Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

TRABAJO FINAL DE MASTER

Eficiencia de diferentes soluciones hibridas para la defensa de la costa según el análisis del Run-up del oleaje

Trabajo realizado por :

Kélian Frédéric Michel Auboiroux

Dirigido **:**

María Emilia Maza Fernández

Titulación :

Master Universitario en Costas y Puertos

Santander, Septiembre de 2022

Agradecimientos

A mi mama Flo, mi papa Cyriaque y mi hermano Darius por estar siempre.

A mis amigos cercanos de Francia, Grégoire, Léo, Clara, Julien, Matthieu, Yann, y Juliette que saben dar sus puntos de vistas relevantes.

A mis compañeros de Master y amigos de Santander que me han integrado a su cultura.

Quiero agradecer todos los profesores de la formación del master, que me han puesto en condición para dar el mejor de mí. En especial a Javier, Gabo, y Melisa. El idioma no fue un obstáculo.

A María y Mariana que me han dedicado mucho tiempo este verano de trabajo, para dirigirme en la elaboración de este TFM. Que han contestado a todas mis dudas, durante sus respectivos tiempos de trabajo. Vuestra ayuda fue esencial. Muchas gracias.

Contenido

1. Introducción 9
1.1. Definición 9
1.2. Motivación 9
1.3. Tipologías de soluciones hibridas existentes 10
2. Objetivos 11
2.1. Objetivo general 11
2.2. Objetivos específicos 11
3. Metodología 14
3.1. Tipologías seleccionadas 14
a) Tipología 1 15
b) Tipología 2 15
c) Tipología 3 16
d) Tipología 4 16
e) Tipología 5 17
3.2. Elección de casos 18
3.3. Definición de las simulaciones realizadas con el modelo IH2VOF 20
a) Dominio 20
b) Mallas 20
c) Generación de las diferentes soluciones híbridas 22
d) Generación de las condiciones de oleaje 22
e) Definición de sensores numéricos y medida de run up 22
4. Resultados 24
4.1. Verificación de set-up numérico 24
4.2. Explotación de resultados 25
5. Conclusiones y discusión 32
5.1. Discusión de resultados 32
5.2. Conclusiones 34

Lista de figuras

Figura 1. *Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable, (Eurotop , 2018)* 11
Figura 2. *La vegetación en frente del dique; el nivel medio (entre MLW y MHW) se inunda diariamente mantiene especies pionera, Jantsje et al, 2013)* 12
Figura 3. *Metodología del trabajo* 14
Figura 4. *Esquema tipología 1, solo dique* 15
Figura 5. *Características geométricas Spartina Anglica, (Vuik et al , 2016)* 15
Figura 6. *Esquema tipología 2, dique con marismas* 16
Figura 7. *Foto de arrecifes de ostras reales* 16
Figura 8. *Esquema tipología 3, dique con cajas de ostras* 16
Figura 9. *Esquema tipología 4, dique con cajas de ostras y marismas* 17
Figura 10. *Esquema tipología 5, dique con marismas aumentado el fondo* 17
Figuras 11 y 12. *Repartición parámetro de rotura eje x y su rotura asociada* 18
Figura 13. *Resultados run-up caso T1C6* 24
Figuras 14 y 15. *Resultados superficie libre sensores caso T1C6* 24
Figura 16. *Interfaz Run-up IH2VOF* 25
Figura 17. *Run-up relativo 2% en función del parámetros de rotura para rampa impermeable, (Eurotop , 2018)* 25
Figura 18. *Comparación Run-up 2%, VOF con curva del Eurotop (2018)* 26
Figura 19. *Alturas de olas de los tipologías a lo largo del dominio* 28
Figura 20. *Fenómeno de rotura caso T1C1* 28
Figura 21. *Sitio del sensor a pie de dique* 29
Figura 22. *Comparación Run-up 2% VOF con curva del Eurotop (2018)* 31
Figura 23. *Comparación Run-up 2% VOF en función de los tipologías con curva del Eurotop (2018)* 31
Figura 24. *Run-up relativo 2% en función del parámetro de rotura para costa superficiales, (Eurotop , 2018)* 32
Figura 25. *Comparación Run-up 2% VOF en función de los tipologías con curva del Eurotop (2018)* 32
Figura 26. *Comparación Run-up 2% absoluto VOF en función de los tipologías* 33

Lista de cuadros

Cuadro 1. *Cuadro recapitulativo de las tipologías de soluciones hibridas existentes (Vellinga , 2014)* _____ *10*
Cuadro 2. *Características geométricas Spartina Anglica (Maza et al, 2015)* _____ *15*
Cuadro 3. *Resumen casos elegidos* _____ *18*
Cuadro 4. *Resumen casos elegidos para las simulaciones* _____ *19*
Cuadro 5. *Resumen geometrías de los dominios* _____ *20*
Cuadro 6. *Descripción implantación mallas IH2VOF* _____ *21*
Cuadro 7. *Duración para los casos elegidos* _____ *22*
Cuadro 8. *Repartición sensores y zonas estudio de run-up* _____ *23*
Cuadro 9. *Elección casos preliminares* _____ *24*
Cuadro 10. *Resultados Run-up2% VOF para cada casos* _____ *27*
Cuadro 11. *Resultados Hs pie de dique, parámetro de rotura y Run-up2% VOF para cada casos* _____ *30*

Resumen

Título:	*Eficiencia de diferentes soluciones hibridas para la defensa de la costa según el análisis del run-up del oleaje*
Autor:	Kélian Frédéric Michel Auboiroux
Directora:	María Emilia Maza Fernández
Fecha:	Septiembre, 2022
Palabras clave:	**Protección costera, Vegetación, Run-up, Modelo numérico**

Este trabajo analiza diferentes tipologías de soluciones híbridas para protección costera compuestas por campos de vegetación y/o arrecifes de ostras combinados con una pendiente impermeable mediante el modelo IH2VOF.

En primer lugar, se describe la motivación del proyecto y todos los argumentos que motivan la selección de una solución híbrida en lugar de un dique clásico. La descripción de todas las tecnologías existentes se estable con el fin de poder hacer elecciones relevantes de tipologías y casos. En base a lo anterior, se definen los objetivos, globales y específicos.

Posteriormente, en la parte metodológica, se describe la selección de tipologías adecuadas para este estudio, su dimensionamiento y la selección de oleajes incidentes. Así, se seleccionan cuatros tipologías hibridas: una incluye un campo de marisma, otra un arrecife de ostras, otra la combinación del campo de marisma con el arrecife y, por último, otra en la que se incluye un campo de marisma considerando, mediante un aumento de la cota batimétrica, la retención de sedimento producida por el mismo. En todas ellas, se define como estructura convencional una rampa impermeable de pendiente constante.

Previamente al estudio de las diferentes soluciones híbridas, se estudia la solución convencional como caso base. Además, los resultados de run-up obtenidos para la solución convencional se comparan con los obtenidos con la formulación para run-up relativo en rampas impermeables de *Eurotop (2018)*. Para la estimación de este run-up relativo es necesario estimar el valor de altura de ola incidente a pie de estructura. Para ello, se realizan un conjunto de simulaciones numéricas adicionales en las que la pendiente impermeable se sustituye por un contorno absorbente y en las que se mide la altura de ola en la posición en la que se encontraría el pie de la estructura. Así, se obtienen los valores de run-up relativo, definido como el run-up 2% dividido de la altura de ola significante a pie de estructura, y se realiza una comparativa entre los resultados obtenidos para las diferentes soluciones estudiadas. Se obtiene que la comparación sale mal, debido a la simulación sin rampa que da altura de ola a pie de dique muy pequeña. La comparación completa del run-up se hace finalmente con el run-up absoluto de manera a no tomar en cuenta esas simulaciones para buscar esas alturas de olas a pie de dique.

Este estudio pone de relieve las capacidades del modelo IH2VOF en el estudio de soluciones híbridas de diferente tipologías y permite realizar una comparativa entre las mismas, en este caso, basada en la evaluación del run-up. Así, se obtiene que la tipología que incluye el campo de vegetación junto con el cambio batimétrico esperado es la que produce una mayor disminución del run-up en comparación

con el obtenido con la solución tradicional por sí sola. La segunda tipología más eficiente en la disminución de run-up resulta ser la combinación de arrecife de ostras y campo de marisma, seguida del campo por si sólo y finalmente, el arrecife de ostras por sí solo. Finalmente, cabe destacar que los resultados obtenidos remarcan el potencial de las soluciones híbridas como medidas de protección costera.

Abstract

Title:	*Efficiency of different hybrid solutions for coastal defence based on wave run-up analysis*
Author:	Kélian Frédéric Michel Auboiroux
Supervisor:	María Emilia Maza Fernández
Date:	September, 2022
Key words:	**Coastal protection, Vegetation, Run-up, Numerical model**

This study analyses different typologies of hybrid solutions for coastal protection composed of vegetation fields and/or oyster reefs combined with an impermeable slope using the IH2VOF model.

First of all, the motivation of the project and all the arguments behind the selection of a hybrid solution instead of a classical seawall are described. The description of all existing technologies is established in order to be able to make relevant choices of typologies and cases. Based on the above, the global and specific objectives are defined.

Subsequently, in the methodological part, the selection of suitable typologies for this study, their dimensioning and the selection of incident waves are described. Thus, four hybrid typologies are selected: one includes a saltmarsh field, another an oyster reef, another the combination of the saltmarsh field with the reef and, finally, another in which a saltmarsh field is included considering, by means of an increase in the bathymetric height, the retention of sediment produced by it. In all of them, an impermeable ramp with a constant slope is defined as a conventional structure.

Prior to the study of the different hybrid solutions, the conventional solution is studied as a base case. Furthermore, the run-up results obtained for the conventional solution are compared with those obtained with the formulation for relative run-up in impervious ramps of *Eurotop (2018)*. For the estimation of this relative run-up it is necessary to estimate the incident wave height value at the foot of the structure. For this purpose, a set of additional numerical simulations are carried out in which the impervious slope is replaced by an absorbing contour and in which the wave height is measured at the position where the foot of the structure would be. Relative run-up values are obtained, defined as the 2% run-up divided by the significant wave height at the foot of the structure, and a comparison is made between the results obtained for the different solutions studied. It is obtained that the comparison is wrong, due to the simulation without a ramp that gives a very small wave height at the foot of the breakwater. The complete comparison of the run-up is finally made with the absolute run-up so as not to take into account these simulations in order to find the wave heights at the breakwater.

This study highlights the capabilities of the IH2VOF model in the study of hybrid solutions of different typologies and allows a comparison to be made between them, in this case, based on the evaluation of the run-up. Thus, it is obtained that the typology that includes the vegetation field together with the expected bathymetric change is the one that produces a greater reduction in run-up compared to that obtained with the traditional solution alone. The second most efficient typology in terms of run-up reduction is the combination of oyster reef and saltmarsh field, followed by the saltmarsh field

alone and finally, oyster reef alone. Finally, it should be noted that the results obtained highlight the potential of hybrid solutions as coastal protection measures.

1. Introducción

1.1. Definición

¿Qué es una solución hibrida? Una solución hibrida es una combinación entre una obra civil marítima clásica tipo dique en talud o vertical, y un ecosistema costero, como los campos de vegetación.

1.2. Motivación

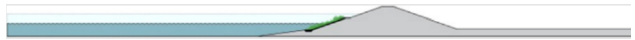
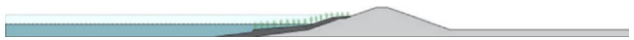
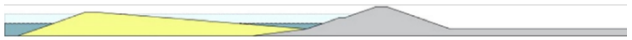
El interés por las soluciones hibridas está en pleno auge. Usar la vegetación disponible para reducir el oleaje es de gran interés. En efecto, con los impactos directos del cambio climático que el ser humano deberá hacer frente en las próximas décadas, se debe estudiar todas las medidas disponibles para solventar las problemáticas nacientes. Especialmente para lidiar con problemáticas como el aumento del nivel medio del mar y las condiciones meteorológicas cambiantes. Por un lado, la facilidad de implantación de soluciones híbridas en muchos casos y, por otro, los menores costes asociados en comparación a las soluciones clásicas, dan lugar a un gran interés por el estudio de este tipo de soluciones, más aún teniendo en cuenta que aún es necesario un mejor entendimiento de las mismas *(Sutton-Grier et al, 2015)*.

Existen muchos beneficios ligados a estas soluciones hibridas en comparación con diques convencionales. Éstas dan lugar a un aumento de la biodiversidad que viene directamente impactar sobre la protección de inundación. En efecto, la proliferación de la fauna y de la flora, aumenta las superficies de contactos del oleaje sobre el ecosistema, lo que da lugar a una protección costera más eficiente *(Van Loon-Steesma et al, 2013)*. Además de aumentar la resistencia, se adapta también en función de las condiciones de oleaje, en función de que aporte necesita la flora, se concentra en lugares distintos *(Borsje et al, 2010)*. Esas plantas toman espacio en el agua, las construcciones terrestres pueden estar reducidas, un ganancia de sitio es notable, y la calidad del área también. Además de esos beneficios, las plantas subacuáticas hacen un procedimiento que consiste a captar el CO_2 presente en el agua para transformarlo en O_2, llamado *"blue carbon"*. Se produce también un ciclo de nutrimiento, gracias a la captación en sus raíces de nutrimientos, la planta crece y se refuerza *(Sutton-Grier et al, 2015)*. Eses procesos es más eficaz si el humano deja la plantación vivir, como en nuestro caso de solución hibrida. Eso viene generar un real pulmón subacuático, y aumenta la cualidad del agua. Un beneficio relevante que puede haber las soluciones hibridas, es un impacto recreacional *(Sutton-Grier et al, 2015)*. De hecho, puede regenerar un paseo marítimo con vida natural, donde se puede observar la flora, y la macrofauna. En breve, las instalaciones hibridas influyen también sobre el turismo. En efecto hace mas naturales los bordes de la costa tras la desnaturalización del paisaje.

La motivación principal de este trabajo es estudiar diferentes tipologías de solución hibrida con el fin de analizar su eficiencia frente a una tipología convencional. Para ello, se utilizará el modelo numérico IH2VOF desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria). El IH2VOF es un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) que resuelve las ecuaciones *Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)*.

1.3. Tipologías de soluciones hibridas existentes

Las soluciones hibridas funcionales están resumidas en el **cuadro 1** *(Vellinga et al , 2014)*.

Tipos de diques	*Breves descripciones*	*Ilustraciones*
Dique con revestimiento respetuoso de la naturaleza	Un dique con un revestimiento en el lado del mar que pretende crear hábitats variables en la zona intermareal y submareal de los diques y las costas, manteniendo los niveles de seguridad utilizando una variedad de materiales, gradientes y formas para crear diferencias de altura, refugios en una variación de ambientes con diferentes niveles de exposición a las corrientes y al oleaje.	
Dique integrada en una duna	El dique con un revestimiento rígido está cubierto de arena y parece una duna. Esta solución necesita menos espacio que las dunas, y puede ser atractiva en zonas urbanas donde los edificios son adyacentes a las dunas y a la playa.	
Dique integrada en un bulevar	La defensa rígida contra las inundaciones está cubierta por arena y un bulevar, lo que da lugar a una fuerte conexión entre la zona urbana y la costa. Los edificios en el bulevar pueden impedir futuras adaptaciones.	
Dique con una playa artificial	Dique con una playa artificial blanda de arcilla o arena en lugar de un revestimiento rígido. Este tipo de pradera con vegetación puede dar lugar a una reducción de los requisitos relativos a la altura de la arena o del revestimiento del dique.	
Dique con marismas adyacentes	Estas marismas amortiguan las olas que llegan. Su capacidad de amortiguación de las olas depende tanto de la altura como de la anchura de la zona de marismas. En condiciones de abundancia de sedimentos, pueden seguir el ritmo de la subida del nivel del mar. Las marismas albergan también importantes valores naturales.	
Dique con marismas adyacentes y en la berma hasta el mar	Un dique con un antepecho y una berma en la ladera del mar, destinado a absorber la posible erosión en condiciones extremas.	
Dique verde amplia	Un dique con una pendiente poco profunda (de 1:7) cubierta de hierba que se funde con las marismas adyacentes. Normalmente, las olas que llegan son amortiguadas por el dique. Sólo en caso de tormenta las olas alcanzan el dique. La sedimentación en las marismas puede proporcionar la arcilla necesaria para un dique tan amplio. La cubierta de hierba necesita un mantenimiento regular y hay que retirar los residuos retirarse después de las tormentas.	
Dique con caja de ostra	Es un arrecife de ostras o mejillones hacia el mar del dique que reduce el ataque de las olas. Además, un este puede capturar sedimentos que contribuirán a la estabilización del fondo costero. Hay experimentos para estimular el crecimiento de los arrecifes de ostras colocando cestas con ostras en los lugares deseados.	
Dique con nutrición de sedimentos	Nutrición de sedimentos (arena o material de dragado) para aumentar las dimensiones de la zona intermareal y de marea para absorber la futura erosión con el fin de mantener la línea de costa.	
Dique con máquina de arena	El mantenimiento de la costa por medio de un gran nutrición de arena justo fuera de la costa concentrada en el espacio y el tiempo. La arena será redistribuida gradualmente por las olas, las corrientes y el viento en algunas décadas.	

Cuadro 1. Cuadro recapitulativo de las tipologías de soluciones hibridas existentes *(Vellinga , 2014)*

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo general de este estudio es analizar la eficiencia de diferentes tipologías de solución híbrida en la disminución del run-up producido sobre la estructura convencional que contienen. Así, se busca realizar este primer estudio para que sirva de base a estudios posteriores que incluyen geometrías más complejas y otras tipologías de solución híbrida. La finalidad de este trabajo será la comparación del run up de cada soluciones hibridas elegidas en función del parámetro de rotura $\xi_{m_1,0}$.

2.2. Objetivos específicos

Al nivel del análisis hidráulico, un estudio de la variable del run-up 2% va a estar examinado. El run up 2% se utilizará para analizar la eficiencia de cada una de las soluciones analizadas. El run-up de las olas se define como la diferencia vertical entre el punto más alto de la subida de las olas y el nivel medio del mar (NMM), como se muestra en la **figura 1**. Rc corresponde al francobordo del dique.

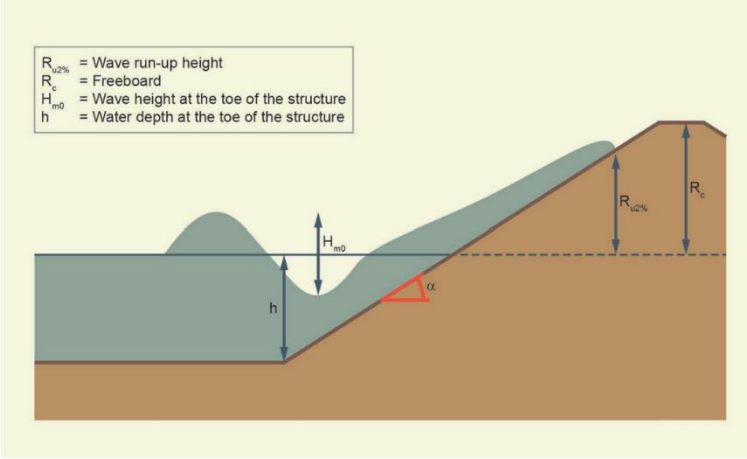


Figura 1. Esquema de Run-up sobre pendiente impermeable, *(Eurotop , 2018)*

Debido a la naturaleza estocástica de las olas entrantes cada ola dará un nivel de run-up diferente. El run-up 2% trata de la altura de subida de las olas que es superada por el 2% del número de olas. Se trata de las formulaciones para pendiente constante e impermeable *(Eurotop , 2018)*.

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1{,}65.\Upsilon_b.\Upsilon_f.\Upsilon_\beta.\xi_{m-1,0} \quad (1)$$

$$\frac{Ru_{2\%}}{H_{m0}} = 1{,}00.\Upsilon_f.\Upsilon_\beta.\left(4 - \frac{1{,}5}{\sqrt{\Upsilon_b.\xi_{m-1,0}}}\right) \quad (2)$$

El Run-up 2% relativo se define según la formula (1) con un máximo estimado según la formula (2). De acuerdo con ese formula depende del parámetro de rotura (3).

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_{m-1,0}}}} \quad (3)$$

Entra en acción la pendiente del talud, α, $L_{m-1,0}$ que es la longitud de onda definida por la formula (4), en aguas profundas.

$$L_{m-1,0} = \frac{g.T_{m-1,0}{}^{2}}{2.\pi} \quad (4)$$

El período de onda espectral $T_{m-1,0}$ es el más adecuado para el cálculo del run-up para formas espectrales complejas, así como para espectros de onda teóricos tal cuales de JONSWAP, TMA, etc... $T_{m-1,0}$ da más peso a los periodos de onda más largos en el espectro y, por tanto, es muy adecuado para todo tipo de espectros de ondas, incluidos los espectros de ondas bimodales y multimodales. Cuando se tiene un espectro uniforme, existe una relación entre el periodo de pico y el periodo medio de la energía, la formula (5).

$$T_p = 1{,}1.T_{m-1,0} \quad (5)$$

H_{mo} es una estimación de la altura de ola significante asociada al momento de orden cero de su análisis espectral. En este trabajo, H_{mo} será igual a la altura de ola significante Hs obtenida mediante un análisis temporal, que es la media del tercio de las olas mayores del estado del mar (6).

$$Hs = \frac{3}{N}.\sum_{\frac{2}{3}N}^{N} H_i \quad (6)$$

En (1), γb es el factor de influencia para una berma, va cambiar en función del tipo de berma, si no hay berma de pie como en este trabajo, γb=1. γf es el factor de influencia para elementos de rugosidad en un talud, si la rampa es no rugosa, como en este trabajo, γf=1. γβ es el factor de oblicuidad, influye en función de la dirección de ataque de las olas, si vienen perpendicular al dique, como en este trabajo γβ=1 *(Eurotop , 2018)*.

Para simplificar el estudio la marea no va a estar tomando en cuenta, pero si se analizarán diferentes niveles. Los campos de vegetación van estar sumergidos durante toda la simulación, representativo del "Storm Surge Level" en la **figura 2**.

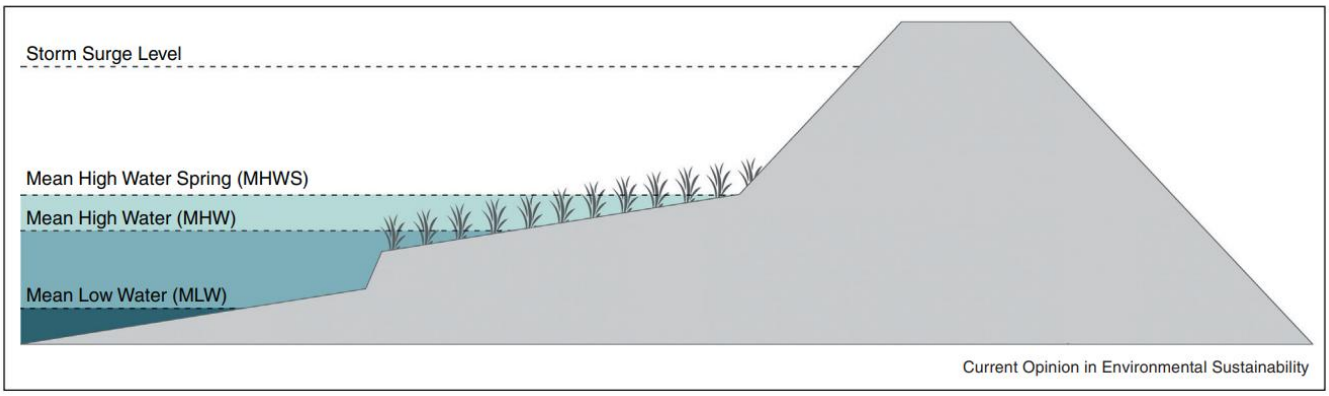


Figura 2. La vegetación en frente del dique; el nivel medio (entre MLW y MHW) se inunda diariamente mantiene especies pionera, *Jantsje et al, 2013*

Al nivel de la elección de las tipologías se ha basado sobre el portfolio recapitulativo del **cuadro 1**. El interés de la aumentación del coeficiente de fricción al fondo y su impacto sobre las olas ha hecho elegir un estudio de marismas adyacente al dique. Simular por un obstáculo con o sin rotura puede ser relevante en este trabajo, por eso un estudio de cajas de ostras, utilizadas para construir un arrecife, es desarrollado también. La elección de cuatro tipologías de soluciones hibridas distintas esta propuesta, una de marismas, una de arrecife de ostras, una con una conjunción de estos dos tipologías, ver si una optimización existe. Y una última tomando en cuento el tiempo que pasa, el impacto de esas marismas a lo largo del tiempo, generando una nutrición de sedimentos. Por ese última tipología, una suposición de una aumentación del suelo de 30 centímetros es lograda, lo que esta representativa de una sedimentación de las raíces de las plantas.

3. Metodología

La metodología general del trabajo se describe en la **figura 3**. Este parte va a tratar de los pasos necesarios a la aplicación de los objetivos generales como específicos. Esto incluye la elección, la construcción de las tipologías y de los casos de oleaje, una explicación de cómo implantar esos elementos dentro el modelo IH2VOF, una validación de los casos preliminares en comparación con la curva del *Eurotop (2018)*, y al final, un parte de comparación de resultados.

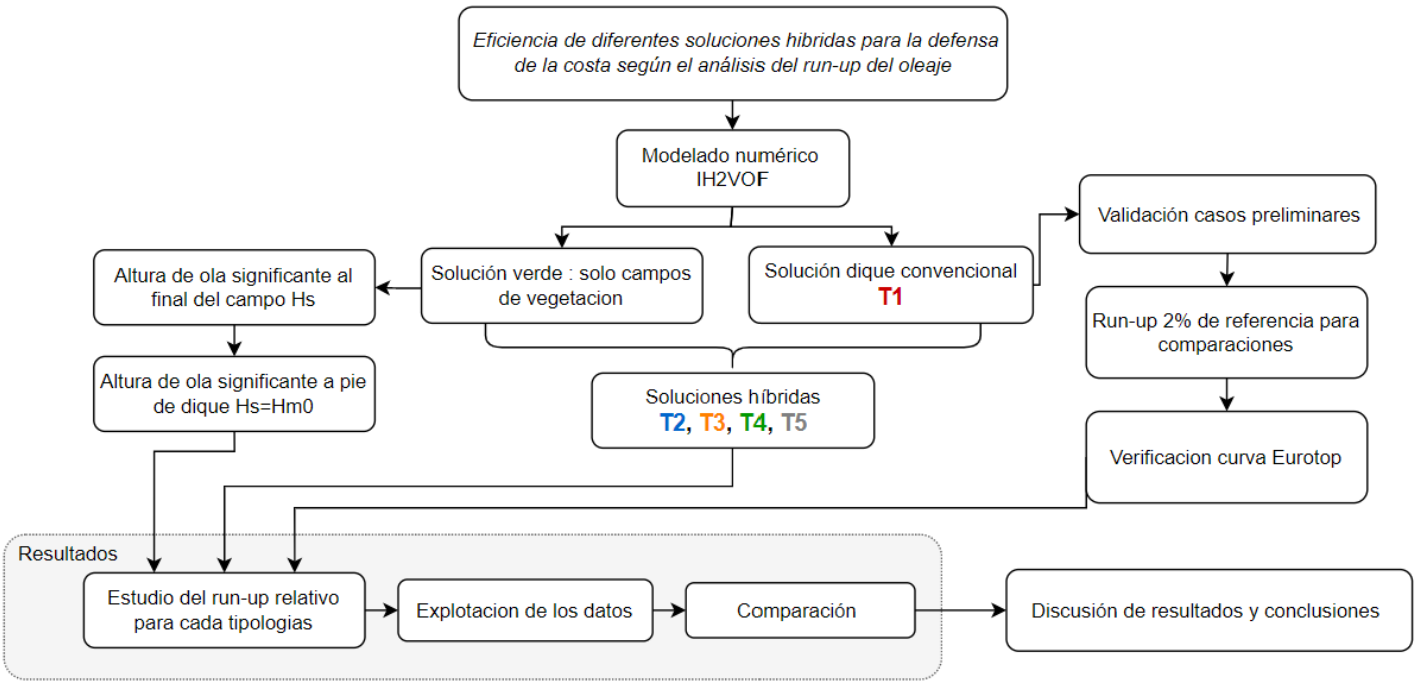


Figura 3. Metodología del trabajo

3.1. Tipologías seleccionadas

Para todos los casos, se estudia la misma estructura convencional, una rampa impermeable con un pendiente suave de 1:4 infinitamente grande, cf **figura 4**, para estar en el dominio de validad de las ecuaciones del *Eurotop (2018)*, y para ver el impacto del run-up sobre la rampa. Así la lectura visual también es clara, es el tipo de dique lo más simple que se puede encontrar y permite establecer una comparación completa de cada solución hibrida. Además, esta tipología simple con este pendiente es bastante aplicable en todos los lugares del mundo. Se considera un dique impermeable con un factor de rugosidad igual $\gamma f=1$, es decir, la rampa es no rugosa. Las dimensiones de esta tipología es bien una premisa que abre sobre un trabajo profundizado con tipología más complicada.

a) *Tipología 1*

La tipología 1 se compone solamente de un dique impermeable, no rugoso, con pendiente uniforme igual a 1:4.

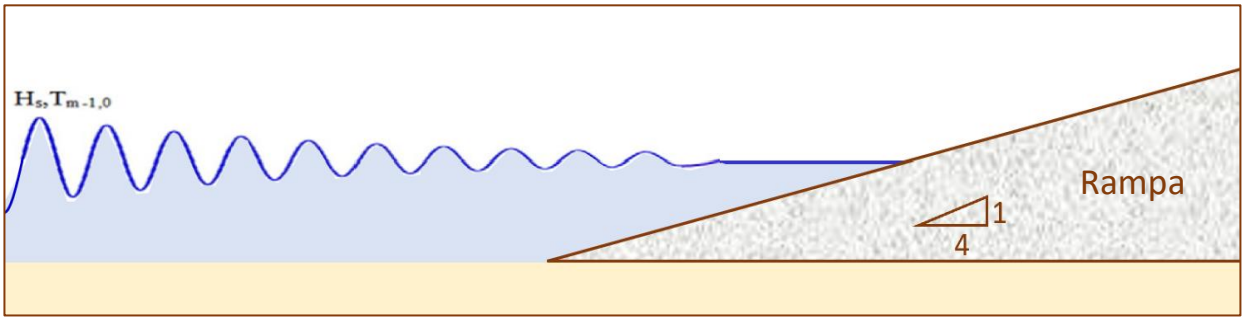


Figura 4. Esquema tipología 1, solo dique

b) *Tipología 2*

A la infraestructura de tipología 1, una adición de campo de vegetación fue puesto. El **cuadro 2** describe las características de la *Spartina Anglica*, especie seleccionada para definir el campo de vegetación de marisma *(Maza et al, 2015).* La elección de este tipología depende de un compromiso, descrito en la **figura 5** *(Vuik et al , 2016)* .

Densidad (tallos/m²)	300
Diámetro (m)	0.006
Altura de planta (m)	0.3
Longitud de planta (m)	0.5

Cuadro 2. Características geométricas *Spartina Anglica, (Maza et al, 2015)*

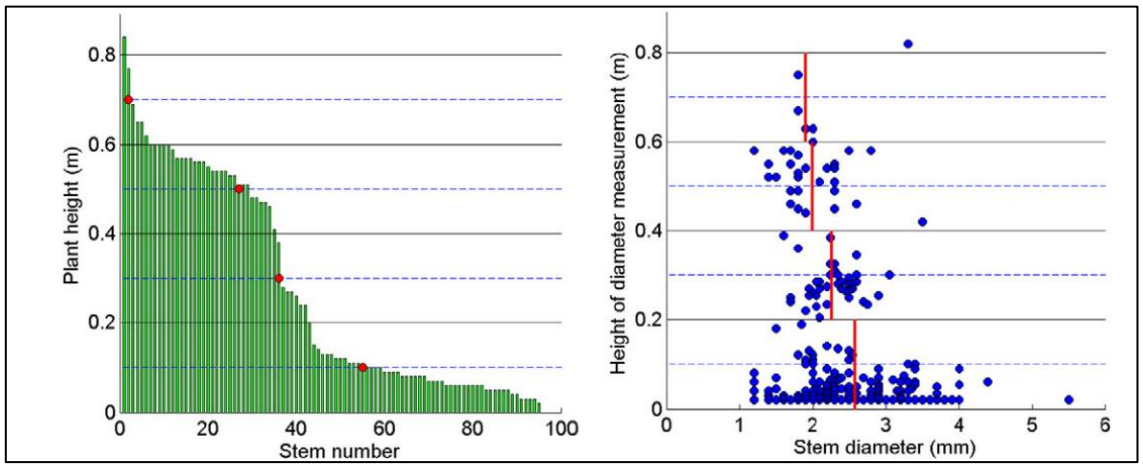


Figura 5. Características geométricas *Spartina Anglica, (Vuik et al, 2016)*

Para dimensionar la longitud del campo se considera la longitud máxima de onda. Esta se especifica en la sección ***3.2*** sobre la elección de los casos. Se obtiene una longitud de onda máxima de pico Lp de 71 metros según el **cuadro 3.** Por lo tanto, la longitud de vegetación considera es de 80 metros para asegurar que en todos los casos el campo tenga al menos una longitud igual a la longitud de onda. La definición de la tipología 2 se muestra en la **figura 6**.

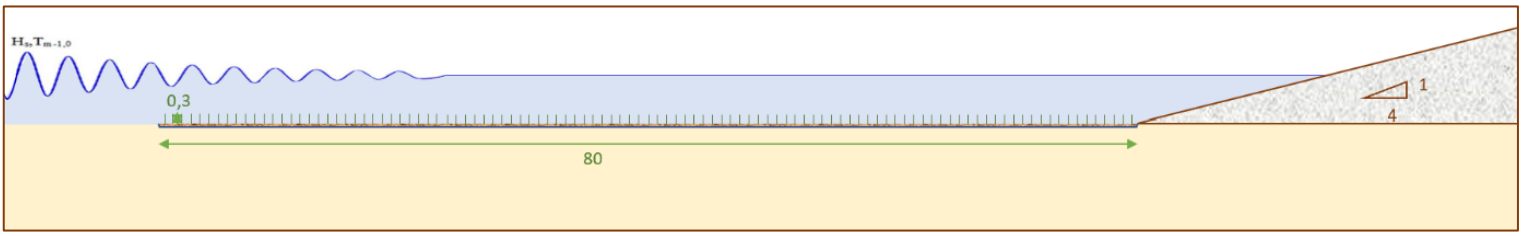


Figura 6. Esquema tipología 2, dique con marismas

c) Tipología 3

A la infraestructura de base de tipología 1 se añade un arrecife de ostras. El sitio web "EcoShape " propone una solución de *"Oyster reef"* de altura igual a 0.25 metros. Se basa sobre esos conocimientos técnicos para elegir la tipología 3.

Sabiendo que también las cajas están llenado de estos mariscos, la incorporación dentro el modelo VOF no será difícil, **figura 7**. De hecho, será solamente un obstáculo. Además, los calados van a influir entre 5 y 10 metros, para ver un impacto de la solución sobre los oleajes sin provocar a cada caso la rotura, dos cajas de 0.25 metros superposiciones fueron elegidos, visibles en la **figura 8**. Al nivel de las anchuras, una caja mide en medio 10 metros. Esta geometría de 0.5 metros sobre 10 metros fue puesto a 80 metros del pie de dique que simboliza el fin de la presencia de las marismas.

Figura 7. Arrecifes de ostras reales

Figura 8. Esquema tipología 3, dique con cajas de ostra

d) Tipología 4

La tipología 4 define un caso de combinación de la tipología 2 con la tipología 3, con las mismas características, **figura 9.** Puede ser relevante de ver una combinación de impactos, que pueden en la realidad pasar realmente por la zona de proliferación de la *Spartina Anglica* que coresponde a las condiciones de vida de las ostras. *(Vuik et al , 2016)* .

Al nivel hidrodinamico, es relevante de haber un caso con una reaccion en cadena. Efectivemente, las olas van a estar reducidas por el arrecife en primer lugar, y esas olas se corresponden con las olas que llegan al campo de vegetación.

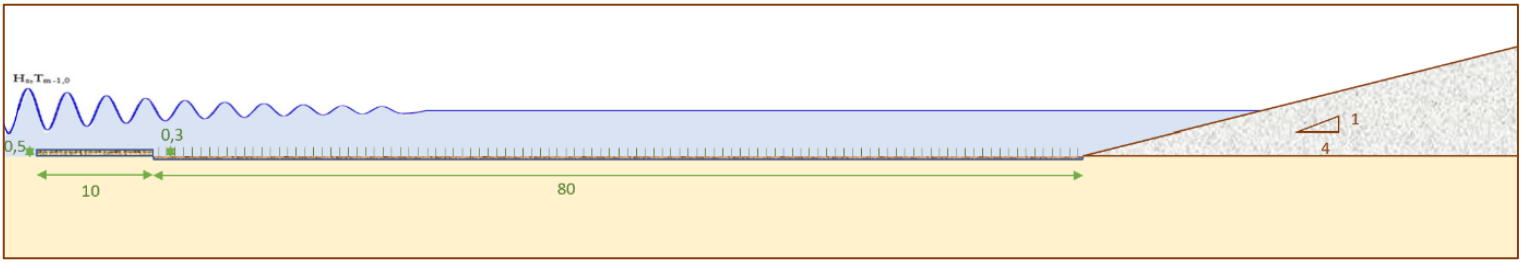


Figura 9. Esquema tipología 4, dique con marismas y cajas de ostras

e) Tipología 5

A la infraestructura de tipología 1, una adición de marismas fue puesto. Es la continuidad en el tiempo de la tipología 2 después de un par de años cuando la sedimentación producida por la vegetación habrá impactado sobre su proprio fondo, y que las raíces habrán crecido generando una nutrición de sedimentos, **figura 10.** Habrá un aumento estimado de 0.30 metros con las mismas alturas de plantas exteriores, sobre la misma anchura de marismas. En breve es una tipología que toma en cuenta la capacidad de retención de sedimento y creación de suelo de las marismas.

Al nivel hidrodinamico, es relevante de haber un caso con un cambia de fondo. Efectivemente, las olas van a sentir mas el fondo, se puede imaginar mas rotura en esta tipologia que en las otras, sobretodo para los calados mas pequeños.

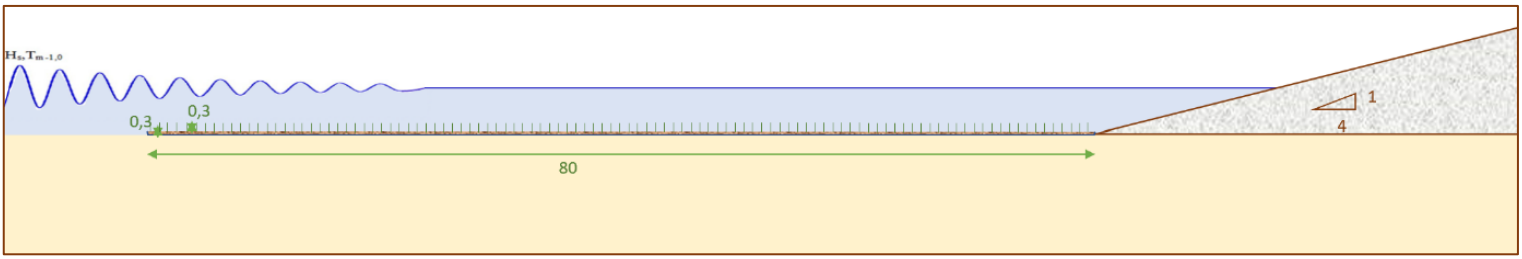


Figura 10. Esquema tipología 5, dique con marismas, aumentado el fondo

3.2. Elección de casos

El objetivo es analizar el run up 2% relativo que se relacionará con el parámetro de rotura $\xi_{m_1,0}$. El eje x tiene valor entre 0.5 y 4. La elección de casos se han efectuado considerando parámetros de rotura entre 0.5 y 4. Debido al tiempo computacional asociad a las simulaciones, y para haber curvas relevantes para los 5 tipologías, 6 casos fueron elegidos.

El parámetro de rotura $\xi_{m_1,0}$ se encuentra según las fórmulas (3), (4) y (5) *(Eurotop, 2018)*. Considerando esto, se definen diferentes combinaciones de H_{m0} y de $T_{m-1,0}$. Para evitar las roturas en algunos de los casos, y para reducir el tiempo de computación para definición de oleaje pequeña que no necesitan un calado tan grande, y de todo modo que sientan el impacto de la vegetación, los calados estudiados son de 2 y 4 metros. Las longitudes de ondas se calculan a pie de dique. Los casos están resumidos en el **cuadro 3.**

N° caso	*Calados*	*tan(α)*	*H_s*	*T_p*	*$T_{m-1,0}$*	*$L_{p,dique}$*	*$L_{m-1,0}$*	$\xi_{m-1,0}$
1	4	0.25	2	6.6	6.00	38,78	56.2	***1.33***
2	4	0.25	1.5	3	2.73	13.4	11.6	***0.70***
3	4	0.25	1	11.7	10.64	71.9	176.6	***3.32***
4	2	0.25	1	9.4	8.55	41.0	114.1	***2.67***
5	2	0.25	0.75	6	5.45	25.6	46.4	***1.97***
6	2	0.25	0.5	10	9.09	43.7	129.0	***4.02***

Cuadro 3. Resumen geometrías de los dominios

Para construir la explotación de resultados, el espacio entre cada valores del parámetro de rotura es crucial. El estudio de los diferentes tipos de roturas es buscado, **figuras 11 y 12**.

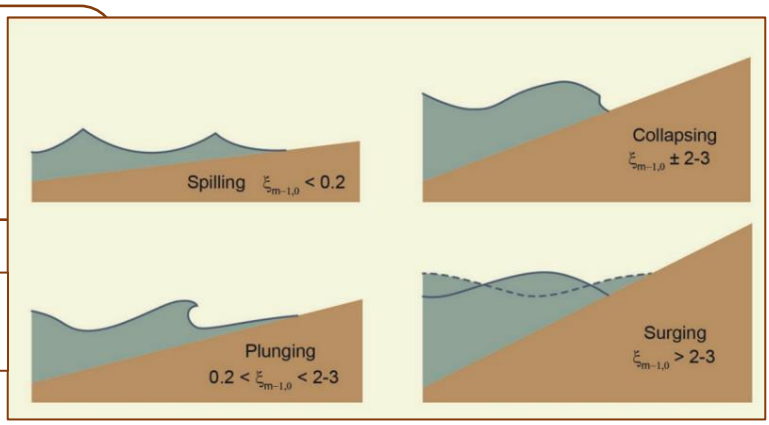


Figura 11 y 12. Repartición parámetro de rotura eje x y su rotura asociada

Al final habrá cinco tipologías distintas con seis condiciones de oleaje distintas, es decir treinta simulaciones, detalladas en el **cuadro 4**. Las simulaciones tienen un nombre de tipo T***x***C***y***, correspondiente a la tipología ***x***, con el número de caso ***y***.

Tipologías	*N° caso*	*Calado*	H_s	T_p	$T_{m-1,0}$	$L_{p,dique}$	$L_{m-1,0}$	$\xi_{m-1,0}$	*Nombres simulaciones*
Solo dique	1	4	2	6.6	6.0	38,78	56.2	1.33	T1C1
	2	4	1.5	3	2.7	13.38	11.63	0.70	T1C2
	3	4	1	11.7	10.6	71.85	176.6	3.32	T1C3
	4	2	1	9.4	8.5	41.00	114.13	2.67	T1C4
	5	2	0.75	6	5.5	25.58	46.37	1.97	T1C5
	6	2	0.5	10	9.1	43.69	129	4.02	T1C6
Dique con marismas	1	4	2	6.6	6.0	38,78	56.2	1.33	T2C1
	2	4	1.5	3	2.7	13.38	11.63	0.70	T2C2
	3	4	1	11.7	10.6	71.85	176.6	3.32	T2C3
	4	2	1	9.4	8.5	41.00	114.13	2.67	T2C4
	5	2	0.75	6	5.5	25.58	46.37	1.97	T2C5
	6	2	0.5	10	9.1	43.69	129	4.02	T2C6
Dique con arrecife de ostras	1	4	2	6.6	6.0	38,78	56.2	1.33	T3C1
	2	4	1.5	3	2.7	13.38	11.63	0.70	T3C2
	3	4	1	11.7	10.6	71.85	176.6	3.32	T3C3
	4	2	1	9.4	8.5	41.00	114.13	2.67	T3C4
	5	2	0.75	6	5.5	25.58	46.37	1.97	T3C5
	6	2	0.5	10	9.1	43.69	129	4.02	T3C6
Dique con marismas y arrecife de ostras	1	4	2	6.6	6.0	38,78	56.2	1.33	T4C1
	2	4	1.5	3	2.7	13.38	11.63	0.70	T4C2
	3	4	1	11.7	10.6	71.85	176.6	3.32	T4C3
	4	2	1	9.4	8.5	41.00	114.13	2.67	T4C4
	5	2	0.75	6	5.5	25.58	46.37	1.97	T4C5
	6	2	0.5	10	9.1	43.69	129	4.02	T4C6
Dique con marismas, aumentando el fondo	1	4	2	6.6	6.0	38,78	56.2	1.33	T5C1
	2	4	1.5	3	2.7	13.38	11.63	0.70	T5C2
	3	4	1	11.7	10.6	71.85	176.6	3.32	T5C3
	4	2	1	9.4	8.5	41.00	114.13	2.67	T5C4
	5	2	0.75	6	5.5	25.58	46.37	1.97	T5C5
	6	2	0.5	10	9.1	43.69	129	4.02	T5C6

Cuadro 4. Resumen casos elegidos para las simulaciones

De hecho, en la continuación del trabajo, y para la facilidad de lectura gráfica, cada tipología corresponde a un color asociado según la tabla anterior.

3.3. Definición de las simulaciones realizadas con el modelo IH2VOF

La utilización del modelo IH2VOF permite obtener el valor del run-up 2% para cada simulación realizada. Para simular los oleajes seleccionados y las diferentes tipologías, se define un dominio y dos mallas de diferente resolución numérica. La malla 1 para el calado de dos metros y la malla 2 para el calado de cuatro metros con el objetivo de reducir en lo posible el coste computacional.

a) Dominio

La altura del dominio se basa sobre los calados distintos, tomando en cuenta la ola máxima de cada serie de oleaje, y estimándole a dos veces esta ola, más un margen para asegurar que no habrá rebase. Una comprobación será realizada como resultados primitivos.

Calado (m)	2	4
Hs máxima (m)	1	2
Altura dominio (m)	5	10
Longitud del dique (m)	20	40
Longitud dominio (m)	140	160

Cuadro 5. Resumen casos elegidos

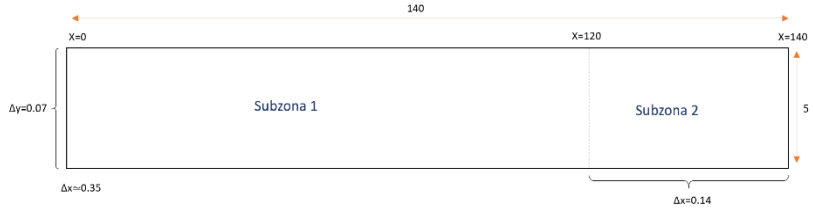
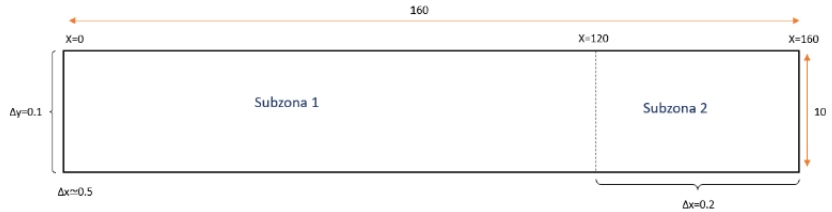
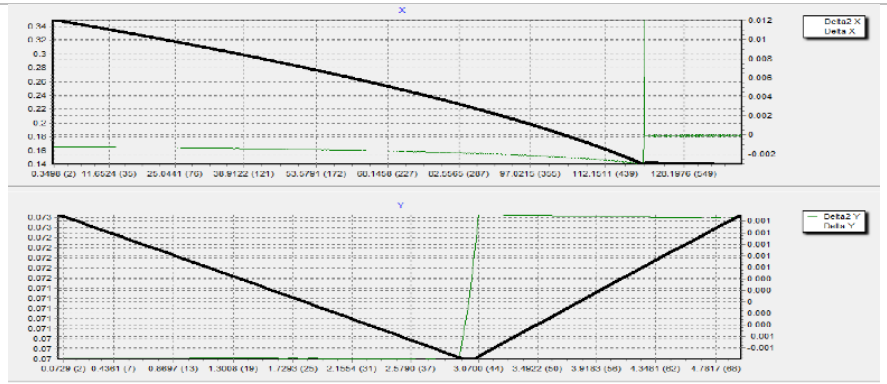
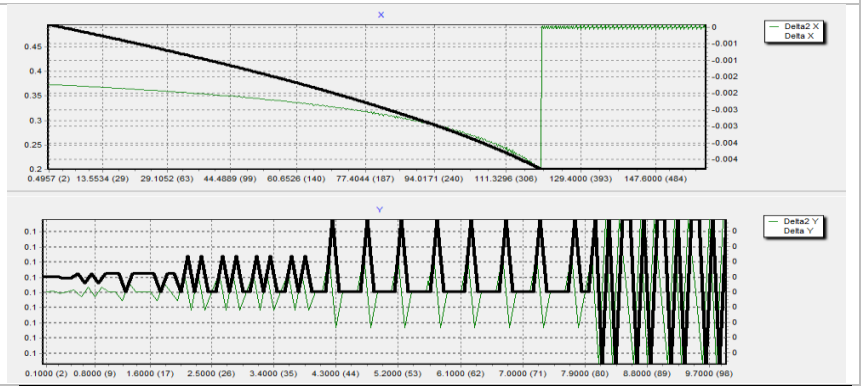
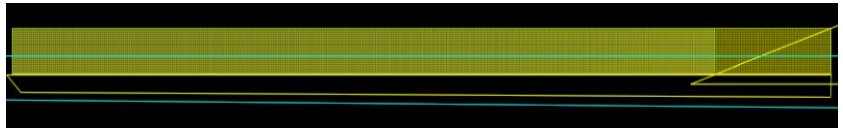
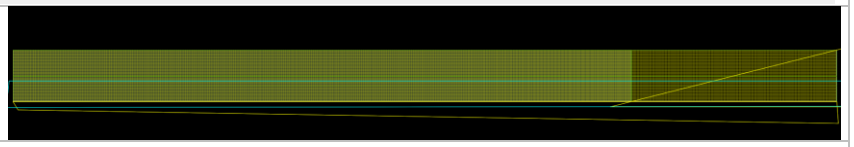
Con un pendiente de 1:4, para que el dique sea enteramente dentro el dominio, las longitudes de diques mínimo fueron tomando en cuenta. Al final para buscar las longitudes globales del dominio para cada calado, una adición del campo de vegetación de 80 metros y del arrecife de ostras de 10 metros a estos longitudes del dique fue realizada. Tomando un margen de 30 metros también para que el oleaje tiene el espacio necesario para su formación adecuada, y que no viene directamente sobre un obstáculo. Esos resultados están puestos en el **cuadro 5.**

b) Mallas

La herramienta CORAL permite generar la malla. La creación de una malla es un compromiso entre tiempo de computación y resolución numérica. En efecto, este parte tiene que estar bien desarrollado para no haber de presencia de disipación numérica. Las condiciones que debe respetar al mínimo las mallas están definidas por las fórmulas (7), (8), (9), (10). Δx es el tamaño de celdas sobre el eje x, Δy es el tamaño de celdas sobre el eje y.

$$\Delta y = \frac{Hs}{10} \quad (7) \qquad 1 < \frac{\Delta x}{\Delta y} < 5 \quad (8) \qquad \Delta x > \frac{L}{100} \quad (9) \qquad \Delta y > \frac{L}{100} \quad (10)$$

Estas condiciones tienen que estar respetadas en todo el dominio, lo más complicado en general es de hacer respectar esto en el campo de generación. Para reducir el tiempo de computación una subzona fue añadida a la izquierda del dique. Las mallas distintas para los calados son descritas en el **cuadro 6**. Para la malla 1, la condición de la formula (7) no está respectada, porque un tamaño de celda de 0,05 habría conllevado un tiempo computacional muy elevado, sin embargo, si se cumple una relación entre el tamaño de celda en vertical y la altura de ola aceptable.

Nombres mallas	*1*	*2*
Calados (metros)	*2*	*4*
Esquema malla		
Tamaño celdas		
Generaciones mallas		
Hsmin (metros)	0,5	1
Δy	0,07	0,1
Δx contorno	0,35	0,5
Condición generación	5	5
N° celdas X	632	545
N° celdas Y	70	100
Total celdas dominio	**44 240**	**54 500**

Cuadro 6. Descripción implantación mallas IH2VOF

c) Generación de las diferentes soluciones híbridas

El IH2VOF permite simular la interacción del flujo con campos de vegetación y geometrías como el arrecife de ostras.

Para añadir los campos de vegetación, necesita ir dentro el fichero fuente llamado : "*Input*", y cambiar los argumentos, tal descrito en el **cuadro 2**; va a generar directamente las plantas dentro el modelo. Una suposición de un Cd igual a 1 es puesto, todo esto se basa en la implementación realizada en *(Maza et al, 2013)*. Para añadir la caja de ostras, se define el arrecife como un obstáculo lleno, sin introducir ningún valor de porosidad debido a la falta de información y como primera aproximación. Para la última tipología va solamente haber un aumentación del contorno del fondo de 30 centímetros, en efecto las marismas se colocan ahora sobre el aumento batimétrico, esos cambios se realizan dentro el fichero *"Input".*

Al final hay seis mallas distintas, un básica de solo dique, un de tipología de arrecife de ostras, una de aumentación del fondo, y eso para los dos calados, porque los campos de vegetación no se meten dentro la herramienta CORAL.

d) Generación de las condiciones de oleaje

Los oleajes generados son de tipo irregular para acercarnos lo más posible de condiciones reales. Para lograr a haber una definición correcta de oleaje irregular, es necesario haber al mínimo tres cientos olas simuladas. Eso se calcula con la formula (11) que depende del periodo medio, para encontrar el tiempo de computación necesario. La generación de esos oleajes irregulares se consideran un espectro teórico de tipo JONSWAP con un factor de apuntamiento de 3,3. Los resultados están puesto en el **cuadro 7**.

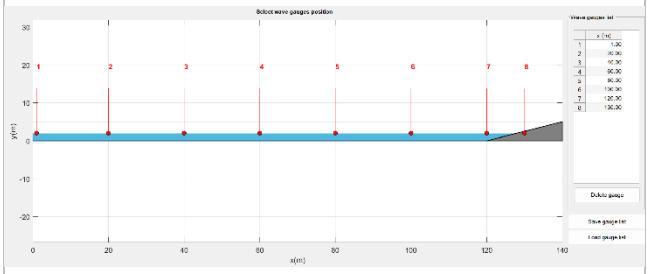
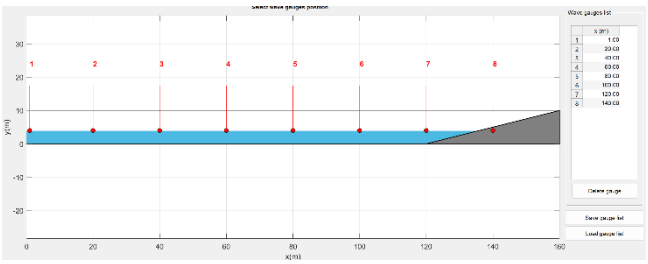
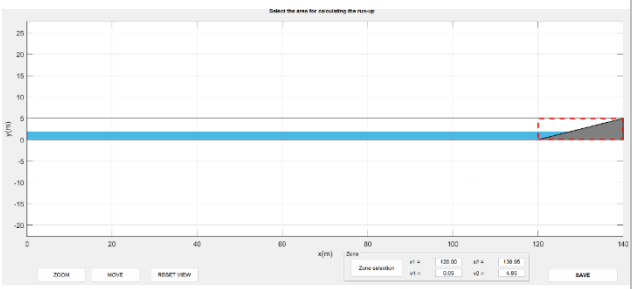
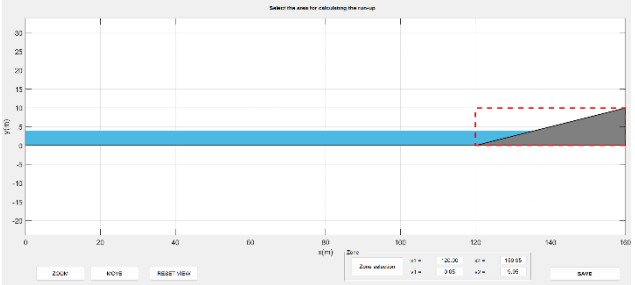
$$Dur = N° \, olas * Tm \quad (11)$$

Casos	H_s (m)	T_p (s)	T_m (s)	N° de olas	Duraciones (s)
1	2,09	6,78	5,34	306	1650
2	1,55	2,92	2,43	307	750
3	1,02	11,62	9,01	318	2 900
4	1,02	11.38	9,11	310	2 850
5	0,76	6,46	4,78	311	1 500
6	0,51	10,02	7,76	319	2 500

Cuadro 7. Duraciones para los casos elegidos

e) Definición de sensores numéricos y medida de run up

Además, dentro lo fichero de input de generación, una densidad del agua típica del mar Atlántico de 1025 kg/m^3 fue tomado, y una absorción de la limite izquierda, contorno de generación, fue elegido. Los sensores fueron puestos cada 20 metros para poder explotar los resultados de superficie libre gracias a la técnica del *Upcrossing* en posproceso. El ultimo sensor es distinto entre los dos calados, **cuadro 8**.

Nombre malla	*1*	*2*
Sitios sensores		
Zona estudio del run-up		

Cuadro 8. Repartición sensores y zonas estudio de run-up

IH2VOF da directamente el valor del Run-up 2%, pero necesita definir el dominio de aplicación que debe estar dentro el mayador. Básicamente, toda la rampa va estar estudiado para los dos calados.

4. Resultados

4.1. Verificación de set-up numérico

La primera cosa que hacer cuando hay muchas simulaciones como en este trabajo es de hacer la verificación de la relevancia de nuestras elecciones, o de malla, o de oleaje, o de tiempo computacional. Pero también ver si la regla que dice que no tiene que haber rebase esta respectada.

Lógicamente las soluciones con vegetación o arrecife de ostras van a reducir el run-up de los oleajes. Por eso este postulado trata los casos de la tipología 1, es decir, del dique solo. Los casos a riesgos son ellos a máxima alturas de olas, con periodos más grandes, es decir los casos T1C1, T1C3, T1C4, T1C6.

N° caso	Calado	tan(alpha)	Hs	Tp	$T_{m-1,0}$	Lp,dique	$L_{m-1,0}$	$\xi_{m-1,0}$
1	**4**	**0.25**	**2**	**6.6**	**6.00**	**38,78**	**56.2**	**1.33**
2	4	0.25	1.5	3	2.73	13.4	11.6	0.70
3	**4**	**0.25**	**1**	**11.7**	**10.64**	**71.9**	**176.6**	**3.32**
4	**2**	**0.25**	**1**	**9.4**	**8.55**	**41.0**	**114.1**	**2.67**
5	2	0.25	0.75	6	5.45	25.6	46.4	1.97
6	**2**	**0.25**	**0.5**	**10**	**9.09**	**43.7**	**129.0**	**4.02**

Cuadro 9. Elección casos preliminares

Los resultados demuestran que la continuación de las otras simulaciones se puede, no hay rebase, **figura 13**. Además, no hay disipación numérica en el caso lo más sensible, el T1C6 que se ha puesto un Δy grosero de 0.07, porque comparando las alturas de olas a lo largo del dominio en las **figuras 14 y 15**, no se atenúan ruidosamente.

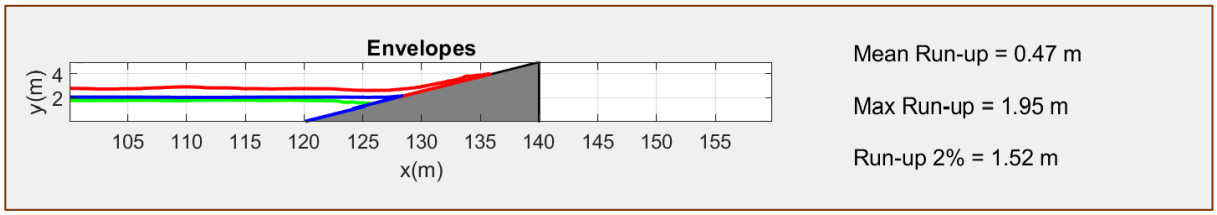
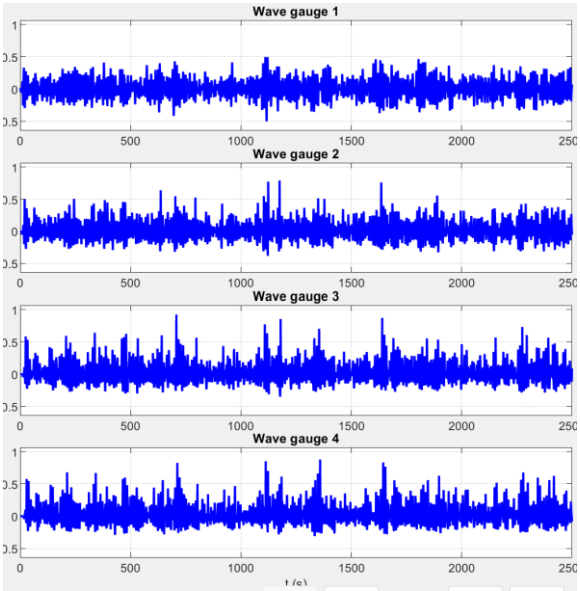


Figura 13. Resultados run-up caso T1C6



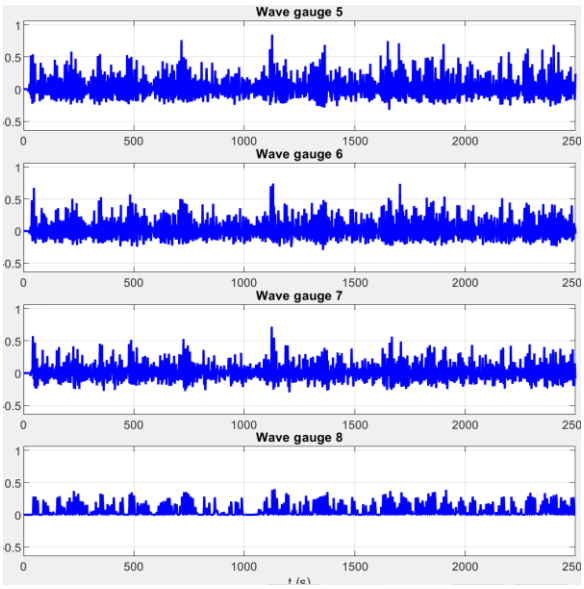


Figura 14 y 15. Resultados superficie libre sensores caso T1C6

4.2. Explotación de resultados

Después de la ejecución de todos los casos, se puede encontrar los run-up 2%. A cada caso ejecutado de T1C1 a T5C6, es posible con el VOF de ver el valor del run-up 2%, cf **figura 16**. Los resultados están puestos en el **cuadro 10.**

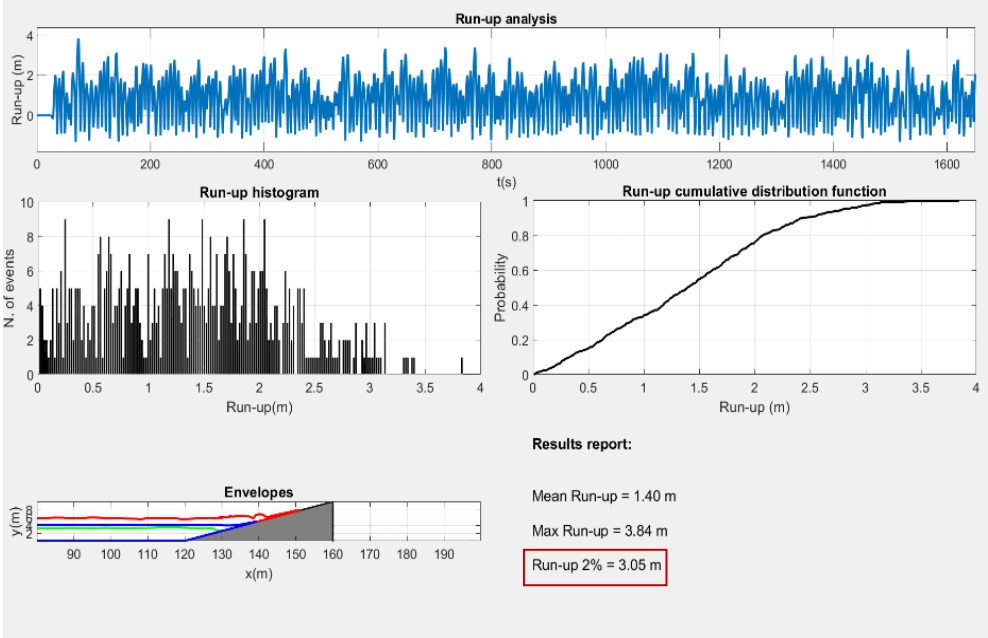


Figura 16. Interfaz Run-up IHVOF

Con las alturas de olas significantes a la generación se puede encontrar el run-up 2% relativo que corresponde a RU2%/Hs. Los resultados están puestos en el **cuadro 10.** Los resultados de los run-up 2% relativos para la tipología 1, un dique solo impermeable no rugosa se comparan con la **figura 17** *(Eurotop , 2018).*

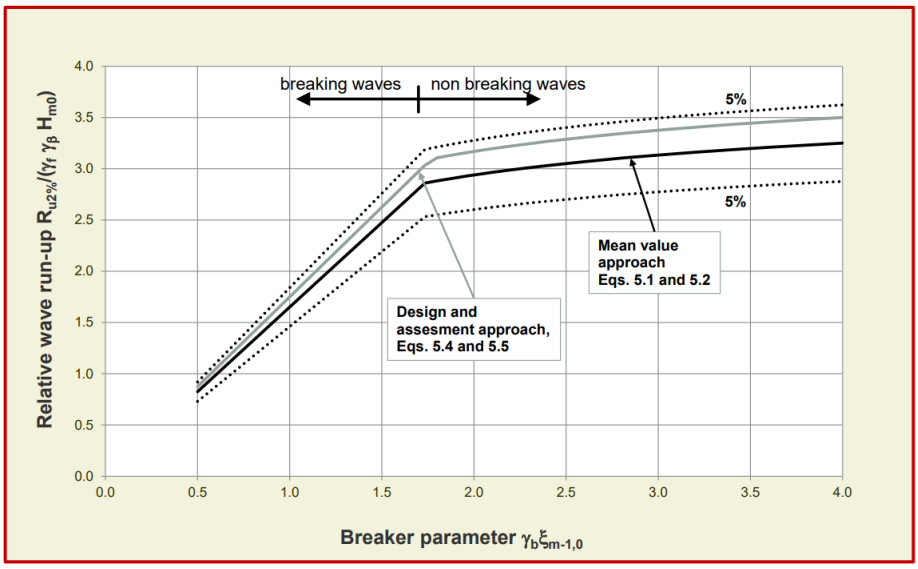


Figura 17. Run-up relativo 2% en función del parámetros de rotura para rampa impermeable, *(Eurotop , 2018)*

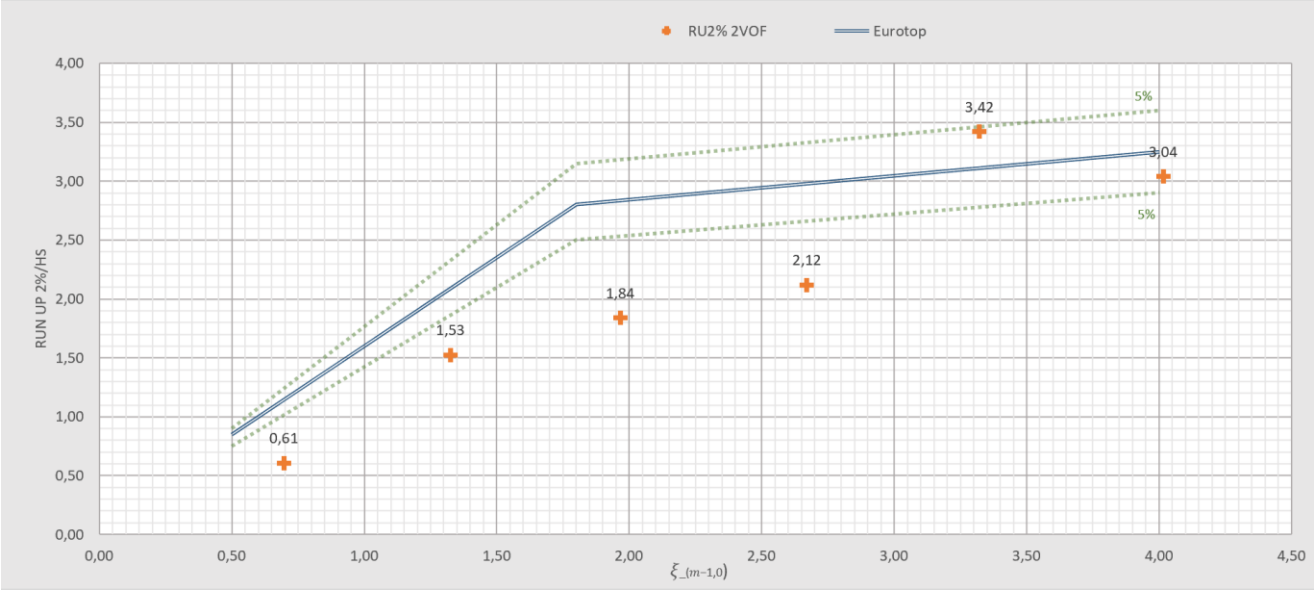


Figura 18. Comparación Run-up2% VOF con curva del *Eurotop (2018)*

Los puntos naranjas están a bajo de la curva del *Eurotop (2018)* por lo que se revisa la altura de ola considerada ya que la **figura 18** se obtiene considerando los valores generados pero las formulaciones de *Eurotop (2018)* consideran la altura de ola a pie de estructura.

Tipologías	*H_s generación*	$T_{m-1,0}$	$L_{m-1,0}$	$\xi_{m-1,0}$	*Nombres simulaciones*	*RU2% 2VOF absoluto*	*RU2% relativo*
Solo dique	2	6.0	56.2	1.33	T1C1	3,05	**1,53**
	1.5	2.7	11.63	0.70	T1C2	0,91	**0,61**
	1	10.6	176.6	3.32	T1C3	3,42	**3,42**
	1	8.5	114.13	2.67	T1C4	2,12	**2,12**
	0.75	5.5	46.37	1.97	T1C5	1,38	**1,84**
	0.5	9.1	129	4.02	T1C6	1,52	**3,04**
Dique con marismas	2	6.0	56.2	1.33	T2C1	2,81	**1,41**
	1.5	2.7	11.63	0.70	T2C2	0,85	**0,57**
	1	10.6	176.6	3.32	T2C3	3,12	**3,12**
	1	8.5	114.13	2.67	T2C4	1,52	**1,52**
	0.75	5.5	46.37	1.97	T2C5	0,88	**1,17**
	0.5	9.1	129	4.02	T2C6	0,96	**1,92**
Dique con caja de ostras	2	6.0	56.2	1.33	T3C1	2,92	**1,46**
	1.5	2.7	11.63	0.70	T3C2	0,86	**0,57**
	1	10.6	176.6	3.32	T3C3	3,27	**3,27**
	1	8.5	114.13	2.67	T3C4	1,99	**1,99**
	0.75	5.5	46.37	1.97	T3C5	1,33	**1,77**
	0.5	9.1	129	4.02	T3C6	1,31	**2,62**
Dique con marismas y caja de ostras	2	6.0	56.2	1.33	T4C1	2,83	**1,42**
	1.5	2.7	11.63	0.70	T4C2	0,81	**0,54**
	1	10.6	176.6	3.32	T4C3	3,11	**3,11**
	1	8.5	114.13	2.67	T4C4	1,48	**1,48**
	0.75	5.5	46.37	1.97	T4C5	0,83	**1,11**
	0.5	9.1	129	4.02	T4C6	0,92	**1,84**
Dique con marismas, aumentando el fondo	2	6.0	56.2	1.33	T5C1	2,76	**1,38**
	1.5	2.7	11.63	0.70	T5C2	0,81	**0,54**
	1	10.6	176.6	3.32	T5C3	3,05	**3,05**
	1	8.5	114.13	2.67	T5C4	1,32	**1,32**
	0.75	5.5	46.37	1.97	T5C5	0,77	**1,03**
	0.5	9.1	129	4.02	T5C6	1,46	**2,92**

Cuadro 10. Resultados Run-up2% VOF para cada casos

Por lo tanto, se analiza la evolución de la altura de ola a lo largo del dominio. Para ello se realiza un estudio de pasos ascendentes por cero (*upcrossing*). Así, se puede trazar a lo largo del dominio la altura de ola, como muestra la **figura 19**.

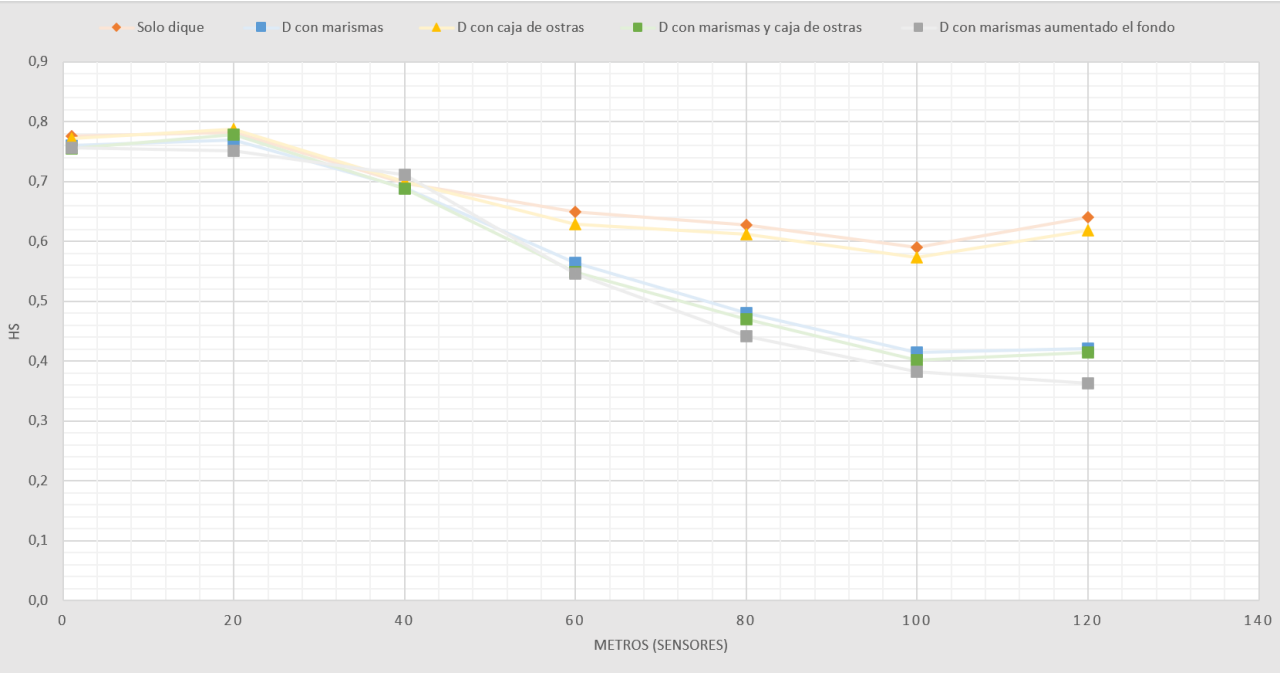


Figura 19. Alturas de olas de los tipologías a lo largo del dominio

La **figura 19** muestra una disminución de Hs a lo largo del dominio. Además, a veinte metros que es diez metros antes de las caja de ostras, hay asomeramiento de la onda por una disminución de calado. Ese fenómeno se acentúa en los casos con presencia de arrecife de ostras. Se nota la reducción de la altura de ola Hs para todas los casos, incluido la solución convencional, aunque las soluciones hibridas con marismas son los más afectados con esta reducción. Esto se debe a que hay rotura del oleaje, como muestra la **figura 20**. Por lo tanto, la consideración de utilizar la altura de ola generada en el análisis de run-up relativo no es correcta y por ello se realizan un conjunto de nuevas simulaciones en las que la rampa impermeable se elimina del dominio para ser sustituida por un contorno absorbente y así poder estimar al altura de ola incidente a pie de estructura.

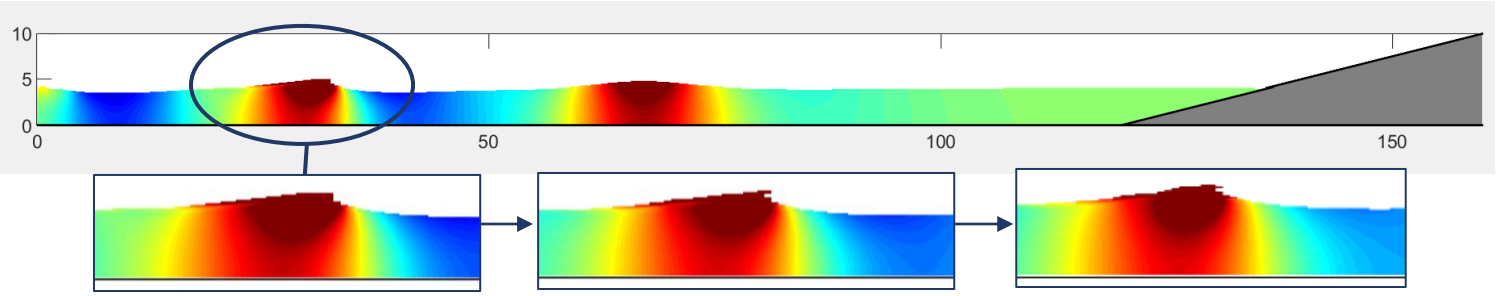


Figura 20. Fenómeno de rotura caso T1C1

Así, se coloca un sensor a 120 metros del punto de generación, es decir a pie de dique. De hecho es a la misma distancia entre los calados distintos, el dique se sitúa a esos 120 metros. En la **figura 21** está demostrado para la tipología del arrecife de ostras, la colocación del nuevo sensor. Se ha realizado de la misma manera para las otras tipologías.

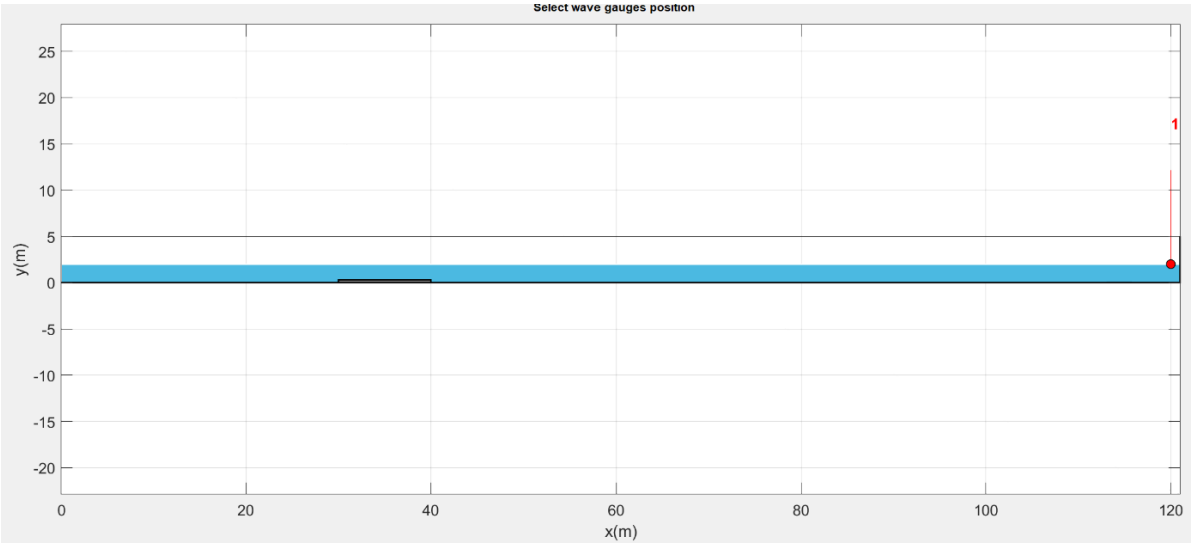


Figura 21. Sitio del sensor a pie de dique

Despues de las treinta nuevas simulaciones, se puede encontrar gracias al *upcrossing*, los nuevos valores de Hs, los cuales se han recapitulativo en el **cuadro 11**. Con las alturas de ola significante a pie de dique se puede hallar el nuevo run-up 2% relativo que corresponde a RU2%/Hs. Además de esos cambios, el parámetro de rotura cambia también. Este parámetro depende de Lm-1,0 que depende solamente del calado y del periodo en profundidad reducida, por lo que no cambia, la pendiente que tampoco cambia y Hs a pie de dique que si cambia. Los resultados de los run-up 2% relativos obtenidos con las Hs incidente a pie de estructura para cada tipología se muestran en el **cuadro 11.**

Tipologías	*H_s generación*	*Hs pie de dique*	$T_{m-1,0}$	$L_{m-1,0}$	$\xi_{m-1,0}$	*Nombres simulaciones*	*RU2% 2VOF absoluto*	*RU2% relativo*
Solo dique	2	**0,89**	6.0	56.2	**1,99**	T1C1	3,05	**3,43**
	1.5	**0,41**	2.7	11.63	**1,33**	T1C2	0,91	**2,22**
	1	**0,66**	10.6	176.6	**4,09**	T1C3	3,42	**5,18**
	1	**0,41**	8.5	114.13	**4,17**	T1C4	2,12	**5,17**
	0.75	**0,39**	5.5	46.37	**2,73**	T1C5	1,38	**3,54**
	0.5	**0,33**	9.1	129	**4,94**	T1C6	1,52	**4,61**
Dique con marismas	2	**0,79**	6.0	56.2	**2,11**	T2C1	2,81	**3,56**
	1.5	**0,39**	2.7	11.63	**1,37**	T2C2	0,85	**2,18**
	1	**0,59**	10.6	176.6	**4,33**	T2C3	3,12	**5,29**
	1	**0,28**	8.5	114.13	**5,05**	T2C4	1,52	**5,43**
	0.75	**0,24**	5.5	46.37	**3,47**	T2C5	0,88	**3,67**
	0.5	**0,21**	9.1	129	**6,20**	T2C6	0,96	**4,57**
Dique con caja de ostras	2	**0,89**	6.0	56.2	**1,99**	T3C1	2,92	**3,28**
	1.5	**0,4**	2.7	11.63	**1,35**	T3C2	0,86	**2,15**
	1	**0,66**	10.6	176.6	**4,09**	T3C3	3,27	**4,95**
	1	**0,33**	8.5	114.13	**4,65**	T3C4	1,99	**6,03**
	0.75	**0,36**	5.5	46.37	**2,84**	T3C5	1,33	**3,69**
	0.5	**0,31**	9.1	129	**5,10**	T3C6	1,31	**4,23**
Dique con marismas y caja de ostras	2	**0,81**	6.0	56.2	**2,08**	T4C1	2,83	**3,49**
	1.5	**0,37**	2.7	11.63	**1,40**	T4C2	0,81	**2,19**
	1	**0,59**	10.6	176.6	**4,33**	T4C3	3,11	**5,27**
	1	**0,26**	8.5	114.13	**5,24**	T4C4	1,48	**5,69**
	0.75	**0,23**	5.5	46.37	**3,55**	T4C5	0,83	**3,61**
	0.5	**0,21**	9.1	129	**6,20**	T4C6	0,92	**4,38**
Dique con marismas, aumentando el fondo	2	**0,77**	6.0	56.2	**2,14**	T5C1	2,76	**3,58**
	1.5	**0,37**	2.7	11.63	**1,40**	T5C2	0,81	**2,19**
	1	**0,59**	10.6	176.6	**4,33**	T5C3	3,05	**5,17**
	1	**0,23**	8.5	114.13	**5,57**	T5C4	1,32	**5,74**
	0.75	**0,24**	5.5	46.37	**3,47**	T5C5	0,77	**3,21**
	0.5	**0,17**	9.1	129	**6,89**	T5C6	1,46	**8,59**

Cuadro 11. Resultados Hs pie de dique, parámetro de rotura y Run-up2% VOF para cada casos

Los resultados de los run-up 2% relativos para la tipología 1, un dique solo impermeable no rugoso, se comparan con la **figura 17** *(Eurotop , 2018).* De hecho las bandas de confianzas están del orden de cinco porcientos del valor aplicando la media entre la formula (5) y (6), que es la curva del *Eurotop (2018)*. Entonces los valores de tipología 1 debe estar dentro este dominio para validar los datos.

En la **figura 22**, los seis valores estan representos. Se puede validar los tres primeros casos que estan realmente cerca del dominio cubierto en la obtención de la curva del *Eurotop (2018)*. Aunque los valores obtenidos no caen dentro de las bandas de confianza del 95%, los valores son muy próximos a ellas y se pueden dar por satisfactorios los resultados obtenidos. Sin embargo, un mayor estudio sería necesario para los otros tres casos que dan lugar a run-up relativos mucho mayores a los estimados por el *Eurotop (2018)*.

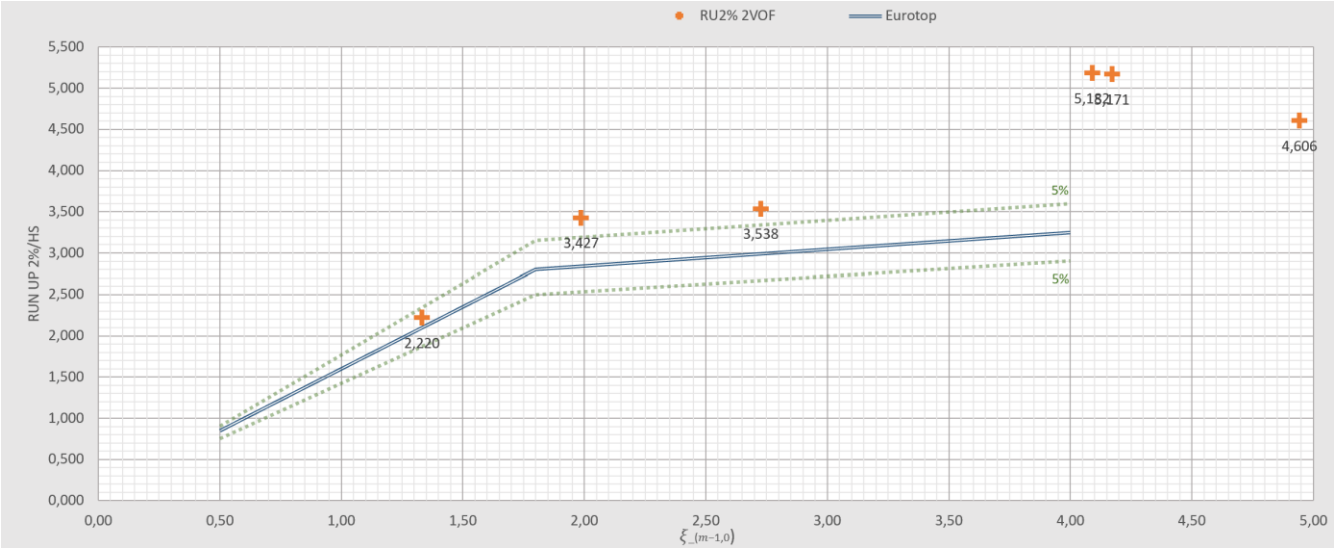


Figura 22. Comparación Run-up2% VOF con curva del *Eurotop (2018)*

Para poder ver las variaciones en el runup relativo producidas por las diferentes tipologías estudiadas, los resultados obtenidos se pintan en la **figura 23** junto con los resultados de solo dique y el *Eurotop (2018)*. Hasta un parametro de rotura de 4, los valores pueden estar relevantes, exepto la tipologia del aumento del fondo. Es necesario de ver como se comporta la curva del *Eurotop (2018)* despues de ese parametro de rotura de 4, para concluir sobre los puntos de la **figura 23.**

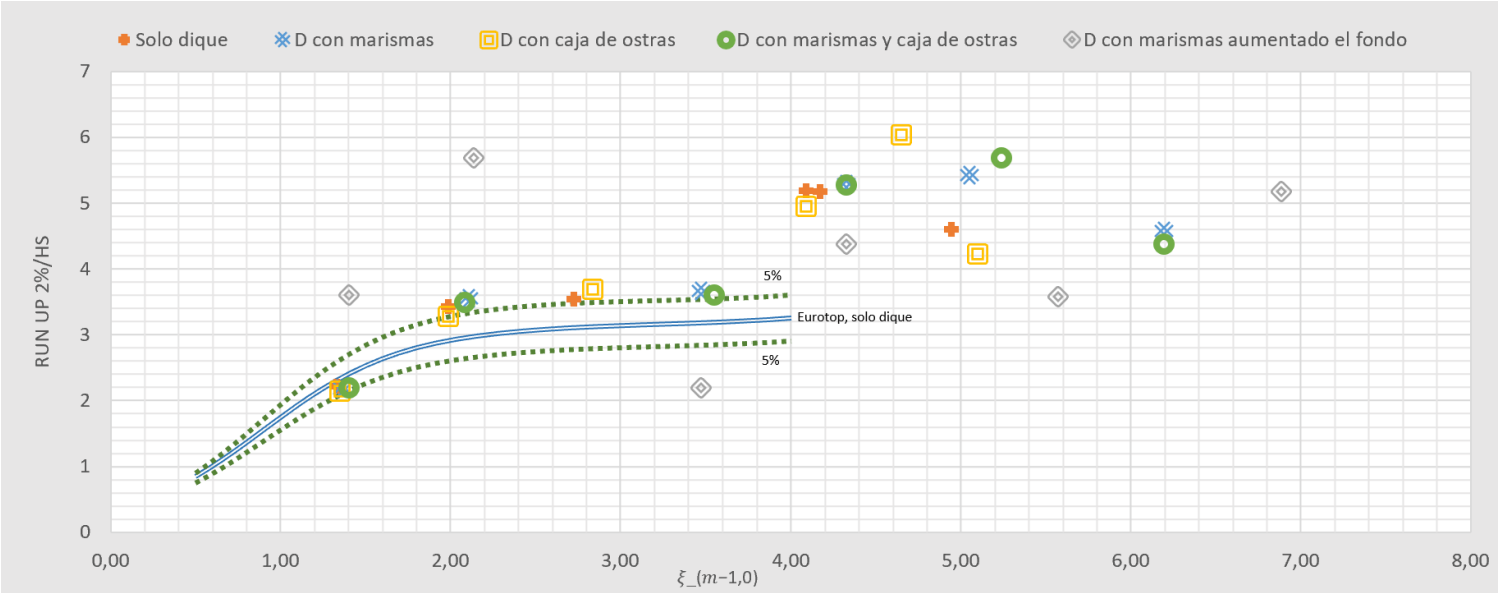


Figura 23. Comparación Run-up2% VOF en función de los tipologías con curva del *Eurotop (2018)*

5. Conclusiones y discusión

5.1. Discusión de resultados

El cambio en la altura de las olas incidentes al pie del dique tras producirse rotura en su propagación da lugar a números de rotura mayores que los inicialmente planteados. Por ello, se considera la **figura 24**, teniendo estos valores en el rango de aplicación de los resultados finale. En efecto, la **figura 24** describe la curva del *Eurotop (2018)* con parametro de rotura mayores a 4, se nota la concentracion de punto en el dominio elegido al principio de los valores del eje X. De hecho hay un aumento del tamano de las bandas de confiaza de par los 5% que aumentan en funcion de los valores del run-up relativo.

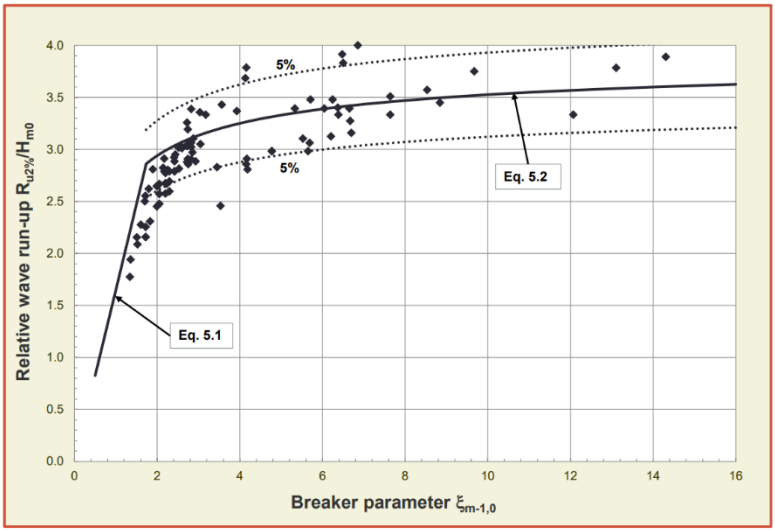


Figura 24. Run-up relativo 2% en función del parámetros de rotura para costa superficiales, *(Eurotop , 2018)*

La **figura 24** muestra que los valores esperados para números de rotura hasta 15 siguen estando por debajo de 4. Sin embargo, se obtiene valores mucho más grande en la **figura 25**. Los resultados obtenidos están fuera de las estimaciones del *Eurotop (2018)*. En efecto, los valores están arriba de la curva de banda de confianza de 5% propuesta por el *Eurotop (2018)*, se necesitaría estudiar en profundidad los puntos obtenidos para entender porque salen tan diferentes a la **figura 24.**

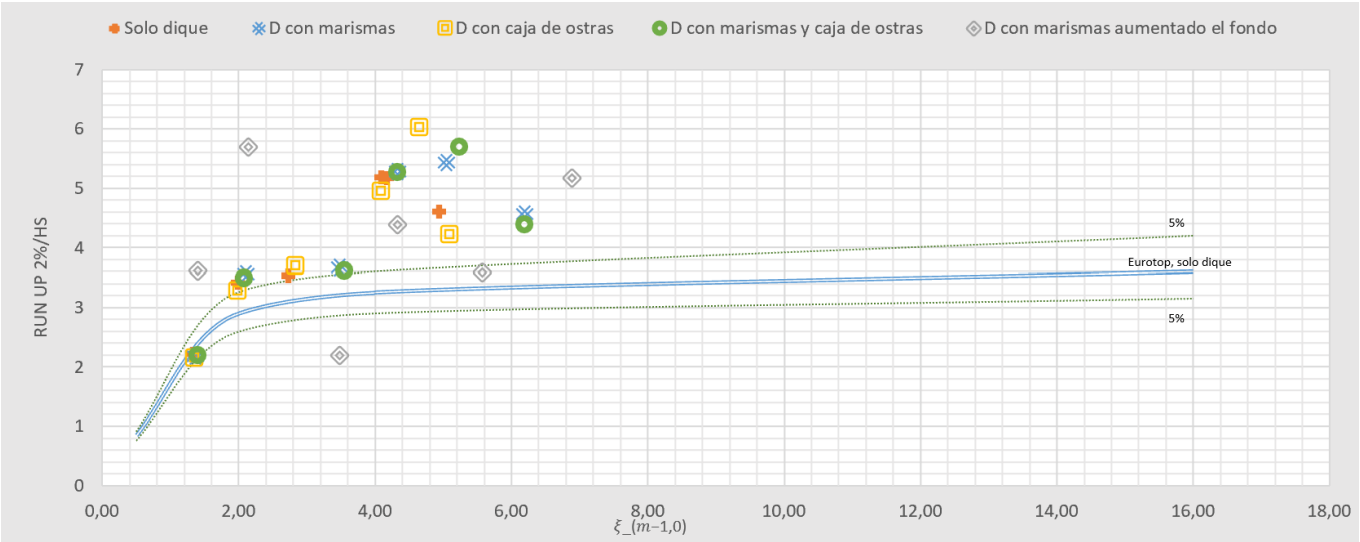


Figura 25. Comparación Run-up2% VOF en función de los tipologías con curva del *Eurotop (2018)*

Al final en la **figura 25** se puede explotar solamente los tres primeros puntos en cada tipologías como la gran discrepancia obtenida con respecto al *Eurotop (2018)*. Las simulaciones no permitan de explotar a bien el run-up 2% relativo. En efecto, desde que hay incorporación de esas nuevas alturas de olas a pie de dique, los resultados vuelven incoherentes. Pero la cuestión básica es demostrar que las soluciones híbridas funcionan. El presente estudio se centra en el análisis de los primeros puntos que mostraban acuerdo entre los resultados de solo dique y el *Eurotop (2018)* y para poder entender en qué medida disminuyen el run-up absoluto sobre la estructura las diferentes soluciones híbridas van a comparar esa variable. Se traza para cada caso el run-up absoluto en función del parámetro de rotura del caso asociado Hs a la generación. Esto permite un estudio comparativo real con mismos valores en abscisa según la **figura 26**.

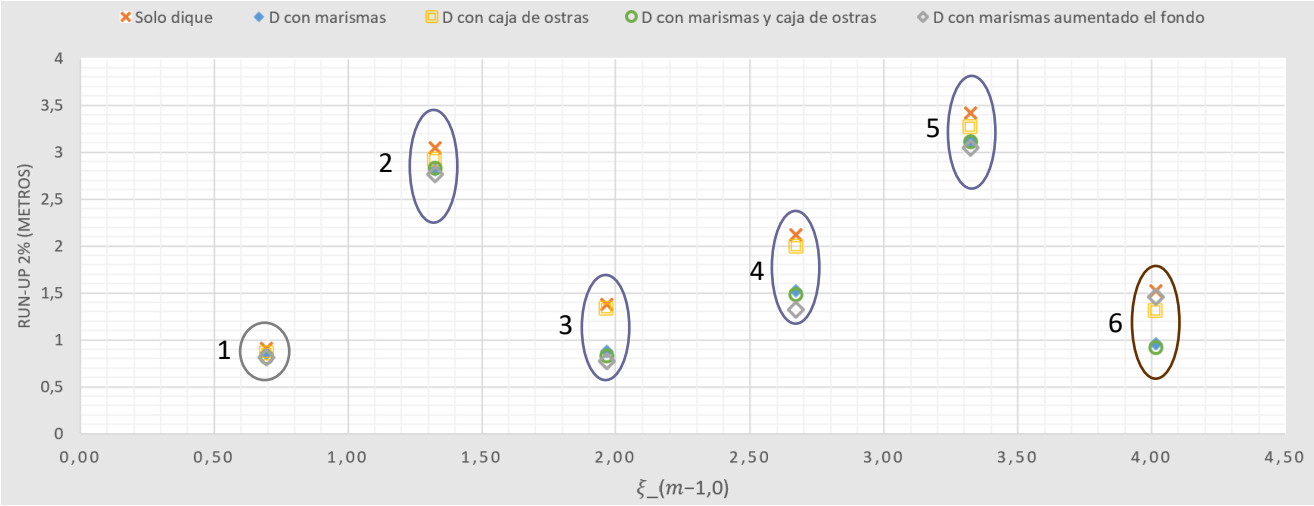


Figura 26. Comparación Run-up2% absoluto VOF en función de los tipologías

1 Para $\xi_{m_1,0} = 0{,}7$, que corresponde al caso 2, tiene condiciones hidrodinámicas de una altura significante de 1,5 metros con un periodo de pico de 3 segundos. La diferencia entre los puntos es demasiado pequeña para poder mostrar una tendencia. Efectivamente, es un grupo de punto centrado alrededor de la valor del run-up absoluto de 0,8 metros debido a una altura de ola grande con una frecuencia elevada. Este caso trae trae un gran cuantiad de ondas en poco tiempo, una ola llega en la solución no tiene el tiempo para tener el efecto de la tipología que otra onda llega directamente, esto explica los puntos cercanos.

2, 3, 4, 5 Para los cuatros puntos siguentes es decir, para $\xi_{m_1,0} = 1{,}33$, que corresponde al caso 1, $\xi_{m_1,0} = 1{,}97$, al caso 5, $\xi_{m_1,0} = 2{,}67$, al caso 4 y $\xi_{m_1,0} = 3{,}32$, al caso 3, la cruz roja, que es el caso de un dique convencional, está claramente por encima de los otros casos correspondientes a las soluciones híbridas. En efecto, es aquí que se demuestra que, para los mismos casos de oleaje en la generación, las soluciones híbridas tienen un valor de run-up 2% inferior a un dique convencional. Es decir que por adición de un campo de vegetación y/o un arrecife de ostras a un dique convencional, su run-up 2% incidente se encuentra reducido.

Justo debajo de los valores del Run-up 2% máximo correspondiente al caso de solo un dique, la solución hibrida compuesta de arrecife de ostras es presente. Esa es la solución híbrida menos eficiente, en la **figura 26**, los valores de sus run-up 2% son muy similares a los de la solución convencional. Además, en todas las soluciones los valores de run-up 2% de la tipología de adición de marismas y la tipología de adición de marismas con arrecifes de ostras son prácticamente iguales. Es decir, que la presencia

de esos arrecifes de ostras tienen un impacto bajo en la reducción del run-up. Hay el ejemplo de la adición de arrecifes de ostras a la solución convencional que hace disminuir de 5 centímetros en promedio en comparación con el dique solo. Y el ejemplo de la adición de esos arrecifes de ostras a una solución ya hibridas: las marismas, que hace disminuir de 2 centímetros en promedio en comparación con una solución hibrida de marismas sola. Los arrecifes de ostras hacen disminuir los valores del run-up, la solución hibrida "*Oyster reef*" funciona bien, pero es poco en comparación con las marismas que hacen reducir de 60 centímetros en promedio en comparación con la solución convencional. Según la **figura 26** todas las marismas son funcionales, se hacen bien representativos por el modelo IH2VOF. Aunque, se nota que entre los tres casos que contienen marismas, la solución hibrida con el aumento del fondo es la más eficaz.

6 Para $\xi_{m_1,0} = 4$, que corresponde al caso 6, es posible establecer un análisis similar que el anterior, con la diferencia de que el run-up 2% para la tipología 5 no resulta ser el más reducido como en casos con parámetro de rotura menor. En efecto, es el caso 6, con una altura de olas significantes de 0,5 metros, para la tipología con el calado mínimo de 2 metros, pero debido a la aumentación del fondo de 30 centímetros con la sedimentación de los raíces, el calado es el mínimo de todas las ejecuciones, y es de un valor medio de 1,7 metros. Efectivamente, puede ser el fenómeno de rotura, pero eso debería reducir la altura de olas a lo largo del dominio. Sin embargo, la tipología 5 está todavía más eficaz que la tipología convencional 1. Entonces, según la **figura 26**, las soluciones hibridas tienen valores del run-up 2% absoluto inferiores a la solución convencional. La adición de campo de vegetación reduce también el valor del run-up 2% absoluto en este análisis.

Los círculos 1, 2 y 3 cumplen la validación propuesta en la **figura 25** para los tres primeros puntos. La misma tendencia sale de los análisis de los otros círculos. Esto demostró que los resultados 4, 5 y 6 de la **figura 26** siguen el mismo esquema que los puntos relevantes.

5.2. Conclusiones

Tomando en cuenta que muchas de las simulaciones dieron lugar a valores de run-up relativo muy elevado en comparación con lo esperable siguiendo el *Eurotop (2018)*, las conclusiones sobre el run-up relativo se centran en el análisis de aquellos casos que si presentaban valores coherentes con las estimaciones del *Eurotop (2018)*. Los valores de altura de ola significante incidente a pie de estructura se ven reducidos con respecto a los generados debido a la rotura de la mayoría de los oleajes generados.

Las causas pueden ser múltiples. Puede ser que los argumentos de '*input*' han reaccionado mal cuando la malla ha cambiado. Hay un sujeto sobre una potencial disipación numérica también, aunque se nota que no había a primera vista comparando los sensores a lo largo del dominio. Se puede que el Δy=0,07 que no respecta la condición de la ecuación (7), tiene que estar diez celdas por tamaño de ola mínimo, es demasiado grande. Se notó rotura en todas las simulaciones lo que no debería pasar con los característicos de la malla comparando con las alturas de olas puestas. El tema de la rotura del oleaje seria a estudiar también. El posproceso fue verificado. La autocritica se concluye que hay un problema en las simulaciones de recalculo de las alturas de olas al pie de dique.

En los resultados del run-up 2% relativo una parte pequeña es explotable, ha ido posible de validar la mitad de los valores de la solución convencional con la curva del *Eurotop (2018)*. Claramente, no es una validación total del funcionamiento de nuestro modelo. Las soluciones hibridas salen fuera del dominio según la **figura 25**. El problema de computación se encuentra acentuada porque aparece

rotura del oleaje. Además, la división por la altura significante recalculada a pie de dique ha disminuido, que se nota muy reducida en todos los casos.

Para poder establecer un análisis comparativo entre las diferentes soluciones en términos absolutos se analiza el run-up absoluto. Los resultados obtenidos muestran que las soluciones híbridas analizadas reducen el run-up además de añadir un servicio ecosistémico. Esta reducción del run-up depende de la tipología estudiada. Mas específicamente, la tipología que incluye un campo de marismas con el cambio de fondo resulta ser la más eficiente reduciendo el run-up, seguido por la marismas combinadas con el arrecife de ostras, seguido por las marismas solas, y finalmente, el arrecife de ostras sólo.

La continuidad del proyecto consistiría en reanudar las simulaciones, escalando la elección de los casos; al aumentar el calado para evitar la rotura de las olas, o aumentar la definición de las mallas. Por otro lado, sería necesario el análisis de mayor detalle de los casos ya analizados para poder entender los procesos que dan lugar a valores de run-up relativo tan elevados y entender así mejor las condiciones simuladas de calados pequeños, que son comunes en el tipo de soluciones planteadas.

Por lo tanto, este estudio es una premisa que abre la necesidad de seguir investigando sobre la temática. Así, una futura línea de trabajo sería modelar otras tipologías de soluciones hibridas, como el dique integrado en una duna, en un bulevar, el dique verde ancho, el dique con modelo de arena… Debido al tiempo a disposición, se tuvo que tomar decisiones relevantes, es un verdadero compromiso.

Referencias

A.E. Sutton-Grier, K. Wowk, H. Bamford, 2015. *Futur of our coasts : The potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of ou coastal communities, economies and ecosystems.* http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.006

J.M. Van Loon-Steesma, H.A. Schelfhout, P. Vellinga, 2014. *Green adaptation by innovative dike concepts along the Dutch Wadden Sea coast.* http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2014.06.009

J.M. Van Loon-Steesma, P. Vellinga, 2013. *Trade-offs between biodiversity and flood protection services of coastal satl marshes*. http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.007

B.W. Borsje, B.K. Van Wesenbeeck, F. Dekker, P. Paalvast, T.J. Bouma, M.M. Van Katwijk, M.B. de Vries, 2010. *How ecological engineering can serve in coastal protection.* http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.027

M. Maza, J.L. Lara, I.J. Losada, B. Ondiviela, J. Trinogga, T.J. Bouma, 2015. *Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental* analysis. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.010

V. Vuik, S.N. Jonkman, B.W. Borsje, T. Suzuki, 2016. *Nature-based flood protection: The efficiency of vegetated foreshores for reducing wave loads on coastal dikes.* http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.06.001

V. Vuik, S. van Vuren, B.W. Borsje, B.K. van Wesenbeeck, S.N. Jonkman, 2018. *Assessing safety of nature-based flood defenses: Dealing with extremes and uncertainties.* https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.002

"Ecoshape", building with nature, https://www.ecoshape.org/en/pilots/oyster-reefs/

EurOtop, 2018, *Manual on wave over of sea defences and related structures*