatro casos que tengan un menor costo computacional y generen resultados variados de reducción de H_s al final de la vegetación. Dado que la calibración del C_D se realizó ajustando las reducciones de H_s obtenidas a las reducciones de H_s reportadas por el artículo de referencia, en el cual el oleaje se propagó a través de la playa y la vegetación con el modelo SWAN, estas simulaciones en el IH2VOF únicamente tienen en su dominio la playa y la vegetación, no el dique, para que los resultados de las alturas de ola a extraer del modelo no se contaminen con procesos de reflexión y puedan compararse con los del estudio de referencia. Estas simulaciones se llamarán de ahora en adelante simulaciones de tipo 1, es decir, sin estructura rígida o dique.

Una vez determinado el coeficiente de arrastre, se procede con la modelación de los nueve casos seleccionados con el dominio completo, que involucra playa, vegetación y dique, utilizando el C_D encontrado. De ahora en adelante, estas serán llamadas simulaciones de tipo 2. El objetivo de estas simulaciones es resolver todos los procesos de transformación del oleaje que tienen lugar en estos casos de manera integral y obtener un valor para el run-up únicamente mediante el uso del modelo numérico CFD. Así se considera el run-up de la solución híbrida completa y se comparará con los casos que posteriormente se ejecutan sin vegetación y sin vegetación ni playa para poder así estimar la reducción de run-up producida por la vegetación, así como por la vegetación y el cambio batimétrico considerado. Estas reducciones se podrán posteriormente comparar

con las reportadas en el estudio de referencia y así revisar la hipótesis de superposición de procesos.

Con el fin de calcular los porcentajes de reducción del run-up que se logran con la presencia del campo de vegetación frente al dique (solución híbrida), se realizan otras simulaciones para los 9 casos estudiados, las cuales incluyen: simulaciones de tipo 3, que tienen en su dominio playa y dique, pero no vegetación y, simulaciones de tipo 4 que incluyen únicamente el dique y un fondo plano, en el cual no se ha formado la playa retenida por la vegetación, ni existe la vegetación. Esto asegura que el análisis de los resultados cumpla con las condiciones establecidas por el artículo científico.

Por otra parte, se lleva a cabo un análisis independiente tanto de la solución convencional como de la solución híbrida. Esto se realiza para verificar el run-up obtenido a partir de las formulaciones de la Eurotop, las cuáles se encuentran en función del parámetro de rotura $\xi-1,0$ y la altura de ola incidente a pie de estructura, como se explicó en el apartado anterior. Para realizar este análisis teórico se siguieron las pautas establecidas por Eurotop 2007, ya que el artículo científico hace referencia a esta versión.

En la Figura 3 se presenta el diagrama de flujo para representar la metodología a seguir en este trabajo.

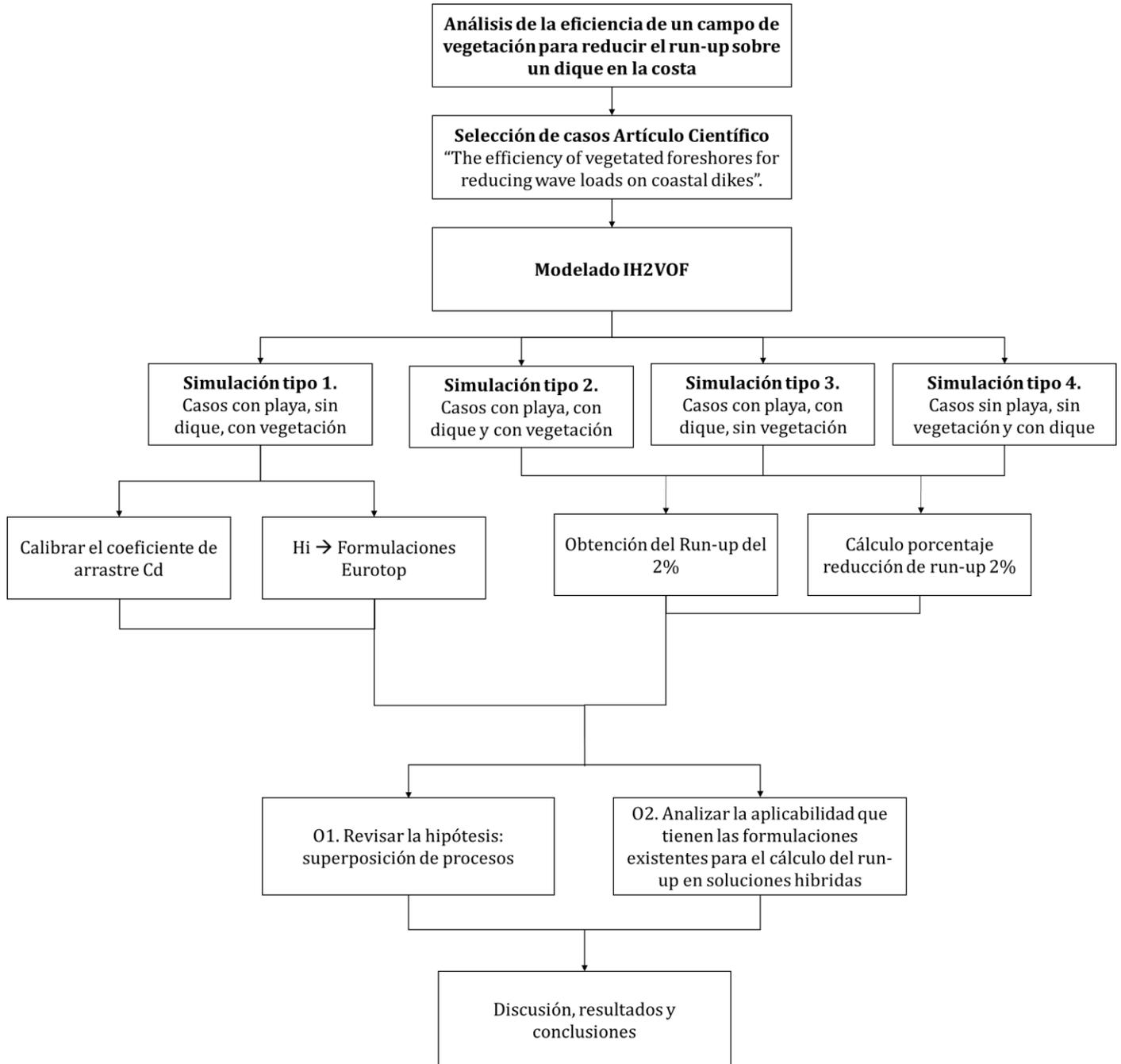


Figura 3. Diagrama de flujo – metodología.

3.1. Modelado numérico

El modelo numérico IH2VOF es un modelo desarrollado en el IHCantabria orientado al estudio de la interacción flujo-estructura, es decir, al estudio de la acción del oleaje sobre estructuras marítimas y la hidrodinámica en la zona de rompientes. IH2VOF es un modelo en plena expansión y el más avanzado entre los de su categoría para el estudio de la interacción oleaje-estructura.

Entre sus principales características destacan su capacidad para la simulación de todo tipo de estructuras marítimas a escala de prototipo o laboratorio; proporciona el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional en vertical; y es capaz de simular todo tipo de oleajes: regular, irregular, onda solitaria, etc. Todo ello proporciona al modelo IH2VOF una gran versatilidad, siendo capaz de simular dominios a escala de prototipo de hasta un kilómetro. El IHCantabria ha calibrado y validado el modelo para el caso de diques en talud de materiales sueltos mediante numerosos ensayos de laboratorio, además de haber sido aplicado al diseño de obras marítimas.

IH2VOF resuelve las ecuaciones bidimensionales de Navier-Stokes, con el promediado de Reynolds, para tener en cuenta el papel de los procesos turbulentos del flujo. Así, cuenta con un modelo de cierre turbulento $k-\epsilon$ para la resolución de la turbulencia. Para la resolución de los medios porosos, como son los mantos de las estructuras de materiales sueltos, se realiza un promediado en un volumen de control. En esos casos por tanto el modelo resuelve las ecuaciones VARANS (Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes). El seguimiento de la superficie libre se resuelve mediante la técnica VOF (Volume Of Fluid), para conocer mayor información sobre este modelo, remitirse al Anexo 1.

3.2. Selección de casos de estudio y montaje numérico

3.2.1. Selección de casos de estudio

La selección de los 9 casos de estudio se hizo con base en los datos presentados en la Figura 4, tomada del artículo, donde se exponen los resultados de reducción porcentual que se encontraron en este estudio para tres variables clave debido a la presencia de una playa con vegetación intermareal frente a un dique: altura de ola significativa (panel superior), run-up del 2% (panel central) y rebase (panel inferior). En esta figura se presentan resultados correspondientes a dos escenarios: uno que no contempla vegetación costera (panel izquierdo) y otro que incluye la presencia de vegetación (panel derecho).

Para la sección de casos, se han considerado los siguientes aspectos. Se han seleccionado dos longitudes diferentes de vegetación, que corresponden con 80 metros y 480 metros, con variaciones en el nivel de agua sobre la misma. Además, se ha limitado la extensión de la vegetación estudiada hasta los 500 metros. Esta elección se basa en la observación de que la mayor atenuación de oleaje se produce en los primeros metros de campo y, además, se busca evitar dominios demasiado grandes para simular en el modelo IH2VOF y que conlleven un coste computacional inabordable.

Se lleva a cabo una comparación entre los puntos seleccionados con el propósito de generar una discusión orientada a comprender las razones subyacentes detrás de las variaciones observadas en los porcentajes evaluados en las gráficas de reducción de altura de la ola, utilizadas para calibrar el modelo. Asimismo, se analizan las gráficas de reducción de run-up del 2% para comparar los resultados obtenidos mediante la metodología empleada en el estudio, la cual corresponde con la teoría de superposición de procesos, en donde se emplea la formulación propuesta por Eurotop para obtener el run-up relativo.

A continuación, en la Figura 4 se presenta la figura 13 extraída del artículo de referencia, sobre la cual se muestran en color rojo los puntos que representan los casos de estudio seleccionados, paneles izquierdos representan a la playa sin vegetación y paneles derechos representan playa con vegetación.

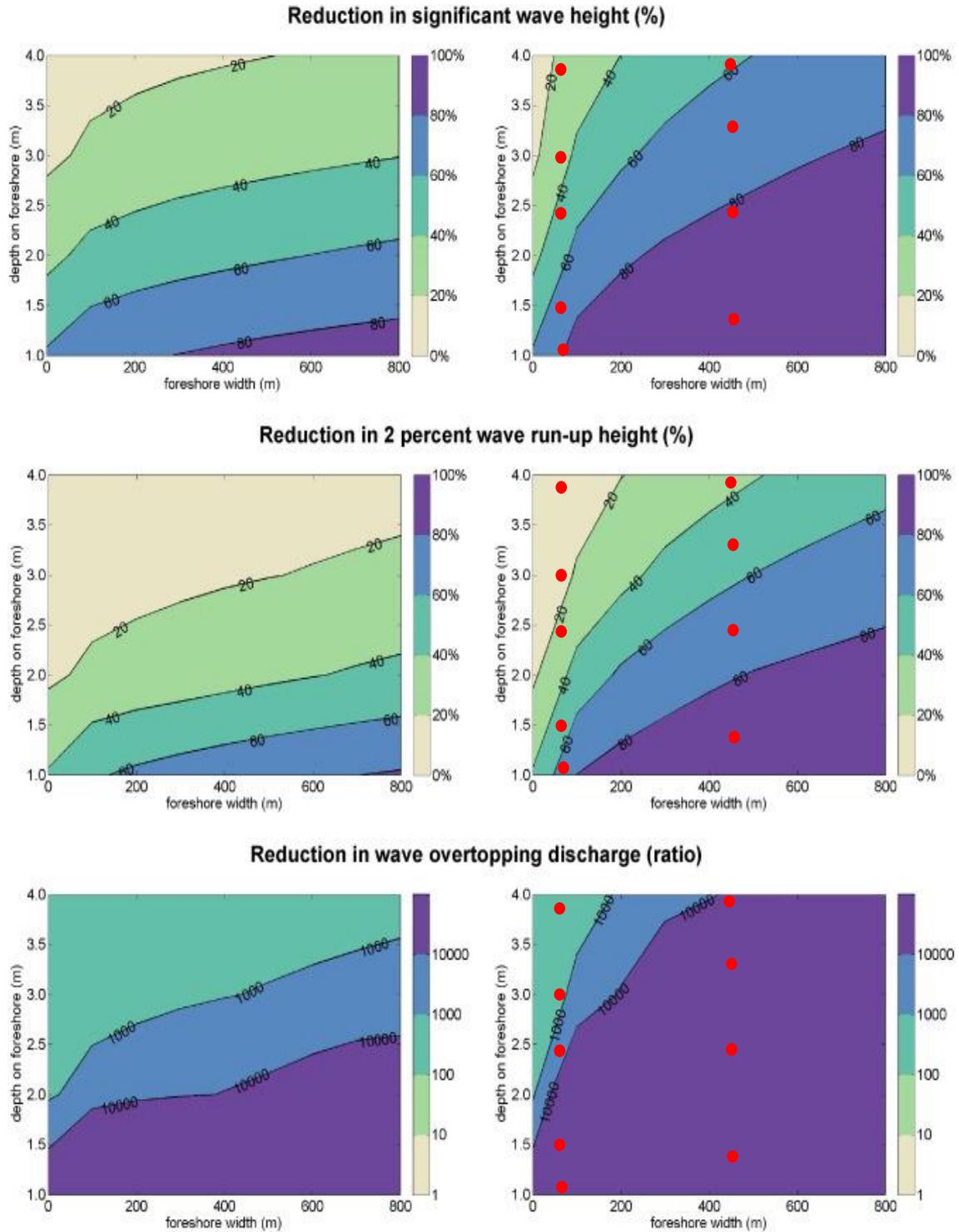


Figura 4. Esquema de resultados artículo de estudio. (Vuik et al., 2016).

A continuación, en la Tabla No. 1, se relacionan los casos seleccionados:

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados a partir de los resultados reportados por el artículo científico.

TABLA DE CASOS DE ESTUDIO SELECCIONADOS		
No. Casos	Longitud Vegetación(m)	Profundidad sobre la vegetación (m)
1	80	1
2	80	1,5
3	80	2,4
4	80	3
5	80	3,7
6	480	1,25
7	480	2,4
8	480	3,3
9	480	3,8

3.3. Características físicas e hidrodinámicas de los casos de estudio

Dada la necesidad de replicar ciertos casos presentados en el artículo científico de referencia, se procede a adoptar los valores previamente definidos por dicho artículo en lo que respecta a la caracterización del oleaje, la vegetación y el dique que componen la solución híbrida. Estos parámetros se detallan en la Tabla 2 y se presentan de forma gráfica en la Figura 5.

Tabla 2. Variables empleadas en el esquema del sistema dique- zona costera.

Definición de variables utilizadas para esquematizar las características del sistema dique-zona costera			
No.	Parámetro	Nombre	Valor
1	α_d	Pendiente del dique	1:4
2	R_c	Francobordo relativo	3 m
3	α_{fs}	Pendiente de la playa	1:100

Definición de variables utilizadas para esquematizar las características del sistema dique-zona costera			
No.	Parámetro	Nombre	Valor
4	h_t	Profundidad del agua a pie de dique	1 - 4 m
5	H_s	Altura de ola significativa exterior	1.5 m
6	T_p	Periodo de pico	5 s
7	B	Longitud de la vegetación	80 o 480 m según el caso
8	N_v	Densidad de la vegetación	1200 tallos/m ²
9	b_v	Diámetro de la vegetación	3 mm
10	h_v	Altura de la vegetación	0.3 m

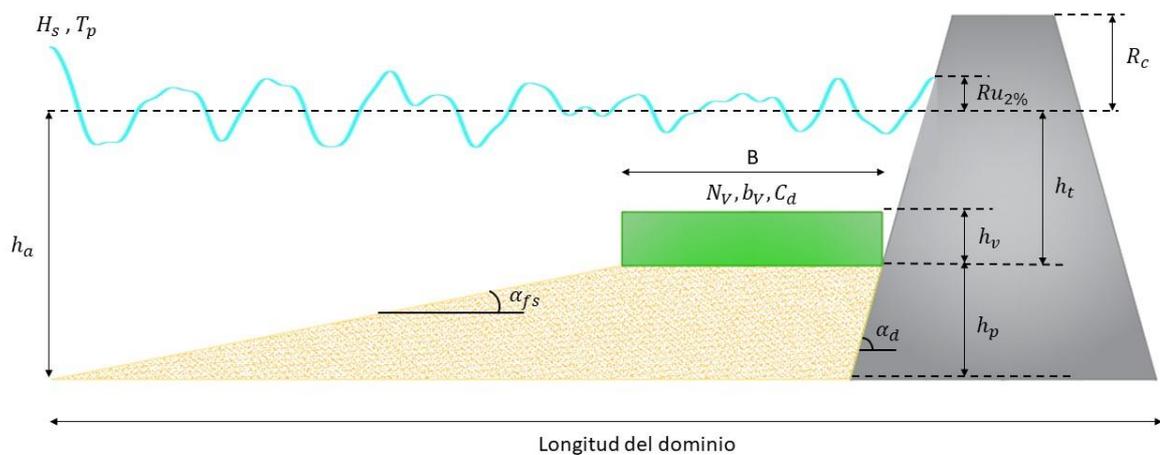


Figura 5. Esquema de representación de las variables a considerar en el análisis de run-up.

La altura de ola significativa dada por el artículo de referencia está dada en el exterior, en consecuencia, se procedió a establecer la profundidad a partir de la cual se llevaría a cabo la propagación del oleaje en el modelo IH2VOF. En este

contexto, todos los casos fueron configurados con una misma profundidad de 5.5 m en el contorno de generación, de manera que únicamente variarían la longitud y altura de la playa al interior de cada dominio según lo que se requiera en cada caso de estudio (ver Tabla 2). De acuerdo con este enfoque, se definió la profundidad constante de 5.5 m en generación buscando asegurar que las condiciones impuestas de profundidad en generación no provocaran una transformación significativa del oleaje al inicio de los dominios numéricos.

Para definir estos 5.5 m de profundidad del agua en el contorno de generación, se utilizaron los siguientes criterios:

- 1) La generación debe hacerse a una profundidad en la cual la altura de ola significativa que viene propagándose a lo largo de la playa recta y paralela que compone la solución híbrida no haya podido sufrir una transformación importante, es decir, que la altura de ola propagada desde profundidades indefinidas hasta la profundidad definida para la generación aplicando la ley de Snell no debería diferir en más de un 8% de la altura de ola exterior de 1.5 m que el artículo de referencia reporta en el exterior.
- 2) Ninguna ola del estado de mar debe romper en el contorno de generación.

Para dar cumplimiento a estos criterios, se consideraron los siguientes supuestos:

- a) Que el oleaje puede comenzar a romper a partir de una relación de $H/h = 0.5$.
- b) Que la altura de ola máxima $H_{m\acute{a}x}$ generada por la pala numérica del IH2VOF tendrá una magnitud aproximada de $1.8 H_s$, esto, debido a la propia configuración interna que tiene por defecto el modelo cuando se le pide generar de acuerdo con un aspecto teórico tipo JONSWAP.

Con todo lo anterior, en las simulaciones se esperan valores de $H_{m\acute{a}x}$ de 2.7 m. Para evitar de esta ola de mayor tamaño (y por ende todas las demás) rompa en generación, la profundidad h mínima que se debería garantizar en generación se puede despejar de $H_{m\acute{a}x}/h_{m\acute{i}n} = 0.5$, con lo que $h_{m\acute{i}n} = 5.4$ m. Partiendo de esta estimación, para cumplir con el criterio número 2, se propone definir una profundidad h en generación de 5.5 m. Por otro lado, se aplicó la ley de Snell para verificar si se cumple el criterio número 1, con lo cual se encontró que el oleaje exterior de 1.5 m, al llegar a los 5.5 m de profundidad, se vería modificado en un 8 %, con lo cual se verificaría el cumplimiento de este criterio.

3.4. Dimensiones definidas para los dominios numéricos y para los elementos que componen la solución híbrida en cada caso de estudio

Para dimensionar adecuadamente el modelo IH2VOF, es fundamental asegurar que el calado propuesto pueda acomodar la altura máxima de la ola de manera segura. Para lograr esto de manera conservadora, se ha establecido una relación de 0.5, lo que conlleva a obtener:

Tabla 3. Parámetros hidrodinámicos para trabajar.

Parámetros	Valores
Hs (m)	1,5
Hmáx (m)	2,7
h (m)	5,5
T (s)	5
L (m)	31,3

Se ha establecido una profundidad del agua constante con un valor de 5.5 metros. Por lo tanto, en cada caso, se calculará la altura de la playa restando la profundidad del agua sobre la vegetación. Por ejemplo, si la profundidad del agua es de 2.4 metros, la altura de la playa sería:

$$5.5 \text{ m} - 2.4 \text{ m} = 3.1 \text{ metros.}$$

En cuanto al polígono de agua, es esencial asegurarse de que sus dimensiones sean mayores que las del dominio. Por tanto, se ha agregado 1 metro a cada lado en el eje x y 1 metro en el eje y. Es importante mencionar que en el eje y, se suma a la profundidad ya que el agua no debe alcanzar el límite del dominio en esa dirección.

A continuación, se presenta la relación de los casos junto con sus diferentes configuraciones. Cada uno de ellos implica un dominio distinto y, por lo tanto, el costo computacional asociado variará en función de la longitud y altura del dominio.

Tabla 4. Dimensiones de los casos simulaciones Tipo 1- Modelo IH2VOF.

No.	Long Veg (m)	Prof. Agua sobre Veg(m)	Altura playa (m)	Dominio		Agua	Playa			Zona de absorción (m)
				X (m)	Y (m)	X (m)	Pendiente (m)	Longitud Total (m)	Altura Total (m)	
1	80	1	4,5	561	8,5	563	450	563	5,5	31,3
2	80	1,5	4	511	8,5	513	400	513	5	31,3
3	80	2,4	3,1	421	8,5	423	310	423	4,1	31,3
4	80	3	2,5	361	8,5	363	250	363	3,5	31,3
5	80	3,7	1,8	291	8,5	293	180	293	2,8	31,3
6	480	1,25	4,25	936	8,5	938	425	938	5,25	31,3
7	480	2,4	3,1	821	8,5	823	310	823	4,1	31,3
8	480	3,3	2,2	731	8,5	733	220	733	3,2	31,3
9	480	3,8	1,7	681	8,5	683	170	683	2,7	31,3

Análisis de la eficiencia de un campo de vegetación para reducir el run-up sobre un dique en la costa

Tabla 5. Dimensiones de los casos simulaciones Tipo 2,3 y 4 - Modelo IH2VOF.

No.	Longitud Vegetación (m)	Profundidad agua sobre la vegetación (m)	Altura playa (m)	Profundidad total (m)	Dominio		Número de celdas
					X (m)	Y (m)	
1	80	1	4.5	5.5	561.3	13	132.770
2	80	1.5	4	5.5	513	12.5	116.283
3	80	2.4	3.1	5.5	423	11.6	95.788
4	80	3	2.5	5.5	363	11	80.068
5	80	3.7	1.8	5.5	293	10.3	63.840
6	480	1.25	4.25	5.5	938	12.75	238.980
7	480	2.4	3.1	5.5	823	11.6	196.735
8	480	3.3	2.2	5.5	736	10.7	168.840
9	480	3.8	1.7	5.5	684	10.2	153.249

3.5. Esquema dominios IH2VOF

A continuación, se presenta en el siguiente esquema los cuatro tipos de simulación realizados para los 09 casos seleccionados, con el fin de visualizar de mejor forma las modelaciones realizadas para cada resultado obtenido.

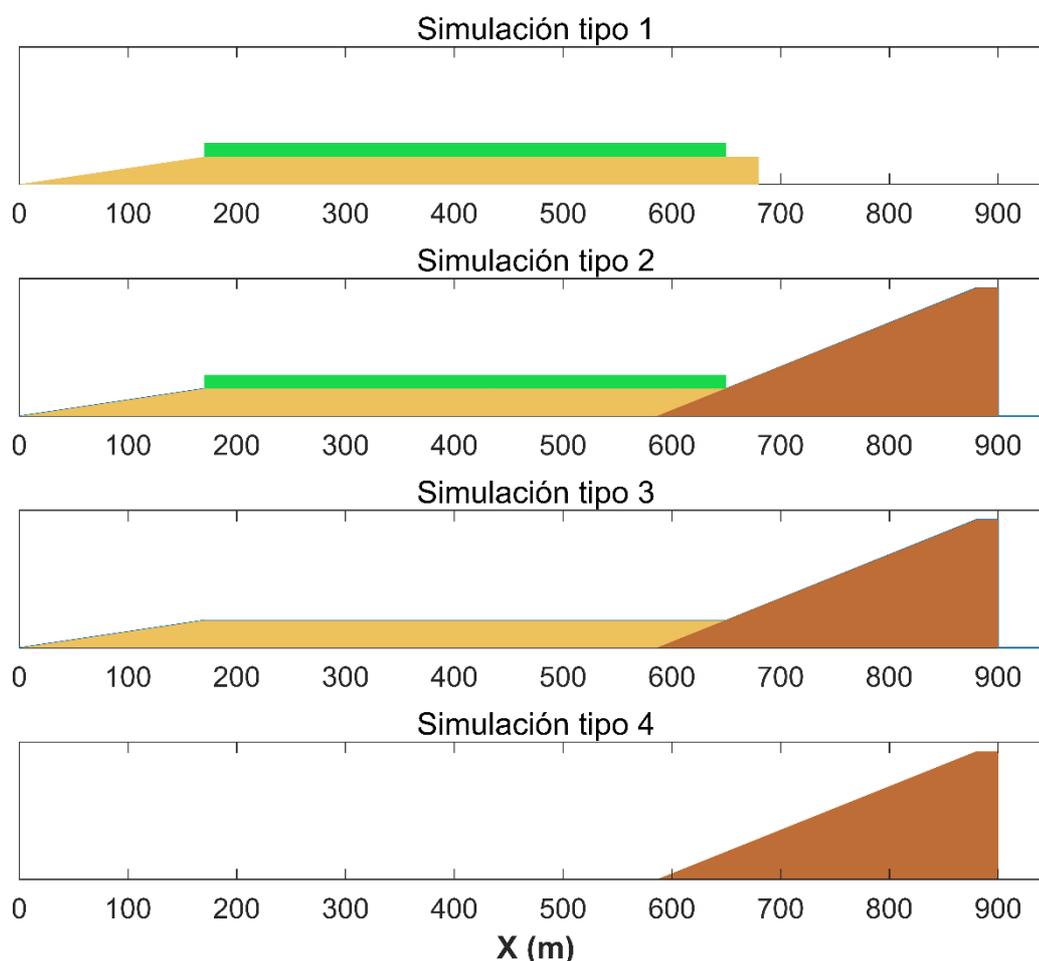


Figura 6. Esquema de tipologías de simulaciones en IH2VOF.

Como se mencionó en el diagrama de flujo previamente presentado, la simulación tipo 1 desempeña un papel crucial, ya que se utiliza tanto para calibrar el modelo como para determinar la altura de la ola incidente (H_i) a pie de dique, la cual se empleará en los cálculos posteriores del run-up empleando la formulación propuesta por Eurotop. Por su parte las simulaciones tipo 2 y tipo 3 se realizan para obtener las relaciones de porcentajes de reducción del run-up que permitirán comparar con los resultados obtenidos por el artículo en estudio, así mismo las simulaciones tipo 3 y tipo 4 se realizan con el fin de realizar las

verificaciones con la formulación presentada por Eurotop y en este sentido realizar un análisis más completo del comportamiento del run-up en cada caso particular estudiado.

3.6. Mallado numérico

El proceso de mallado numérico debe gestionarse para asegurar una representación precisa de los fenómenos físicos en estudio. Para cumplir con los requisitos establecidos por el modelo IH2VOF y obtener una solución satisfactoria, se siguen pautas específicas.

Es importante destacar que la malla de cálculo en IH2VOF está compuesta por celdas rectangulares. En la dirección x , las dimensiones de las celdas se ajustan para garantizar una representación adecuada de la longitud de onda. Se recomienda que cada longitud de onda sea representada por al menos 100 celdas, lo que implica $\Delta x=L/100$, donde Δx es la dimensión en x de cada celda. En la dirección y , el tamaño de la celda Δy se relaciona directamente con la altura de las olas, y se sugiere que haya 10 celdas por altura de ola, es decir, $\Delta y=H_s/10$. Además, se debe mantener una relación de aspecto de celda equilibrada en ambas direcciones, para lo cual se recomienda que $1<\Delta x/\Delta y<5$, siendo $\Delta x/\Delta y\approx 2$ la relación ideal.

Con respecto a los contornos, se coloca absorción en la generación y al final del dominio, esto con el fin de asegurar que los procesos se representen de la mejor forma.

A continuación, se presenta la discretización del mallado numérico para las simulaciones tipo 1.

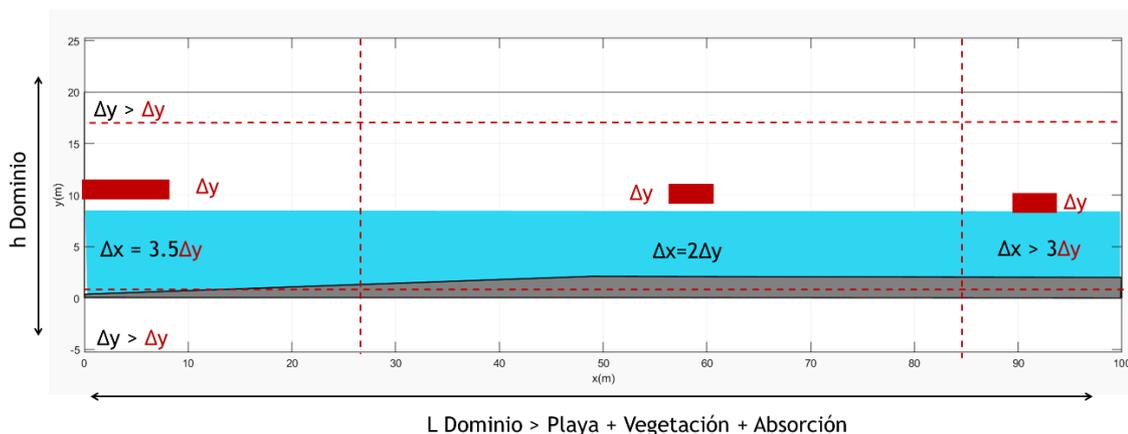


Figura 7. Discretización mallada numérico Simulación Tipo 1.

Así mismo, se representa la discretización del mallado numérico para las simulaciones tipo 2, 3 y 4.

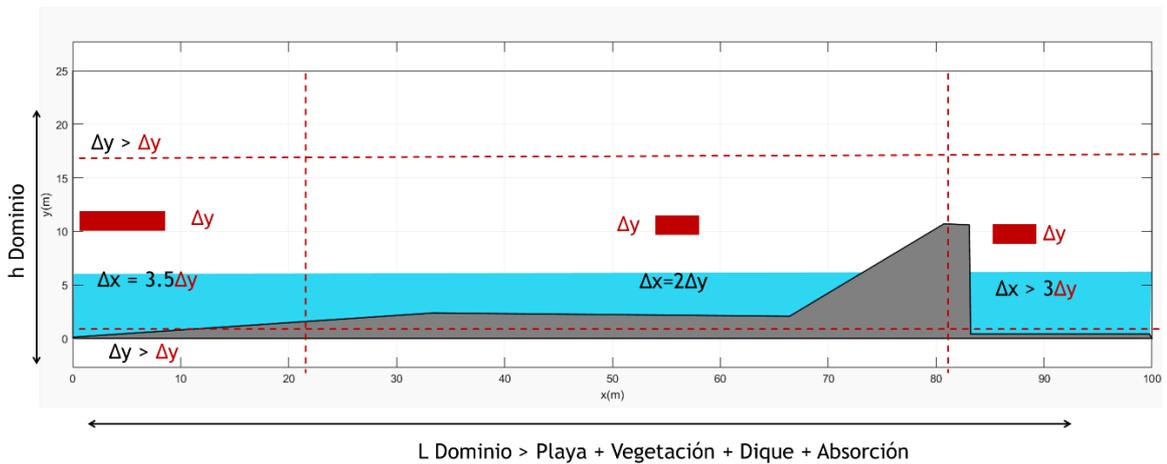


Figura 8. Discretización mallado numérico Simulación Tipo 2, 3 y 4.

En este sentido, se ha planteado la subdivisión de las dimensiones en dos subzonas en el eje X y una en el eje Y, siguiendo los siguientes criterios:

En el eje X, se han establecido tres zonas de refinamiento de la malla de la siguiente manera:

- La primera zona se extiende desde el inicio de la playa hasta alcanzar una profundidad de 1 metro en el eje Y. Teniendo en cuenta que la pendiente de la playa sigue una relación de 1:100, el centro de esta zona se define restando ese metro a la longitud total de la playa. Por ejemplo, si la longitud de la vegetación es de 80 metros y la profundidad del agua sobre la vegetación (y, por ende, la altura de la playa) es de 1.8 metros, se configura la malla de la siguiente manera: altura de la playa: 1.8 metros → relación 1:100 = 180 metros de longitud. Por tanto, 1.8 metros - 1 metro = 0.8 metros → 80 metros de longitud para el centro.
- La segunda zona de refinamiento se concentra en la región donde comienza la transformación del oleaje y su interacción con la vegetación.
- La tercera zona se configura con una malla más gruesa y se encuentra en la zona de absorción del oleaje.

En el eje Y, se sigue un procedimiento similar, garantizando siempre que el mayor refinamiento se tenga a lo largo del metro más alto de la playa y continúe hasta la

zona donde interesa medir el run-up, mientras que, el menor refinamiento, se tenga en la zona más profunda de la playa. En este caso de ejemplo, a partir de una profundidad inicial de 8.5 metros, se resta 0.8 metros. En este caso, el centro se sitúa a una distancia de 7.7 metros en la dirección vertical. Se asigna un grosor mayor a la zona de la playa de 1 metro y se refina la zona superior para permitir una evaluación adecuada de la superficie libre.

Cabe resaltar, que la forma de la malla se definió buscando que el máximo refinamiento de la malla esté en las zonas en las que se esperan mayores procesos de transformación del oleaje, es decir, la zona menos profunda de la playa, así mismo la zona que cubra la longitud de la vegetación, donde se espera tener oscilación de la superficie libre y la zona del dique (hasta la corona) donde se medirá el run-up.

En la siguiente figura se representa de forma esquemática las zonas de refinamiento, la primera zona en el eje X, donde la malla tiene menor refinamiento corresponde con la longitud de la playa en la que los procesos de transformación del oleaje no son tan relevantes con una relación $\Delta X = 3.5\Delta Y$, la siguiente zona corresponde a la longitud de la playa que contiene la vegetación, donde la malla es más fina con una relación $\Delta X = 2\Delta Y$ y la siguiente zona, representa la zona de absorción donde tampoco es necesario conservar una resolución alta.

Ahora bien, en el eje Y, se representa con una malla fina de $\Delta Y = 0.15$ en todo el dominio, excepto en la zona donde es más profunda la playa.



Figura 9. Mesh Quality IH2VOF: Simulación tipo 1.

En cuanto a la malla empleada para las simulaciones tipo 2, 3 y 4 en las que se contempla la presencia del dique impermeable, se define conservando las características descritas anteriormente y que se resumen a continuación:

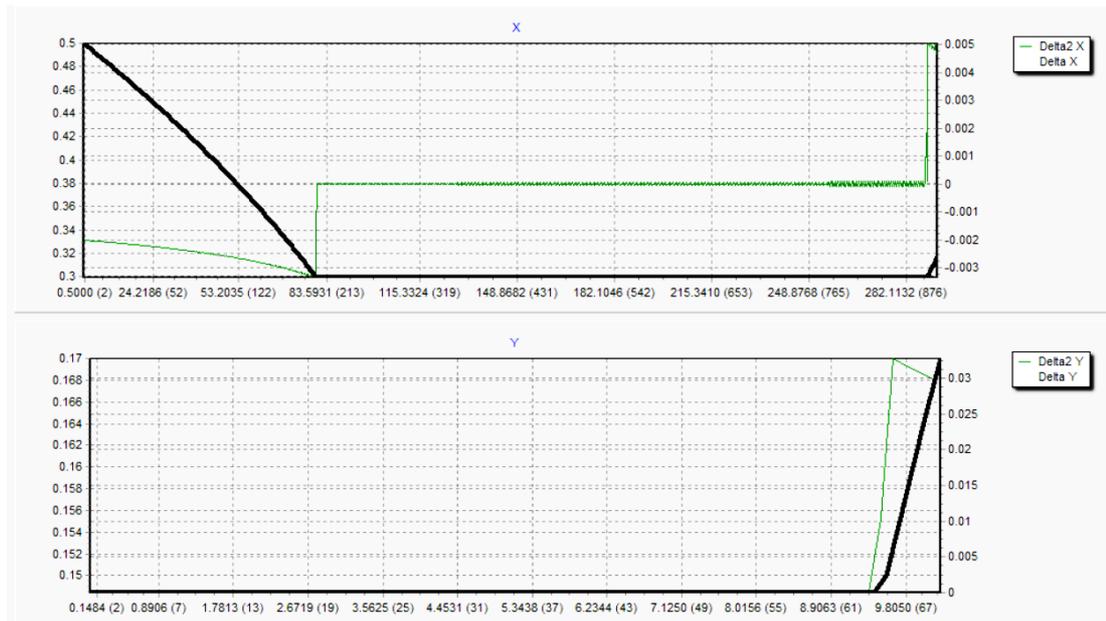


Figura 10. Mesh Quality IH2VOF: Simulaciones tipo 2,3 y 4.

- Se configuran las mallas con una relación de discretización $\Delta Y = 0.15$ y $\Delta X = 2 \Delta Y$.
- En el eje X, se inicia el proceso de refinamiento a partir de una profundidad de 1 metro.
- En el eje Y, se mantiene constante el número de celdas para permitir la observación detallada de los procesos de transformación del oleaje que tienen lugar en la playa y al interactuar con la vegetación y la malla es menos fina en la zona más profunda de la playa.
- El dique se caracteriza por tener una altura que oscila entre 1 y 4 metros, un francobordo de 3 metros y una pendiente con una relación de 1:4.
- Se establece un espacio detrás del dique con una longitud de 4 metros, asegurando así la absorción del agua.
- Se establece una corona del dique con una anchura de 1 metro, ya que se considera que no es necesario disponer de un espacio más amplio, dado que las mediciones se realizarán en el inicio de la corona del dique.

En cuanto al dominio, en el eje Y se considera que el dique tiene una altura que varía de acuerdo con las características de cada caso, por lo que se agrega un margen adicional de 1.5 metros por encima de esta altura, resultando un dominio en el eje Y en función de cada caso.

3.7. Número de olas

Dado que el Run-up del 2% es un parámetro de naturaleza estadística, es crucial considerar que la longitud de la serie de oleaje de forzamiento podría influir en su estimación. Por lo tanto, con base en experiencias previas en este ámbito, se ha decidido que todas las simulaciones a realizar para el desarrollo de este trabajo cuenten con al menos 500 olas, de manera que se pueda garantizar que los estadísticos a obtener sean robustos.

3.8. Calibración del modelo

Con el propósito de calibrar el modelo, se han realizado diferentes simulaciones del tipo 1 (ver Tabla 5 que se presenta más adelante), el cual se centra únicamente en la representación de la playa y la vegetación para evaluar la atenuación de la altura de la ola. Es importante destacar que, en el artículo científico de referencia, este proceso de atenuación se llevó a cabo utilizando el modelo SWAN, sin la presencia de un dique, y los resultados se presentaron en forma de porcentajes que varían de 0 a 100. Estos porcentajes se relacionan con la longitud de la vegetación representada en el eje X y la profundidad del agua sobre la vegetación representada en el eje Y.

Para realizar pruebas preliminares, se ha decidido efectuar tres cambios en el coeficiente de arrastre (C_D) en los cuatro casos planteados. Se ha considerado la utilización de valores de C_D igual a 0.4, 0.7 y 1 con el objetivo de determinar un valor apropiado para obtener una reducción de altura de ola acorde con el artículo de referencia, como se describe mejor en la metodología.

En la Tabla 5 que se presenta a continuación, se observa que con el valor inicial de C_D establecido en 0.4, en algunos casos no se logra obtener la reducción de altura de la ola reportada en el artículo científico. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de aumentar este valor para lograr una concordancia adecuada con los resultados allí reportados.

En relación con el coeficiente de arrastre (C_D), a partir de las simulaciones realizadas, se observa que los resultados de los casos no son particularmente sensibles a las variaciones en el valor de C_D . En este contexto, al emplear un C_D igual a 1, se obtiene una relación de H_f/H_i que se encuentra dentro de los intervalos reportados en la figura del artículo científico. Sin embargo, es importante señalar que estos resultados son conservadores y tienden a ubicarse cerca del límite inferior de dicho intervalo. Además, se debe tener en cuenta que los intervalos reportados son relativamente amplios para permitir una mayor precisión en la selección del C_D . Por lo tanto, se decide establecer $C_D=1$ como el valor para continuar con las simulaciones subsiguientes.

Tabla 6. Resultados obtenidos Ru 2% simulaciones tipo 2, 3 y 4.

No.	Profundidad agua sobre la vegetación (m)	Longitud Vegetación (m)	C_D	H_i	H_f	1- H_f/H_i Simulación Tipo 1 (%)	1 - H_f/H_i Artículo científico (%)	No. Olas H_i	No. Olas H_f
1	2,4	80	0,4	1,028	0,665	35,311	40-60	577	569
2	2,4	80	0,7	1,0056	0,6035	39,986	40-60	584	569
3	2,4	80	1	1,021	0,5868	42,527	40-60	575	556
4	3,7	80	0,4	1,1762	0,9602	18,364	20-40	611	592
5	3,7	80	0,7	1,1767	0,9116	22,529	20-40	509	498
6	3,7	80	1	1,1771	0,8958	23,898	20-40	501	488
7	3,8	480	0,4	1,1975	0,4504	62,388	60-80	509	473
8	3,8	480	0,7	1,2001	0,3749	68,761	60-80	614	523
9	3,8	480	1	1,1807	0,3422	71,017	60-80	617	527
10	3,3	480	0,4	1,0814	0,3492	67,709	60-80	602	514
11	3,3	480	0,7	1,1109	0,3043	72,608	60-80	595	504
12	3,3	480	1	1,078	0,2633	75,575	60-80	500	489

Así mismo, se llevaron a cabo verificaciones relacionadas con la evolución de la altura de la ola. En estas verificaciones, se observó que el oleaje comienza su proceso de transformación al entrar en contacto con la playa. En particular, se observó una reducción significativa en la altura de la ola en el tramo que se extiende desde los 320 metros, donde comienza la vegetación, hasta los 400 metros. En este sentido, es posible afirmar que la evolución de H_s es coherente de acuerdo con el comportamiento físico esperado, es decir, esta información indica que los resultados obtenidos mediante el modelo son coherentes y pueden ser usados en los análisis posteriores.

3.9. Resumen de casos

Resultados obtenidos con los tipos de simulación modelados que corresponden con:

Tabla 7. Resumen de casos.

Tipos de simulaciones				
Casos	Tipo 1 Playa y vegetación Hi (m)	Tipo 2 Playa, vegetación y dique Ru 2% (m)	Tipo 3 Playa y dique Ru 2% (m)	Tipo 4 Fondo plano y dique Ru 2% (m)
1	0.14	0.54	0.81	1.31
2	0.29	0.8	0.92	1.3
3	0.57	0.98	1.1	1.52
4	0.75	1.14	1.33	1.45
5	0.93	1.3	0.63	1.59
6	0.04	0.34	0.53	1.05
7	0.14	0.57	0.91	1.22
8	0.26	0.65	0.99	1.2
9	0.35	0.6	1.11	1.2

4. Discusión de resultados

En esta sección del documento se discutirán los resultados obtenidos a partir de las diferentes simulaciones y se realizará la comparación con los resultados obtenidos por el estudio de referencia.

Con el fin de comparar la metodología propuesta por este trabajo con el artículo de referencia y realizar las comparaciones con los porcentajes de reducción de run-up, era necesario obtener los valores de run-up del 2% con las simulaciones tipo 2 (con playa, vegetación y dique) y tipo 3 (con playa, sin vegetación y dique). Para ello, con los resultados obtenidos se realiza el siguiente cálculo: $1 - (\text{run-up simulación tipo 2} / \text{run-up simulación tipo 3}) * 100$, y de este modo se estima el porcentaje de reducción producido por la vegetación obtenido con el modelo IH2VOF simulando la solución completa y las interacciones entre los elementos de esta.

En siguiente instancia, con el fin de verificar la influencia de la playa en los porcentajes de reducción de run-up reportados por el artículo de referencia, se obtiene el valor del run-up del 2% a partir de la simulación tipo 4 (sin playa, sin vegetación y con dique) y se realiza el siguiente cálculo: $1 - (\text{run-up simulación tipo 2} / \text{run-up simulación tipo 4}) * 100$, para obtener el porcentaje de reducción de run-up y a partir de los resultados obtenidos era posible realizar un análisis de la importancia de la existencia de la playa que podría representar el cambio batimétrico producido por la existencia del campo de vegetación, en la implementación de una solución híbrida.

Ahora bien, en la siguiente tabla se relacionan los 9 casos estudiados por cada tipo de simulación y el valor del run-up del 2% obtenido para cada uno, así como el porcentaje de reducción de run-up del 2% producido por la vegetación y la playa y el porcentaje reportado por el artículo de referencia. En este sentido, al comparar los resultados, se observa, de forma general, que los resultados de run-up del 2% obtenidos en los casos de la simulación tipo 2 son menores a los otros 2, excepto en el caso 6, en cual se aumenta el valor del run-up. Es decir, de forma general, el menor run-up se obtiene para aquellos casos en los que están presentes tanto la vegetación como el cambio batimétrico. Así mismo, de acuerdo con lo esperado, es menor el run-up del 2% obtenido en la simulación tipo 3, con playa, que en la simulación tipo 4, sólo dique, remarcando la influencia de la playa en la transformación del oleaje en comparación con la simulación en la que no existe dicha playa.

Tabla 8. Comparación de resultados: reducción del porcentaje de run-up en un dique impermeable.

No.	Longitud de la vegetación (m)	Profundidad del agua sobre la vegetación (m)	Altura de la playa (m)	Simulación tipo 2	Simulación tipo 3	Simulación tipo 4	Reducción Run-up 2%	Reducción Run-up 2%	Reducción Run-up 2% Artículo científico %
				Run up 2% IH2VOF	Run up 2% IH2VOF	Run up 2% IH2VOF	1-(Run up Simulación tipo 2/Run up simulación tipo 3)*100	1-(Run up Simulación tipo 2/Run up simulación tipo 4)*100	
1	80	1	4.5	0.54	0.81	1.31	33%	59%	60-80
2	80	1.5	4	0.8	0.92	1.3	13%	38%	40-60
3	80	2.4	3.1	0.98	1.1	1.52	11%	36%	20-40
4	80	3	2.5	1.14	1.33	1.45	14%	21%	0-20
5	80	3.7	1.8	1.3	0.63	1.59	-106%	18%	0-20
6	480	1.25	4.25	0.34	0.53	1.05	36%	68%	40-60
7	480	2.4	3.1	0.57	0.91	1.22	37%	53%	20-40
8	480	3.3	2.2	0.65	0.99	1.2	34%	46%	40-60
9	480	3.8	1.7	0.6	1.11	1.2	46%	50%	20-40

En la figura 10 se representa la reducción del run-up del 2% a partir de los resultados obtenidos por el artículo de referencia y representados sobre la misma los porcentajes de reducción de run-up del 2% obtenidos a partir de las simulaciones tipo 2 y 3, y tipo 2 y 4, como se mencionó anteriormente.

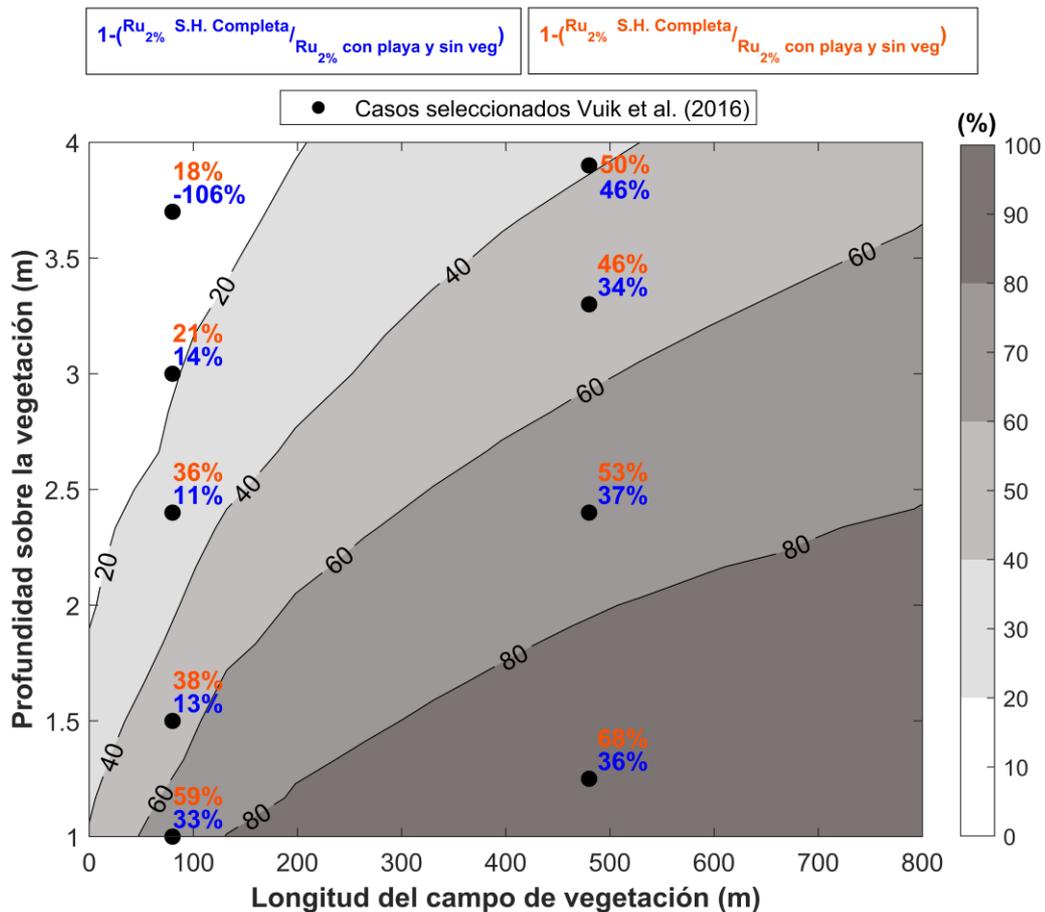


Figura 11. Reducción del run-up del 2% en el artículo y con el modelo IH2VOF.

La figura 10 muestra los casos de estudio seleccionados (puntos negros) y los resultados de reducción porcentual del run-up en el dique obtenidos para cada caso de solución híbrida completa (simulaciones tipo 2), respecto a los casos sin vegetación (simulaciones tipo 3 y 4). En el gráfico, el color azul representa las reducciones de run-up obtenidas por la solución híbrida completa (SH completa) respecto a los casos que tienen playa y dique, pero no tienen vegetación. Mientras que los resultados en color naranja corresponden a las reducciones de run-up calculadas respecto a los casos simulados en dominios con dique, pero sin playa ni vegetación.

El propósito de esta figura es analizar las discrepancias que pueden darse entre los resultados obtenidos a través del modelo IH2VOF y los valores reportados en el artículo científico de referencia, en el cual se llega a obtener el run-up del 2% en el dique aplicando la superposición de procesos. Estas discrepancias indican una sobreestimación en los resultados presentados en el artículo científico respecto a las reducciones de run-up encontradas con el modelo IH2VOF en los casos 1,2,3,4,6,7,8 y 9, puesto que en el caso 5 ocurre lo contrario, el run-up aumenta en un 106%, el cual se representa en la figura con un valor de -106%. Cabe señalar, que este caso es en el que la vegetación se encuentra más sumergida y, por lo tanto, los procesos de reflexión producidos entre el campo y el dique y la atenuación a lo largo del campo son menores.

Por el contrario, los porcentajes de reducción del run-up obtenidos a partir de la relación entre las simulaciones tipo 2 y tipo 4, son parecidos a los reportados por el artículo. Por ejemplo, los casos 3, 5 y 8 se encuentran en el mismo rango de porcentajes del estudio, y los 1, 2, 4 y 9 se encuentran cerca de los límites. En este sentido, los resultados indican que la metodología establecida por Vuik 2016 puede estar dejando de lado los procesos de transformación del oleaje inherentes a la playa.

Estas aproximaciones sugieren la necesidad de un análisis más detenido de los procesos de interacción entre el flujo y los elementos que componen la solución híbrida, en lugar de aplicar la metodología de la superposición de procesos aislados para la obtención del run-up. Todo esto, bajo el supuesto de que el modelo IH2VOF, debido a sus características y capacidades, es lo más aproximado que se tiene a la realidad para este caso de estudio.

En la figura 11 que se presenta a continuación, se relacionan en el eje X los 9 casos seleccionados por cada tipo de simulación. Así mismo, se indica la profundidad del agua sobre la vegetación, con el fin de conservar las variables analizadas por el artículo en estudio. El eje Y, representa el porcentaje de reducción del run-up del 2% en cada uno de los casos. En esta gráfica los rangos que se enmarcan con negro corresponden con los resultados del artículo de referencia, los círculos azules corresponden con los resultados de reducción de run-up obtenidos con el modelo IH2VOF a partir de las simulaciones tipo 2 y tipo 3 (estudio de la influencia de la vegetación) y los círculos de color naranja, representan los resultados obtenidos con las simulaciones tipo 2 y tipo 4 (estudio de la influencia de la vegetación y la playa).

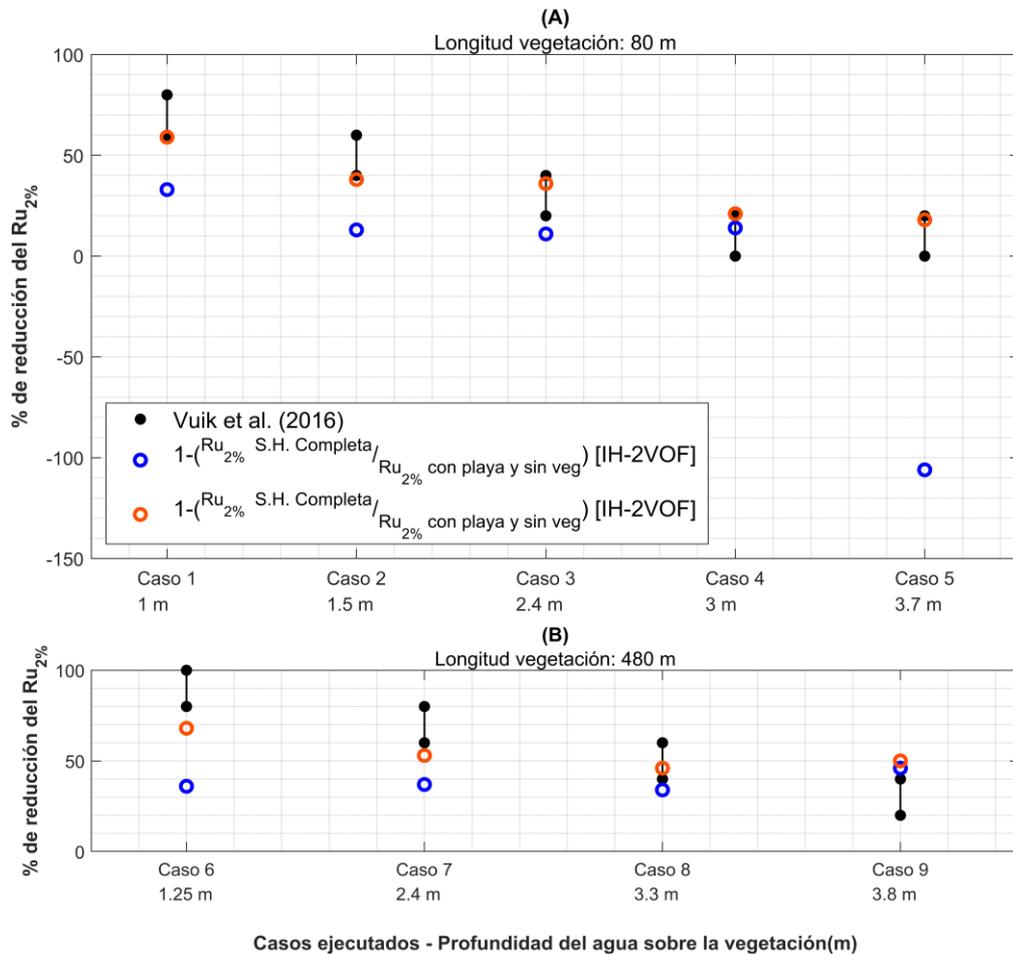


Figura 12. Comparación de resultados obtenidos en % de reducción del run-up del 2% sobre un dique impermeable.

La Figura 11 proporciona un resumen de los resultados obtenidos para los 9 casos de estudio seleccionados. A través de este gráfico, se puede observar de manera concisa cómo los resultados generados por el modelo, al considerar la presencia de playa y vegetación, tienden a ser inferiores a los valores reportados en el artículo científico. Es decir, de nuevo queda de relieve que el artículo sobreestima la capacidad de reducir el run-up del campo de vegetación al considerar una superposición de procesos independientes.

En contraste, aquellos casos que no incluyen playa y vegetación muestran una mayor proximidad a los porcentajes indicados en el artículo científico. Sin embargo, es importante destacar que se observan variaciones interesantes que requieren un análisis detenido, ya que, incluso en situaciones sin vegetación ni playa, se registran reducciones de run-up en algunos casos que son inferiores a las reportadas por el artículo científico. Estas discrepancias ofrecen

oportunidades valiosas para un estudio más profundo de los factores influyentes en la interacción del oleaje con este tipo de soluciones complejas.

En esta figura, se proporciona un detalle más completo de los resultados obtenidos para los 9 casos, dividiéndolos en dos grupos según la longitud de la vegetación: 80 metros y 480 metros. La figura muestra cómo, a medida que aumenta la profundidad del agua sobre la vegetación, la reducción del run-up tiende a ser menos significativa, lo que sugiere que los campos de vegetación pueden ser más eficaces en condiciones emergidas o con un grado de sumergencia pequeño, de acuerdo con lo reportado en la literatura.

Además, se observa que, en el caso 5 el campo de vegetación puede aumentar en lugar de reducir, en este caso particular, se evidencia un aumento del 106%, esto puede ser resultado de una serie de factores físicos que interactúan de manera compleja. En este sentido, la relación entre el calado y el run-up puede ser compleja y depende de varios factores, incluyendo la geometría de la costa, la topografía, la altura y el período de las olas incidentes. Por ejemplo, en ciertas condiciones, un calado más profundo puede permitir que las olas ganen energía a medida que se acercan a la costa. Esto puede deberse a la interacción entre las olas y la topografía submarina, que puede crear fenómenos de amplificación local del oleaje y en este caso particular, la altura de la vegetación de 30 cm no es suficiente para atenuar o disipar el oleaje. Como resultado, las olas pueden asomarse y esto a su vez aumentaría el run-up.

Es importante destacar que no siempre es el caso que un calado más grande aumente el run-up, ya que esto depende de las condiciones locales y la interacción compleja entre varios factores, por tanto, se recomienda verificar en próximos estudios con modelado numérico y pruebas en el campo para comprender mejor cómo se comportarán las olas en una ubicación específica y cómo afectará el calado al run-up.

Así mismo, la interacción entre la vegetación y las olas puede variar significativamente según la densidad y la altura de la vegetación, en algunos casos la vegetación puede no ser lo suficientemente densa o flexible para absorber eficazmente la energía de las olas, esto puede permitir que las olas mantengan su energía y altura, aumentando así el run-up. Así mismo, la introducción de vegetación puede modificar la topografía y la morfología de la costa, lo que puede alterar el comportamiento del run-up y ante eventos climáticos extremos, la vegetación puede no ser suficiente para reducir significativamente el run-up, ya que las olas pueden superar la capacidad de protección que proporciona.

A partir de lo anterior, se puede inferir que la interacción entre la vegetación y el oleaje en una solución híbrida para proteger la costa es un fenómeno complejo y depende de numerosos factores, incluida la densidad de la vegetación, su capacidad para absorber energía, la topografía costera y las condiciones climáticas. Por tanto, es necesario, diseñar de forma cuidadosa y monitorear constantemente para garantizar que la vegetación sea efectiva en la reducción del run-up en lugar de aumentarlo.

La Figura 11, también destaca que los porcentajes de reducción del run-up reportados en el artículo científico pueden ser sobreestimados (casos 1,2, 3,5,6,7 y 8), dado que los resultados arrojados por el modelo son menores en su mayoría.

4.1. Run-up obtenido con formulación Eurotop 2007

Con el fin de analizar la aplicabilidad que tienen las formulaciones existentes para el cálculo del run-up en soluciones híbridas, se llevaron a cabo simulaciones sin dique (simulaciones tipo 1) con el objetivo de obtener la altura de la ola al final de la vegetación (H_i) y emplearla como altura de ola incidente para la formulación propuesta por el EurOtop versión 2007 y así obtener el run-up suponiendo superposición de procesos, como en trabajos anteriores.

El propósito de este análisis consiste en verificar si los valores obtenidos mediante el modelo se ajustan a la curva propuesta por EurOtop para el run-up del 2% sobre estructuras lisas impermeables. La Figura 12 que se presenta a continuación muestra que, en los casos 3, 4, 5, 8 y 9, los valores se sitúan por debajo de lo establecido por EurOtop. Esto sugiere que la formulación en sí misma podría generar una sobreestimación en la reducción del porcentaje de run-up, lo que tiene sentido, al comparar con los resultados que se obtienen en el artículo, en cual se denota una clara sobre estimación en los porcentajes del run-up del 2%.

Así mismo, los casos, 1, 6 y 7 se representan por fuera de las bandas de confianza, pero en el lado superior de la gráfica, en el caso 6 especialmente se denota como un dato atípico, dado que en estos casos incide que la altura de ola se haya reducido tanto después de interactuar tanto con la playa como con la vegetación.

Ahora bien, solo un caso se representa en la curva desarrollada por Eurotop. El caso 2 presenta la particularidad de ser un caso, cuya longitud de playa es extensa y el calado sobre la vegetación es bajo con respecto a los demás casos, sin embargo, en este caso la relación entre el run-up y altura de ola de 0.14 m, permite que se encuentre en los rangos establecidos por la formulación teórica,

lo que no ocurre en otros casos donde la altura de ola más pequeña, puede generar que los casos salgan de las curvas de confianza.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de un examen más detenido de los procesos involucrados en la interacción del oleaje con la vegetación para una evaluación precisa y la necesidad de nuevas formulaciones para poder llevar a cabo el diseño de soluciones híbridas, ya que las formulaciones desarrolladas para soluciones rígidas no dan una buena estimación del run-up sobre la estructura en la mayoría de los casos.

A continuación, se aplica la formulación descrita con el fin de realizar la comparación de resultados con Eurotop:

La predicción para el valor medio de run-up 2% para rocas o pendientes ásperas se puede describir mediante:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m_0}} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1.0} \quad (3)$$

Para la tendencia media del primer tramo ($\mu=1.65$; $\sigma=0.10$), se tiene:

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m_0}} = 1 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1.0}}} \right) \quad (4)$$

De $\xi_{m-1.0} = 1.8$ el factor de rugosidad $\gamma_{f\text{surging}}$ aumenta linealmente hacia arriba a 1 por $\xi_{m-1.0} = 10$, que puede ser descrito por:

$$\gamma_{f\text{surging}} = \gamma_f + (\xi_{m-1.0} - 1.8) * (1 - \gamma_f)/8.2 \quad (5)$$

$$\gamma_{f\text{surging}} = 1.0 \text{ for } \xi_{m-1.0} > 10$$

Para un núcleo permeable se alcanza un máximo para $Ru_{2\%}/H_{m_0} = 1.97$
(Eurotop, 2018)

Ahora bien, considerando que Eurotop representa el Run-up en función del parámetro de rotura para pendientes impermeables, donde $Ru_{2\%} / H_{m_0}$ representa el run-up relativo y H_{m_0} representa la altura de ola incidente asociada al momento de orden cero que también se relaciona con altura de ola significativa H_s que es la media del tercio de las olas mayores del estado de mar, a continuación, se explica cómo se obtiene con la siguiente formula:

$$H_s = 4.004 \cdot \sqrt{m_0} \quad (6)$$

Donde m_0 se define como el momento de orden cero y equivale la suma total de cada uno de los paquetes espectrales individuales (volumen bajo la superficie del espectro):

$$m_{0i,j} = S_{i,j} \cdot \Delta f_{i,j} \cdot \Delta \theta_{i,j} \quad (7)$$

$$m_0 = \sum_{i=1, j=1}^{nf, na} m_{0i,j} \quad (8)$$

Donde

- nf = número de frecuencias
- na = número de ángulos
- $i=1, 2, 3, \dots, nf$
- $j=1, 2, 3, \dots, na$

Y el parámetro de rotura $\xi_{m-1,0}$, el cual relaciona la pendiente del talud y la inclinación de la ola, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{(H_{m_0})/(L_{m-1,0})}} \quad (9)$$

Es importante señalar que la longitud de onda en aguas profundas, $L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2/2\pi$, depende del período medio de la energía, $T_{m-1,0}$, que es la elección más adecuada para el cálculo del run-up cuando el espectro de olas presenta formas complejas o cuando se utilizan espectros teóricos como JONSWAP o TMA de acuerdo con lo establecido por Eurotop (2018).

Los cálculos descritos anteriormente, se aplicaron a las superficies libres obtenidas por medio de sensores al final de la vegetación en las simulaciones tipo 1.

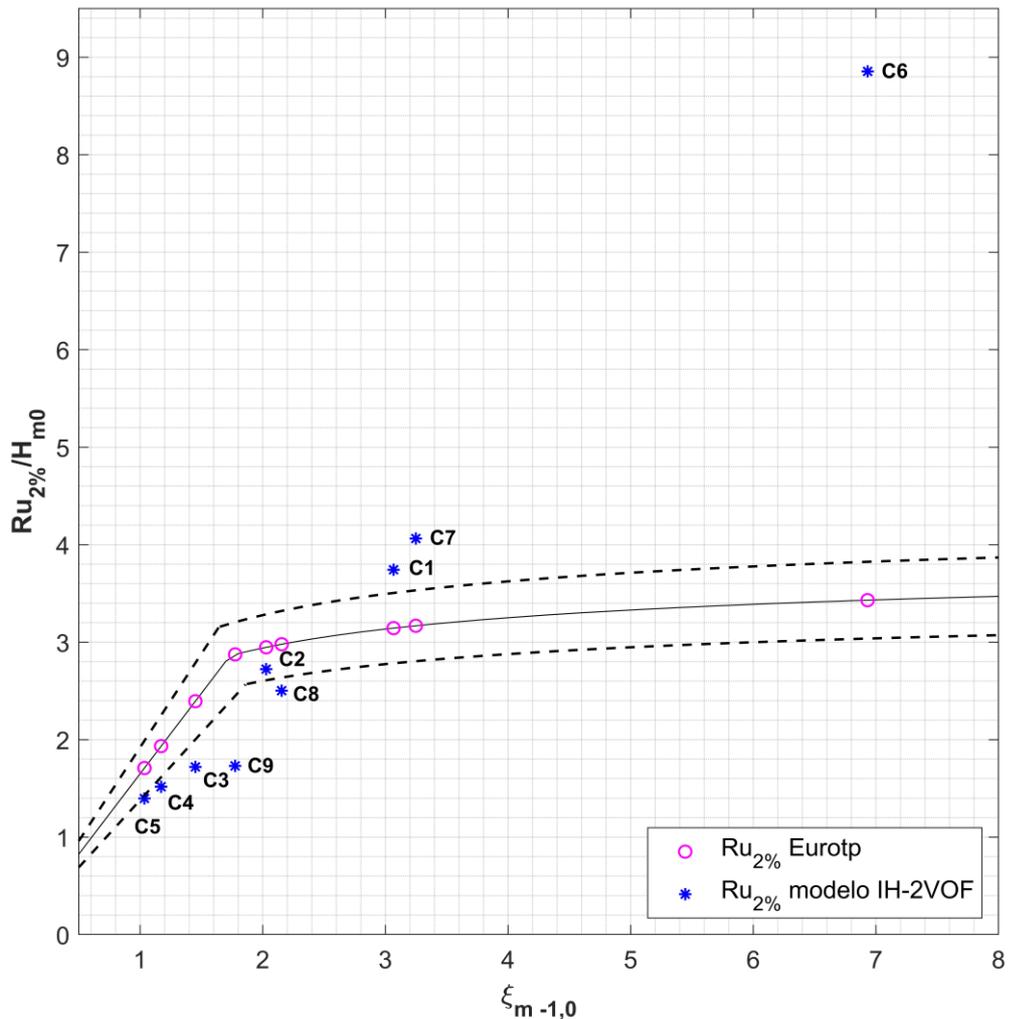


Figura 13 Run-up relativo obtenido a partir de la formulación de Eurotop 2007.

En este sentido, en la Figura 12, se exhibe el run-up relativo en función del parámetro de rotura, considerando los diversos casos ejecutados en el estudio. La representación gráfica permite observar cómo los campos de vegetación ejercen una influencia significativa en el comportamiento del run-up, y cómo varios de los casos simulados se desvían notablemente de la formulación analítica típicamente aplicada en el diseño de obras de protección costera.

Para valores del parámetro de rotura (ξ_m) menores a 3, se identifican seis casos que se encuentran fuera de las bandas de confianza del comportamiento previamente establecido por Eurotop (2007). Estos casos se caracterizan por presentar calados medios y altos sobre la vegetación, así como una longitud

sustancial tanto de la playa como de la vegetación. Por ende, estos escenarios experimentan una mayor transformación del oleaje. Notablemente, en estos casos, el efecto de la vegetación sobre el oleaje es menos pronunciado, lo que resulta en una subestimación del run-up resultante cuando se combina con la presencia de una rampa impermeable.

De manera interesante, un solo caso se encuentra dentro de la curva propuesta por Eurotop, y corresponde al caso 2, que se caracteriza por tener un calado menor sobre la vegetación, pero una longitud de playa significativamente mayor. Por otra parte, se destacan tres casos que se ubican por encima de la curva de Eurotop. Al analizar detenidamente estos casos, se revela que se asocian con situaciones en las cuales la profundidad del agua sobre la vegetación es reducida. En estas condiciones, al llegar al final del campo de vegetación, las olas resultantes presentan una altura extremadamente baja, de aproximadamente 15 centímetros. Este fenómeno resulta en un aumento significativo de la relación entre el run-up y la altura de ola de orden cero (H_{mo}), lo que explica su ubicación por encima de la curva de Eurotop.

Estos hallazgos resaltan la crítica influencia de la profundidad del agua sobre la vegetación en la dinámica del run-up, subrayando la importancia de considerar cuidadosamente este factor en futuras investigaciones y en el desarrollo de soluciones de protección costera.

Tabla 9. Resultados obtenidos: formulación Eurotop 2007.

No.	Longitud de la vegetación (m)	Profundidad del agua sobre la vegetación (m)	Altura de la playa (m)	Simulación Tipo 2	H_{mo} Simulación Tipo 1	Ru/ H_{mo}	E_{mo}
				Run up 2%			
1	80	1	4.5	0.54	0.14	3.74	3.07
2	80	1.5	4	0.8	0.29	2.72	2.03
3	80	2.4	3.1	0.98	0.57	1.72	1.45
4	80	3	2.5	1.14	0.75	1.52	1.17
5	80	3.7	1.8	1.3	0.93	1.40	1.04
6	480	1.25	4.25	0.34	0.04	8.85	6.93
7	480	2.4	3.1	0.57	0.14	4.06	3.25
8	480	3.3	2.2	0.65	0.26	2.50	2.15
9	480	3.8	1.7	0.6	0.35	1.73	1.78

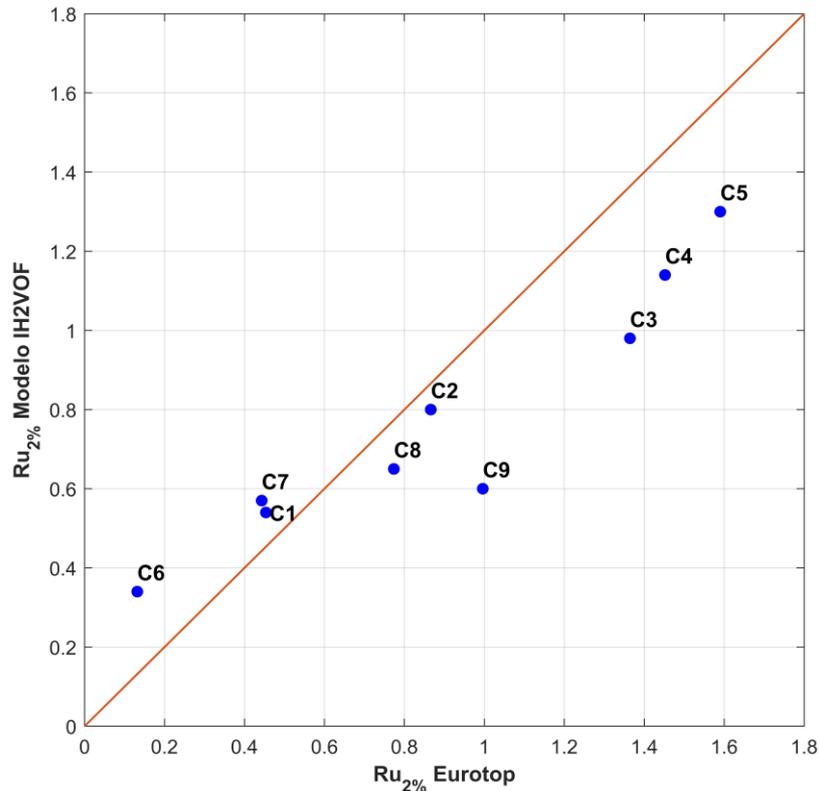


Figura 14. Relación entre el Run-up obtenido a partir del modelo numérico y el obtenido mediante formulación de Eurotop.

En relación con la figura previamente presentada, se observa una tendencia general en la cual los valores de run-up obtenidos mediante el modelo IH2VOF se sitúan por debajo de aquellos obtenidos mediante la formulación propuesta por Eurotop. Esta observación indica que el modelo IH2VOF produce resultados que, en términos generales, subestiman el run-up en comparación con la formulación Eurotop. Además, se aprecia que algunos casos se asemejan a la formulación Eurotop, mientras que otros presentan una discrepancia significativa con el ajuste central de la gráfica.

Específicamente, se destaca que los casos 1, 2, 7 y 8 exhiben una mayor proximidad a la línea central de la gráfica, lo que indica una mayor similitud entre los resultados de run-up del 2% arrojados por el modelo y por la formulación Eurotop. Esta coincidencia puede atribuirse al hecho de que estos casos presentan un calado menor sobre la vegetación y, al mismo tiempo, mayores longitudes de playa. En estos escenarios, los resultados del modelo superan los proporcionados por la formulación Eurotop, lo que sugiere que esta última puede

subestimar los valores de run-up. Esta discrepancia plantea la posibilidad de que soluciones híbridas que combinen enfoques puedan ser necesarias para abordar de manera eficiente las demandas de run-up y prevenir problemas relacionados con la seguridad costera. En estos casos particulares se destaca, que tal vez lo esperado puede ser lo contrario: que los casos con menos calado y más longitud de playa sean los que más difieren de los resultados propuestos por Eurotop, porque son justamente los casos en los que el flujo tiene mayor interacción con la vegetación y sufre más transformación a lo largo de la playa.

Por otro lado, el caso 6 presenta una baja similitud, lo que se atribuye a su condición única: la mayor longitud de playa y vegetación, junto con la menor profundidad del agua sobre la vegetación. En este caso, el oleaje experimenta una transformación significativa, y el modelo refleja la disminución notable en el número de olas debido a la interacción con la vegetación.

Los casos 3, 4, 5 y 9, por otro lado, se caracterizan por presentar profundidades de agua sobre la vegetación que varían entre medias y altas, tanto en escenarios con longitudes de playa de 80 metros como en aquellos con longitudes de vegetación de 480 metros. Estos casos exhiben los valores de run-up más altos de la muestra. En estos casos particulares, la formulación Eurotop tiende a sobreestimar los resultados de run-up, mientras que el modelo IH2VOF ofrece una representación más precisa de la compleja transformación del oleaje al interactuar con la playa, la vegetación y el dique. Esta discrepancia plantea desafíos adicionales en el diseño y el cálculo de estructuras de protección costera.

4.2. Análisis del Run-up con la implementación de una solución híbrida

En base a los datos presentados en las Figuras 12 y 13, es evidente que el run-up calculado mediante las formulaciones de Eurotop es mayor que el reportado por nuestro modelo en los casos 2, 3, 4, 5, 8 y 9. Estos casos comparten similitudes en cuanto a las características de calado sobre la vegetación y longitud de la playa, ya que corresponden a los dominios medianos de los casos modelados. Estos resultados conjuntos indican una consistente sobreestimación del run-up por parte de la formulación, lo que sugiere posibles deficiencias en la consideración de los procesos de transformación del oleaje y el run-up en un dique impermeable.

En de los casos 2, 3, 4 y 5, que comparten la misma longitud de vegetación, pero varían en el calado y la longitud de la playa, se observa que, cuando la vegetación está sumergida a profundidades significativas, su efecto en la reducción del run-

up es menos relevante. Por otro lado, los casos 8 y 9 comparten una longitud de vegetación de 480 metros y calados mayores sobre la vegetación. En estos casos, el oleaje ha experimentado transformaciones significativas, que no son adecuadamente consideradas por la formulación.

Los resultados presentados en la Figura 13 también revelan discrepancias notables entre los datos, especialmente en los casos 3, 4 y 5, donde Eurotop sobreestima el run-up. Sin embargo, estas discrepancias pueden ser atribuidas a las características específicas de estos casos, como se mencionó previamente.

En particular, el caso 2 muestra buena similitud entre los datos, y en la Figura 12, es el único caso que se encuentra dentro de la curva propuesta por Eurotop. Esto se debe a que presenta un calado bajo sobre la vegetación (1.5 m sobre vegetación de 30 cm), una longitud de playa de 400 m y una H_{m0} de 30 cm, lo que lo hace congruente con la curva de Eurotop.

En lo que respecta a los casos 1, 6 y 7, Eurotop tiende a subestimar el run-up. Sin embargo, queda claro que la formulación no limita los valores máximos posibles, ya que en casos con valores de H_{m0} de 0.14 y 0.03 m, la relación Ru/H_{m0} produce valores elevados en el eje Y, como se ve en la Figura X con el caso 6. La Figura 13 también muestra que estos casos tienen correlaciones entre los resultados, donde los casos 1 y 7 muestran resultados similares a los del modelo, mientras que el caso 6 exhibe una sobreestimación del run-up por el modelo en un 60%. Estos tres casos representan las simulaciones más grandes en términos de longitud de playa y vegetación, así como un menor calado sobre la vegetación, lo que influye significativamente en la transformación del oleaje y, por lo tanto, en el cálculo del run-up.

El caso 5, que previamente mostraba un aumento del run-up del 106%, ahora se presenta como un valor subestimado por la curva de Eurotop debido a su H_{m0} más alta (0.93 m). Esta discrepancia en los resultados de Eurotop y el modelo se debe a que nuestro modelo considera los procesos de transformación del oleaje en su interacción con la playa, la vegetación y, finalmente, el dique.

En resumen, los resultados indican que Eurotop tiende a sobreestimar o subestimar el run-up en función de las características específicas de los casos, lo que sugiere la necesidad de una formulación más precisa que tenga en cuenta los procesos de transformación del oleaje en condiciones variables.

5. Líneas de trabajo futuro

En trabajos futuros sería viable ampliar las variables involucradas, por ejemplo, realizar análisis sobre la atenuación de la altura de ola y analizar también los efectos de reducción del rebase sobre un dique impermeable, considerando que estos parámetros se encuentran también analizados en el artículo científico de estudio y es posible por lo tanto realizar comparaciones.

En este trabajo se realizaron algunos análisis de atenuación de la altura de ola por vegetación, los cuales se presentan a continuación, sin embargo, este proceso no se pudo llevar a cabo con todos los casos de las simulaciones tipo 2, 3 y 4, las cuales incluían dique, considerando que en los casos con dominios más grandes se observaba la aparición de una onda larga sobre la cual oscilaba el oleaje y en este caso el procedimiento para retirarla de los resultados del modelo resultó complejo, por tanto en futuros estudios se recomienda realizar análisis completos en cuanto a la reducción de solicitudes sobre un dique.

A continuación, se presentan algunos resultados obtenidos en el análisis de la atenuación de olas debida a la presencia de un campo de vegetación a pie de dique:

Para el caso 2, cuyas características corresponden con longitud de la vegetación: 80m, profundidad del agua sobre la vegetación: 1.5 m, altura de la playa: 4 m, es posible observar que en este caso además de influir el recorrido que hace el oleaje durante el dominio, también influye la interacción del mismo con la playa y el campo de vegetación, en este sentido se denota un comportamiento similar cuando el oleaje interactúa con la playa y la vegetación que cuando solo interactúa con la playa, sin embargo, también es posible observar que si existe una reducción menor en el oleaje cuando influyen todos los procesos, la altura de ola pasa de ser 0.84 m a 0.53 m, es decir una reducción de altura de ola del 37%.

Con respecto al caso 5, es interesante evidenciar que cuando el calado sobre la vegetación disminuye también aumenta el porcentaje de atenuación de altura de ola, esto debido a que el oleaje interactúa más con el fondo y por ende se facilita la disipación de energía.

Se analiza la atenuación del oleaje en el caso 5, cuyas características corresponden con: longitud de la vegetación: 80m, profundidad del agua sobre la vegetación: 3.7 m, altura de la playa: 1.8 m.

Es importante destacar que la evolución de la altura de ola a lo largo del dominio se ve atenuada por la distancia que recorre en el eje X, en este caso no se presenta una variación representativa por la presencia de la playa, dado que el comportamiento en los dos tipos de simulaciones resulta similar, sin embargo, si es posible observar diferencias en el oleaje que interactúa con el campo de vegetación, dado que se denota que la altura de ola pasa de 0.93 m a 0.67, calculando una reducción del 28% de la altura de la ola, lo que a su vez concuerda con el porcentaje de reducción presentado en el artículo científico analizado.

Estos resultados a su vez muestran que cuando el calado sobre la vegetación es considerable, el porcentaje de reducción de la altura de ola es bajo, dado que la interacción del oleaje con la vegetación es menor también, se puede intuir entonces que la vegetación puede ser más eficiente en calados menores.

Y en el caso 9 cuyas características corresponden con: longitud de la vegetación: 480m, profundidad del agua sobre la vegetación: 3.8 m, altura de la playa: 1.7 m.

Finalmente, en este caso, la longitud de la vegetación ha aumentado en gran medida y por ende también la distancia que debe recorrer el oleaje, esto trae consigo que se presenten mayores procesos de transformación del oleaje, en este sentido si es posible visualizar que el oleaje puede interactuar más con la vegetación dado que al inicio de esta la altura de ola se encuentra en un valor de 1.2 m y al finalizar el recorrido por la vegetación, la altura de ola resultante corresponde a un valor de 0.29 m, es decir, se obtuvo una reducción de altura de ola de 78%. Lo anterior, considerando que la altura de ola ha interactuado con un campo de vegetación y una playa bastantes extensos.

En este contexto, es importante destacar que los campos de vegetación ejercen una notable influencia en la reducción de la altura de las olas, y esta reducción se incrementa significativamente a medida que la longitud del campo de vegetación aumenta. Un hallazgo interesante es que el coeficiente de atenuación, calculado para diferentes longitudes de campos de vegetación en nuestros modelos, parece mantenerse constante, independientemente de la longitud específica del campo en todos los casos analizados.

Además, sería beneficioso explorar con mayor profundidad el impacto de las ondas infragravatorias, dado que el run-up puede variar debido a las ondas largas liberadas por grupos de olas. Este aspecto podría proporcionar una comprensión más completa de los fenómenos en juego.

Para un análisis más exhaustivo, sería valioso ampliar el conjunto de casos estudiados, incluyendo diferentes tipos de soluciones híbridas. Esto permitiría

fortalecer la comparación de diversas formulaciones de run-up y, en última instancia, podría llevar al desarrollo de una nueva formulación que permita estimar con mayor precisión esta variable en el contexto de soluciones híbridas. También podría ayudar a cuantificar los posibles errores derivados de la aplicación de formulaciones diseñadas originalmente para soluciones convencionales.

5.1. Análisis de Overtopping

Así mismo, se realizó la verificación en el modelo para obtener overtopping y para las simulaciones propuestas, la solicitud de análisis de overtopping al modelo no produjo resultados significativos en estos casos específicos, principalmente debido a la configuración única de cada uno. Este hallazgo también sugiere que las formulaciones empleadas en Eurotop pueden generar una sobreestimación de los valores obtenidos en cada caso. Por lo tanto, se destaca la importancia de analizar los procesos de manera integral y no de forma individualizada. Es crucial evaluar la interacción desde la generación de las olas, su paso a través de la vegetación y, finalmente, la interacción con el dique. Este enfoque holístico proporciona una comprensión más completa de la dinámica costera y puede ayudar a refinar las metodologías de diseño y protección costera.

6. Conclusiones

Con la metodología establecida se han alcanzado los objetivos planteados. En este sentido fue posible analizar la hipótesis asociada a la superposición de procesos en la reducción del run-up en un dique impermeable, permitiendo comparar con los resultados obtenidos con los resultados del artículo científico.

En este sentido, es posible concluir que analizar las soluciones híbridas de protección costera utilizando modelos numéricos que integren todos los procesos de transformación del oleaje, en lugar de depender únicamente de formulaciones teóricas, es esencial por varias razones: la modelación numérica permite representar con mayor precisión y realismo la interacción compleja entre las estructuras costeras, la vegetación y el oleaje, así mismo, con el modelo es posible representar variedad de condiciones costeras y climáticas, lo que permite evaluar el desempeño de las soluciones híbridas en diferentes escenarios, desde condiciones de marea baja hasta eventos de temporales. Lo descrito anteriormente se corrobora con los resultados obtenidos, dado que en primera instancia revelaron diferencias significativas de los resultados

obtenidos a través del modelo IH2VOF y los valores reportados en el estudio, en el cual se llega a obtener el run-up del 2% en el dique aplicando la superposición de procesos. Estas discrepancias indican una sobreestimación en los resultados de disminución de run-up producido por la vegetación y el cambio batimétrico asociado a ella presentados en el artículo científico con respecto a las reducciones encontradas con el modelo IH2VOF, exceptuando un caso en el que ocurre lo contrario, el run-up no se reduce e incluso aumenta en un 106%. Por tanto, se deduce la necesidad de un análisis más detenido de los procesos de interacción entre el flujo y los elementos que componen la solución híbrida, ya que la superposición de procesos puede conducir a una sobreestimación de la capacidad de reducción de run-up producida por el campo de vegetación y, por lo tanto, unos valores reales de run-up mayores a los estimados. Esto puede tener implicaciones muy importantes por ejemplo en la definición de la cota de coronación de la estructura rígida, que podría ser subestimada.

Con base en los datos y análisis presentados, se puede concluir que existe una discrepancia significativa entre los resultados de las formulaciones de Eurotop y los obtenidos a través del modelo numérico en relación con el cálculo del run-up en diversos casos de estudio. Esta discrepancia es especialmente notoria en los casos 3, 4, 5, 8 y 9, que comparten similitudes en términos de calado sobre la vegetación y longitud de la playa. En estos casos, Eurotop tiende a sub-estimar el run-up relativo, lo que sugiere posibles deficiencias en la formulación en cuanto a la consideración de los procesos de transformación del oleaje.

Además, se observa que la influencia de la vegetación en la reducción del run-up es menos relevante cuando la vegetación está sumergida a profundidades significativas. Por otro lado, en casos con una longitud de vegetación considerable y calados mayores sobre la vegetación, el oleaje experimenta transformaciones significativas que no son adecuadamente consideradas por la formulación de Eurotop.

Los resultados también indican que Eurotop sobrestima el run-up en los casos 1, 6 y 7, pero no limita los valores máximos posibles, ya que en casos con valores de altura significativa de las olas (H_{m0}) bajos, la relación Ru/H_{m0} produce valores elevados. Estos casos representan simulaciones con longitudes de playa y vegetación considerables, así como calados más bajos sobre la vegetación, lo que influye significativamente en la transformación del oleaje y, por lo tanto, en el cálculo del run-up.

En este sentido se concluye que al realizar una comparativa entre los resultados obtenidos a partir de formulación analítica, en concreto el Eurotop, y los

obtenidos con el modelo numérico, simulando los casos tipo 1 para obtener la altura de ola incidente a pie de estructura, con la cual se aplicó la formulación del Eurotop correspondiente para el cálculo del run-up, en algunos casos se obtuvo una sobreestimación del run-up (casos 1, 6 y 7), mientras que, en la mayoría, se obtuvo una subestimación (casos 3, 4, 5, 7, 8 y 9), siendo solo un caso el que encajaba en la curva propuesta por la formulación. Esto sugiere que las fórmulas desarrolladas para estructuras rígidas no son directamente aplicables a casos de soluciones híbridas y más estudio es necesario para dar lugar a nuevas formulaciones que permitan estudiar este tipo de soluciones.

En general, estos hallazgos resaltan la importancia de utilizar modelos numéricos que integren todos los procesos de transformación del oleaje al evaluar la efectividad de soluciones de protección costera, ya que proporcionan una representación más precisa y completa de los procesos costeros en condiciones variables. La formulación de Eurotop, aunque valiosa, puede requerir ajustes y refinamientos para abordar de manera más precisa las condiciones específicas de cada caso de estudio y mejorar la precisión en la estimación del run-up costero.

7. Referencias

- Anderson, M. E. (2014). Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.004>, 83, 82–92.
- Borsje, B. W. (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*. [https://doi.org/10.1016/j.ecole](https://doi.org/10.1016/j.ecole.2011.01.001), 37(2), 113–122.
- Eurotop. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*. www.overtopping-manual.com.
- Gedan, K. B. (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1), 7–29.
- Jones, H. P. (2012). Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/nclimate1463>, 2(7), 504–509.
- Maza, M. L. (2013). A coupled model of submerged vegetation under oscillatory flow using Navier-Stokes equations. *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.009>, 80, 16–34.

- Mendez, F. J. (2004). An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. . *Coastal Engineering*, 51(2), 103–118.
- Shores, K. (2015). Special Section on Coastal Engineering and Climate Change. *www.sciencemag.org*, 50(6262).
- Van Loon-Steensma, J. M. (2016). Risk reduction by combining nature values with flood protection? . *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160713003> , 7, 1–10.
- Vuik, V. J. (2016). Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes. . *Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.06.001>, 116, 42–56.



ANEXO I
DESCRIPCIÓN MODELO NUMÉRICO
IH2VOF

IH2VOF

El modelo numérico IH2VOF (www.ih2vof.ihcantabria.com) es un modelo desarrollado en el IHCantabria orientado al estudio de la interacción flujo-estructura, es decir, al estudio de la acción del oleaje sobre estructuras marítimas y la hidrodinámica en la zona de rompientes.

IH2VOF es un modelo en plena expansión y el más avanzado entre los de su categoría para el estudio de la interacción oleaje-estructura. Entre sus principales características destacan su capacidad para la simulación de todo tipo de estructuras marítimas a escala de prototipo o laboratorio; proporciona el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional en vertical; y es capaz de simular todo tipo de oleajes: regular, irregular, onda solitaria, etc. Todo ello proporciona al modelo IH2VOF una gran versatilidad, siendo capaz de simular dominios a escala de prototipo de hasta un kilómetro. El IHCantabria ha calibrado y validado el modelo para el caso de diques en talud de materiales sueltos mediante numerosos ensayos de laboratorio, además de haber sido aplicado al diseño de obras marítimas.

IH2VOF resuelve las ecuaciones bidimensionales de Navier-Stokes, con el promediado de Reynolds, para tener en cuenta el papel de los procesos turbulentos del flujo. Así, cuenta con un modelo de cierre turbulento $k-\epsilon$ para la resolución de la turbulencia. Para la resolución de los medios porosos, como son los mantos de las estructuras de materiales sueltos, se realiza un promediado en un volumen de control. En esos casos por tanto el modelo resuelve las llamadas ecuaciones VARANS (Volume-Averaged/Reynolds-Averaged Navier-Stokes). El seguimiento de la superficie libre se resuelve mediante la técnica VOF (Volume Of Fluid).

En el desarrollo del modelo IH2VOF, se ha prestado una especial atención a los procesos de generación/absorción del oleaje. El modelo cuenta con un sistema de generación basado en un condición de Dirichlet en el que se introduce en el dominio las velocidades horizontal y vertical, así como la superficie libre, de la serie de oleaje a generar. Además, cuenta con un algoritmo matemático, basado en contornos móviles (moving boundaries), que permite simular el movimiento de una pala generadora del oleaje (pala dinámica). Ambos sistemas de generación cuentan con un sistema de absorción activa del oleaje reflejado en las estructuras. Así mismo, el modelo dispone de un sistema de generación en que permite absorber el oleaje sin la necesidad de la utilización de esponjas o zonas de fricción que conllevarían un mayor dominio computacional, con el consiguiente coste asociado.

En resumen, la calidad y precisión de los resultados de validación del modelo IH2VOF ha sido avalada por la comunidad científica internacional. El modelo es capaz de proporcionar el campo de velocidades, presiones y turbulencia en un dominio bidimensional, siendo capaz de resolver los procesos de transformación costera del oleaje (asomeramiento), la rotura del oleaje, la reflexión y la interacción con las estructuras (verticales y en talud). Es también de destacar su capacidad para la determinación del flujo sobre una estructura, el rebase y la transmisión, tanto en el fluido como en el interior de los medios porosos. Esto nos permite reproducir numéricamente los procesos no lineales que tienen lugar en la zona de rompientes y en la zona de ascenso y descenso del oleaje sobre una playa. Además el modelo considera los procesos de transferencia de energía entre las ondas infragravitatorias y el oleaje, que condicionan el run-up en playas.

Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones VARANS son el resultado de la integración de las ecuaciones RANS a lo largo de un volumen de control, dando lugar como resultado a una velocidad promedio dentro del volumen de integración:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a dV$$

donde "<>" significa promediado espacial, V_f es el volumen de fluido que ocupa el volumen de integración V y $\langle a \rangle$ es la magnitud promediada.

El volumen de integración debe ser tal que cumpla los siguientes criterios:

- Su tamaño ha de ser mayor que el tamaño del poro (escala microscópica).
- Su tamaño ha de ser menor que los movimientos que tienen lugar en el volumen (escala microscópica).

Las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento quedan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + g_i$$

$$- \frac{\partial \langle \overline{u''_i u''_j} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[-\overline{u'_i u'_j} - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA$$

En la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, el último término de la ecuación representa el cambio del perfil de velocidades en la interfaz entre el medio poroso y el fluido. Éste es el responsable del modelado del intercambio de cantidad de movimiento entre la "fase fluido" y la "fase poroso". El penúltimo término representa las tensiones residuales existentes en el medio poroso tras el promedio y se obtiene como resultado del promedio en el término convectivo, paralelamente a como ocurre en el caso de la descomposición de Reynolds.

Estos dos términos comentados anteriormente constituyen el problema de cierre de las ecuaciones y necesitan ser modelados, tal y como ocurre en la ecuaciones RANS.

Se plantea como modelo de cierre dentro del medio poroso la formulación de Forchheimer, con la inclusión de un término adicional que considere la no estacionariedad del proceso (Liu *et al.*, 1999). Es decir:

$$- \frac{\partial \langle \overline{u''_i u''_j} \rangle}{\partial x_j} + \frac{1}{V_f} \int_{A_{int}} \left[-\overline{u'_i u'_j} - \frac{\bar{P}}{\rho} \delta_{ij} + \frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho} \right] n_j dA =$$

$$- \left[\frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle + c_A \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} \right]$$

donde $n = V_f/V$ representa la porosidad del medio, $C_A = 0.34 \frac{1-n}{n}$, α y β son dos parámetros a calibrar. Los dos primeros términos del segundo miembro del modelo propuesto consideran el arrastre lineal y el no lineal, respectivamente. El último término representa el efecto de la inercia.

Las ecuaciones VARANS quedan de la siguiente forma aplicando la formulación de Forchheimer:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{1+c_A} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho(1+c_A)} \left[-\frac{\partial \langle \bar{P} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right]$$

$$- \frac{1}{1+c_A} \left[\frac{\alpha \nu (1-n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle + \frac{\beta (1-n)}{n D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right]$$

El modelo de cierre para las tensiones de Reynolds promediadas en el volumen ($\langle u'_i u'_j \rangle$) se expresa de la siguiente manera:

$$\langle u'_i u'_j \rangle = \frac{2}{3} \langle k \rangle \delta_{ij} - \langle \nu_t \rangle \left(\frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_j} + \frac{\delta \langle \bar{u}_j \rangle}{\delta x_i} \right)$$

$$\left. \begin{aligned} & C_1 \left(\frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_i} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_j} + \frac{\delta \langle \bar{u}_j \rangle}{\delta x_i} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_i} - \frac{2}{3} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \bar{u}_k \rangle}{\delta x_i} \delta_{ij} \right) + \\ & \frac{\langle k \rangle^3}{\langle \varepsilon \rangle^2} + C_2 \left(\frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \bar{u}_j \rangle}{\delta x_k} - \frac{1}{3} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \delta_{ij} \right) + \\ & C_3 \left(\frac{\delta \langle \bar{u}_k \rangle}{\delta x_i} \frac{\delta \langle \bar{u}_k \rangle}{\delta x_j} - \frac{1}{3} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \frac{\delta \langle \bar{u}_i \rangle}{\delta x_k} \delta_{ij} \right) \end{aligned} \right\}$$

donde $\langle \nu_t \rangle$ es la viscosidad de remolino, $\langle k \rangle$ es la energía cinética turbulenta y $\langle \varepsilon \rangle$ es el rango de disipación, todas ellas promediadas en el volumen. Análogamente al modelo k - ε la viscosidad de remolino se expresa como:

$$\langle \nu_t \rangle = C_D \frac{\langle k \rangle^2}{\langle \varepsilon \rangle}$$

Las ecuaciones del transporte de la turbulencia y de la disipación, se obtienen de manera análoga.

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle k \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle}{\partial x_j} \right] - \langle \varepsilon \rangle + \varepsilon_\infty$$

$$\frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle \langle \bar{u}_j \rangle}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\langle k \rangle} \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle}{\partial x_j} \right]$$

$$- C_{2\varepsilon} \frac{\langle \varepsilon \rangle^2}{\langle k \rangle} + C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon_\infty^2}{k_\infty}$$

Los coeficientes del modelo son los mismos que se expusieron para el modelo RANS. Los valores k_∞ y ε_∞ se obtienen a partir de las experiencias de Nakayama y Kuwahara (1999) que calibraron las ecuaciones a partir de simulaciones numéricas de flujo en un medio poroso, formado por poros de forma rectangular. Los números de Reynolds con los que se realizó el análisis estaban entre 10^5 y 10^7 . Sus resultados llegan a las siguientes expresiones de los parámetros:

$$\varepsilon_\infty = 39.0(1-n)^{2.5} n^2 \left(\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right)^{1.5} \frac{1}{D_{50}}$$

$$k_\infty = 3.7(1-n)n^{1.5} \left(\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2 \right)$$

Implementación numérica

El modelo resuelve las ecuaciones de gobierno mediante un esquema de diferencias finitas de proyección en dos pasos (Chorin, 1968). En el primer paso resuelve una velocidad intermedia que atiende a la ecuación de conservación de cantidad de movimiento de la siguiente manera:

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = -u_j^n \frac{\partial u_j^n}{\partial x_j} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j}$$

donde \tilde{u}_i^{n+1} representa la velocidad intermedia y Δt es el paso de tiempo. La ecuación anterior es idéntica a la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, pero en ésta se ha eliminado el término de presión.

El siguiente paso consiste en realizar una proyección de la velocidad intermedia en un plano de divergencia nula, es decir, resolver el sistema siguiente:

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial x_i} = 0$$

La divergencia de la ecuación anterior y su posterior sustitución en la residual de momento nos da el gradiente de presiones en el instante n+1. La ecuación resultante es la ecuación de Poisson (Poisson Pressure Equation - PPE):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \tilde{u}_i^{n+1}}{\partial x_i}$$

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene el valor de la presión en el paso n+1; posteriormente, para la obtención del campo de velocidades en el instante n+1 se sustituye el valor de la presión obtenido en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento completa es decir:

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_j^n \frac{\partial u_j^n}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho^n} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j}$$

En la Figura 1 se muestran varios ejemplos de simulaciones con el IH2VOF en el marco de trabajo del estudio.

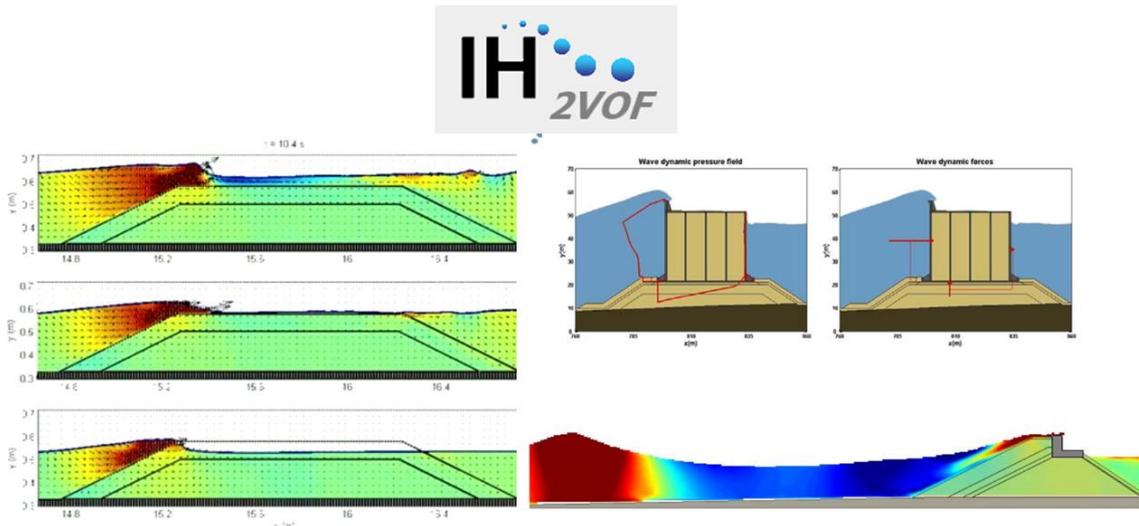


Figura 1 Ejemplos de aplicación del modelo IH2VOF.

Calibración del modelo

El modelo IH2VOF ha sido ampliamente validado mediante el uso de una amplia base de datos de velocidades y presiones de ensayos de laboratorio. Así se muestra en las siguientes publicaciones científicas en revistas indexadas:

- Stability analysis of a non-conventional breakwater for wave energy conversion. Di Lauro, E., Lara, J.L., Maza, M., Losada, I.J., Contestabile, P., Vicinanza, D. (2019). Coastal Engineering, Vol. 145, pp. 36-52.
- Numerical modelling of coastal structures stability. Guaniche, R., Losada, I.J., Lara, J.L. (2009). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 56(5-6), pp. 543-558
- Wave interaction with low mound breakwaters using a RANS model. Lara, J.L., Losada, I.J., Guaniche, R. (2008). Ocean Engineering, ELSEVIER. Vol. 35(13), pp. 1388-1400
- Wave Overtopping Of Póvoa De Varzim Breakwater: Physical And Numerical Simulations. Neves, M.G., Reis, M.T., Losada, I.J., Asce, M., Keming, H. (2008). Journal of Waterways, Port, Coastal And Ocean Engineering 10, pp. 203-264
- Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. Losada, I.J., Lara, J.L., Guaniche, R., Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 55(1), pp. 47-62
- RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. Lara, J.L., Garcia, N., Losada, I.J. (2006). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 53(5-6), pp. 395-417
- A numerical wave flume to study the functionality and stability of coastal structures. Lara, J.L. (2005). Journal of the International Navigation Association (PIANC), 121: 5-29
- Modelling of velocity and turbulence fields around and within low-crested rubble-mound breakwaters. Losada I.J., Lara J.L., Christensen E.D, Garcia, N. (2005). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol 52 (10-11), pp. 887-913

- 2D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters. Garcia, N., Lara, J.L., Losada, I.J. (2004). Coastal Engineering, ELSEVIER. Vol. 51 (10), pp. 991-1020