



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DE BYPASS DE SEDIMENTOS EN ESTRUCTURAS

Trabajo realizado por:

Raquel Costas Gómez

Dirigido:

Dr. Ernesto Mauricio González Rodríguez

MSc. Erica Pellón de Pablo

Titulación:

**Máster Universitario
en Ingeniería Costera y
Portuaria**

Santander, octubre de 2017

TRABAJO FINAL DE MASTER





Contenido

Resumen	6
Abstract	8
1. Introducción	10
1.1. Motivación del estudio	10
1.2. Estado del arte	11
1.2.1. Modelos one-line.....	11
1.2.2. Modelos actuales y cómo resuelven el bypass de sedimento	12
1.2.3. Conclusiones del estado del arte.....	14
1.3. Objetivos.....	15
1.4. Organización del documento.....	15
2. Metodología	17
2.1. Datos	17
2.1.1. Datos de geometrías.....	18
2.1.2. Oleaje de entrada	19
2.2. Transporte de sedimentos.....	19
2.2.1. Oleaje y corrientes tras la propagación.....	19
2.2.2. Cálculo del transporte	21
2.3. Caracterización del bypass.....	24
2.3.1. Caracterización de la tasa de bypass.....	24
2.3.2. Caracterización de la distribución del sedimento de bypass	26
2.4. Parametrización del bypass	29
3. Resultados	32
3.1. Transporte de sedimentos.....	32
3.1.1. Patrones de transporte de sedimentos.....	32
3.2. Caracterización de la distribución de bypass.....	34
3.3. Parametrización del bypass	36
3.3.1. Tasa de sedimento de bypass.....	36
3.3.2. Distancia inicial de afección.....	37
3.3.3. Distancia final de afección	39
3.3.4. Parámetros b_1 y b_2 de la formulación de la distribución.....	40



4. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	42
4.1. Conclusiones	42
4.2. Futuras líneas de investigación.....	42
Bibliografía.....	44
Anejo 1. Casos de oleaje.....	46



Índice de figuras

Figura 1: Bypass en espigones al sur del puerto de Sagunto (izquierda) y Valencia (derecha).....	10
Figura 2: Diagrama para la definición de la ecuación de la conservación del sedimento	12
Figura 3: Definición de los parámetros que caracterizan el proceso de bypass en estructuras.....	15
Figura 4: Diagrama del flujo de trabajo	17
Figura 5: Batimetría con misma profundidad a ambos lados del dique	18
Figura 6: Batimetría con línea de costa avanzada	19
Figura 7: Mapa de oleaje propagado con línea de costa aguas arriba avanzada	20
Figura 8: Mapa de corrientes con pendiente 1:10	20
Figura 9: Definición de variables para el cálculo del bypass	25
Figura 10: Definición de variables para cálculo de la distribución	26
Figura 11: Ejemplo de ajuste de Q_e^a (función) a Q_e (datos)	29
Figura 12: Ejemplo en el que la estructura no interrumpe el transporte litoral de sedimentos	33
Figura 13: Ejemplo en el que la estructura interrumpe parcialmente el transporte litoral de sedimentos	33
Figura 14: Ejemplo en el que la estructura interrumpe totalmente el transporte litoral de sedimentos	34
Figura 15: Comparación acumulación de sedimento por perfil con la integración del total, de valores positivos y valores exteriores a la estructura.....	35
Figura 16: Comparación acumulación de sedimento por perfil con formulación de Soulsby y formulación del CERC	36
Figura 17: Ajuste del caudal de bypass	37
Figura 18: Datos de la distancia inicial de afección	38
Figura 19: Distribuciones del bypass en algunos de los casos donde no se puede medir D_i	38
Figura 20: Distribuciones del bypass en algunos de los casos donde no se puede medir D_i	39
Figura 21: Ajuste distancia de afección final del bypass	40
Figura 22: Ajuste parámetro b_1	41
Figura 23: Ajuste del parámetro b_2	41



Resumen

Título: Análisis de bypass de sedimentos en estructuras.

Autora: Raquel Costas Gómez.

Directores: Dr. Ernesto Mauricio González Rodríguez y MSc. Erica Pellón de Pablo.

Convocatoria: octubre 2017.

Palabras clave: bypass, estructuras, playas, transporte de sedimentos, modelos numéricos, tasa bypass, distribución de bypass.

Está comprobado que las estructuras costeras constituyen una perturbación del sistema morfológico natural (Kristensen, Dronen, Deigaard, & Elfrink, 2017). En general, la presencia de estructuras conducirá a un avance de la costa aguas arriba y la erosión de la línea de costa aguas abajo de la estructura (DHI, 2016).

Para conocer el funcionamiento es imprescindible modelar el comportamiento del sistema. IHCantabria está desarrollando un modelo numérico de evolución de línea de costa llamado CHRONOS y una de las mejoras que aportará CHRONOS frente a otros modelos es el modelado del bypass de sedimentos alrededor de estructuras, estando el presente estudio enmarcado en este contexto.

Este estudio tiene como objetivo principal el estudio del fenómeno de bypass alrededor de estructuras, de forma que el proceso pueda ser incluido en el modelo CHRONOS. Con el fin de cumplir este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos los cuales consisten en la determinación de formulaciones empíricas para parametrizar: en primer lugar, la tasa de sedimento que pasa aguas abajo de la estructura, la tasa de bypass, respecto del caudal de sedimento aguas arriba de la estructura. En segundo lugar, la distribución del sedimento de bypass depositado aguas debajo de la estructura que tendrá forma asimétrica con cola asintótica, y en particular la distancia de inicio y la distancia final de afección del bypass.

La metodología para alcanzar los objetivos planteados parte de una colección de distintas geometrías (batimetrías y estructuras) y oleajes (Cange, 2017). En los que se obtienen los datos de oleaje, corrientes y transporte en cada nodo de la malla de cálculo.

Posteriormente, se realiza un primer tratamiento de estos datos de transporte para caracterizar la tasa de bypass y con esta se realiza un segundo tratamiento de datos para caracterizar las distancias final e inicial y la distribución del sedimento de bypass aguas debajo de la estructura en función de dos parámetros de forma.

Finalmente, se procede a la parametrización de las variables de interés que caracteriza el bypass en función de las condiciones de geometría y oleaje.



Los resultados obtenidos son cuatro formulaciones empíricas función de la profundidad en rotura y la profundidad en el morro de la estructura.

En primer lugar, la tasa de bypass se parametriza en función del cociente entre profundidad en rotura y profundidad en el morro de la estructura.

En segundo lugar, la distribución del bypass de sedimentos se ajusta a una función con dos parámetros independientes los cuales son función de la profundidad de rotura y profundidad en el morro de la estructura. En cuanto a la distancia final, se parametriza en función de la profundidad en rotura y se ajusta a una recta con sus dos coeficientes función de la profundidad en el morro de la estructura.

Finalmente, se propone emplear la media de los valores obtenidos para cada profundidad en el morro de la estructura por falta de datos para la obtención de la distancia inicial de sedimentación del material procedente del bypass.

Cabe destacar que tanto la tasa como distribución del bypass son independientes de la dirección y el periodo del oleaje.

Del cálculo de los estadísticos de ajuste se obtiene que los errores son bajos y la correlación alta. Por lo tanto, las formulaciones empíricas que se han determinado podrán ser implementadas en el modelo CHRONOS, permitiendo determinar la cantidad de sedimento de bypass y su distribución en la costa aguas abajo de la estructura a partir de la profundidad en rotura del oleaje y la profundidad en el morro de la estructura.

En base a lo expuesto se proponen unas futuras líneas de investigación que, en términos generales, consideran la necesidad de generar otras geometrías con el fin de ampliar la base de datos disponible.

Abstract

Title: Analysis of sediment bypass in structures.

Author: Raquel Costas Gómez.

Tutors: Dr. Ernesto Mauricio González Rodríguez and MSc. Erica Pellón de Pablo.

Call: October of 2017

Key words: bypass, structures, beach, sediment transport, numerical models, bypass rate, bypass distribution.

It is an established fact that coastal structures constitute a disturbance of the natural morphological coastal system (Kristensen, Dronen, Deigaard, & Elfrink, 2017). In general, the presence of structures will lead to an advance of the upstream coastline and erosion of the coastline downstream of the structure (DHI, 2016).

To understand how the system works it is necessary to model its behaviour. IHCantabria is developing a numerical model of coastline evolution called CHRONOS. One of the unique improvements to CHRONOS is the modelling of sediment bypass around structures.

The main aim of this work is the study of the bypass phenomenon around structures, so that the process can be included in the CHRONOS model. This was achieved through the following specific objectives, which consist in the determination of empirical formulations to parameterize: first, the sediment rate going downstream of the structure, the bypass rate, in relation to the sediment flow upstream of the structure. Second, the distribution of the bypass sediment deposited downstream of the structure and in particular the starting distance and the final distance of bypass affection.

The methodology to obtain the objectives starts in waves, currents and transport data obtained in each node of the calculation mesh, from a collection of different geometries (bathymetry and structures) and waves types. Afterwards, these transport data are processed in order to characterize the bypass from the variables of interest: final distance, initial distance and distribution function with the variables that define it.

Finally, the variables of interest are parameterized so as to characterize the bypass as a function of the geometry and waves conditions.

The results obtained are four empirical formulation where the depth at the base of the structure and the depth of wave break are the variables that define it.

Firstly, the bypass rate is parameterized as a function of the ratio between depth of wave break and depth at the base of the structure.



Secondly, the distribution of the sediment bypass is parameterized as a function with two independent parameters which are function of depths of wave break and at the base of the structure. As for the final distance, it is parameterized according to the depth at break and is fitted to a line with its two coefficients function of the depth at the base of the structure.

Finally, it is proposed to use the average of the values obtained for each depth at the base of the structure due to lack of data to obtain the initial sedimentation distance.

It should be noted that the bypass rate and bypass distribution are independent of the direction and period of the wave.

From the calculation of correlation and RMSE we obtain that errors are low and the correlation high.

The empirical formulations that have been determined can be implemented in the CHRONOS model, allowing to calculate the amount of bypass sediment and its distribution in the coastline downstream of the structure from depths of wave break and at the base of the structure.

According with the above conclusions, future research lines are proposed. In general terms, the need of generating other geometries is considered to widen the available data base.

1. Introducción

1.1. Motivación del estudio

Las playas cumplen tres funciones principales que son la defensa de la costa disipando la energía del oleaje incidente, hábitat de flora y fauna y uso lúdico humano. Estos espacios naturales suponen un atractivo turístico de gran impacto en la economía mundial y nacional y a su vez, son espacios de gran fragilidad que se encuentran expuestos a factores que pueden alterarlos modificando las funciones principales descritas. Estas alteraciones se pueden producir por diferentes causas, tanto naturales como artificiales (GIOC, 2017).

Las causas naturales son debido a la variabilidad de las dinámicas actuantes (oleaje, corrientes, viento, marea, ...) como puede ser a muy largo plazo (siglos) el ascenso del nivel del mar, a largo plazo (décadas) la acumulación de sedimentos en estructuras, a medio plazo (meses) el basculamiento de playas según estaciones y a corto plazo (horas) los eventos de temporal.

La erosión costera y la acumulación han existido siempre y estos procesos han contribuido a la configuración de las costas actuales. Sin embargo, la erosión costera ahora se intensifica en gran parte debido a las actividades humanas. Actualmente, el área costera total (incluyendo casas y edificios) perdida en Europa debido a la erosión marina se estima en unos 15 km² por año (Van Rijn, 2011).



Figura 1: Bypass en espigones al sur del puerto de Sagunto (izquierda) y Valencia (derecha)

Comprobado está que las estructuras costeras constituyen una perturbación del sistema morfológico natural (Kristensen, Dronen, Deigaard, & Elfrink, 2017) (ver Figura 1). Una estructura tiene dos efectos principales en el transporte de sedimentos de litoral: La corriente litoral y el transporte de sedimentos son bloqueados parcial o totalmente por



la estructura y por otra parte la estructura tiene un efecto de refugio para la acción de las olas en la playa aguas abajo (Hans Hanson, 1989). En general, la presencia de estructuras conducirá a un avance de la costa aguas arriba y la erosión de la línea de costa aguas abajo de la estructura (DHI, 2016).

Por lo tanto, si se quiere evaluar el impacto de una actuación en un entorno (natural o humana) o predecir el comportamiento de dichas actuaciones, para una correcta gestión del litoral, es necesario entender el funcionamiento morfodinámico del sistema y modelos numéricos que resuelvan los procesos.

En este ámbito, IHCantabria está desarrollando un modelo numérico de evolución de línea de costa llamado CHRONOS. Uno de los principales hitos del CHRONOS es el modelado del bypass de sedimentos alrededor de estructuras, estando el presente estudio enmarcado en este contexto, ya que trata de desarrollar formulaciones empíricas de transporte de sedimento para reproducir el fenómeno de bypass alrededor de estructuras, de forma que el proceso pueda ser incluido en el modelo CHRONOS.

1.2. Estado del arte

Se sabe que en la zona de rompientes es donde se produce el mayor transporte de sedimentos, ya que el oleaje los pone en suspensión y las corrientes, que son generadas por la rotura, lo transportan. No obstante, el modelado del flujo en la zona de rompientes y la interacción flujo-sedimento sólo se puede realizar imponiendo simplificaciones.

Las principales simplificaciones son debido a la variabilidad de escalas y tridimensionalidad de los procesos. En función de la escala temporal se diferencian entre modelos de corto plazo (escala horas-días), medio plazo (días-meses) y largo plazo (años). Por otra parte, el problema de la tridimensionalidad se soluciona estudiando por separado la planta y el perfil de playa por ser independientes en el contexto de una determinada dinámica (IHCantabria, 2017).

Esto implica la existencia de diferentes modelos para las diferentes escalas y múltiples clasificaciones. El modelo CHRONOS se encuadra como un modelo one-line, se define este tipo de modelos en el apartado 1.2.1.

1.2.1. Modelos one-line

Un modelo de línea de costa es un modelo de predicción numérica basado en la ecuación de continuidad del sedimento y en una ecuación para el transporte longitudinal de sedimentos. Se denomina también Teoría de Una Línea (One Line Theory, OLT) para la predicción de la línea de costa, donde "Una Línea" se refiere a la línea de costa (IHCantabria, 2017).

Como se ha dicho, la formulación de estos modelos está basada en la ecuación de conservación del sedimento de la playa. Donde si el transporte longitudinal, Q ($m^3/s/m$), varía a lo largo de la costa, la sección transversal, A (ver Figura 2), de la playa en la posición X (ver Figura 2) cambiará en función del tiempo, t .

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

La base de los modelos de una línea es asumir que el perfil de playa no cambia de forma y sólo se traslada paralelamente a sí mismo hasta la profundidad de cierre (ver Figura 2). Esto hace que no puedan ser utilizados en escalas temporales más pequeñas, en las que es necesario tener en cuenta la variabilidad experimentada por el perfil de playa (Ruiz, Gonzalez, & Medina, 2016).

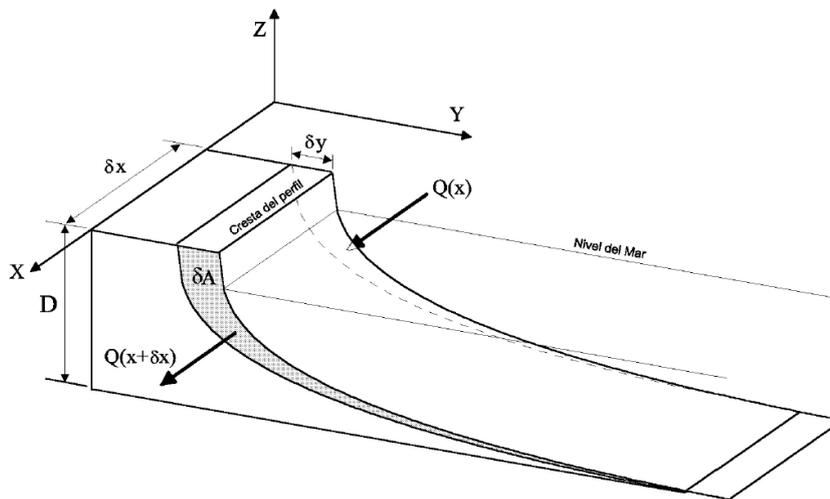


Figura 2: Diagrama para la definición de la ecuación de la conservación del sedimento

El cambio en la sección transversal es igual al cambio en la posición de los contornos del perfil multiplicado por la profundidad de cierre, D . Lo que resulta (IHCantabria, 2017):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

1.2.2. Modelos actuales y cómo resuelven el bypass de sedimento

En este apartado se expone como resuelven el bypass algunos de los modelos de una línea existentes, como son LITLINE y GenCade.



1.2.2.1. LITLINE

LITLINE es un módulo dentro del paquete del modelo híbrido LITPACK, desarrollado por el DHI. Este paquete combina modelos deterministas para el cálculo de la posición de la línea de costa, en el cual el módulo LITLINE, basado en la teoría one-line, evalúa la posición de la línea de costa a partir del transporte resolviendo la ecuación de conservación de sedimento (DHI 2016).

La distancia total, L_{total} , desde la estructura hasta el punto en que el flujo ha alcanzado su valor de equilibrio para un flujo uniforme está relacionada en parte con la longitud de la estructura y en parte con la fricción del lecho:

$$L_{total} = \max(L_s, L_{sep}) + L_f \quad (3)$$

Donde:

$$L_s = L_g \tan \delta \quad (4)$$

$$L_{sep} = 6L_g \quad (5)$$

$$L_f = 2.3 \frac{D}{f_w} \quad (6)$$

Donde

- δ = dirección de onda en la punta de la estructura (°).
- L_g = longitud de la estructura (m).
- D = la profundidad del agua (m).
- f_w = factor de fricción.

La tasa de transporte total, así como la distribución transversal del transporte, se calcula y guarda en las tablas antes de la ejecución de LITLINE. Para determinar la tasa de transporte y la distribución bajo ciertas condiciones, se interpola los valores de las tablas entre los valores del nivel de agua, la pendiente de la superficie debido a las corrientes no generadas por la onda, el período de onda, la altura h_b y el ángulo α_b de la onda en la línea de ruptura (DHI, 2016).

1.2.2.2. GenCade

GenCade es un modelo desarrollado para calcular el transporte de sedimentos, el cambio de morfología a lo largo de las regiones costeras, la evolución volumétrica de los bancos de arena y el bypass de arena en las desembocaduras y estructuras de ingeniería (Frey et al., 2012). Está basado en el modelo GENESIS (Hans Hanson, 1989) y el modelo Cascade (Larson, Kraus, & Conell, 2006).

La tasa de bypass (BYP) es calculada a través de la ecuación (7):



$$BYP = 1 - \frac{D_G}{D_{LT}}; \quad D_G \leq D_{LT} \quad (7)$$

Donde:

- D_{LT} = es la profundidad a la que se produce el transporte de sedimentos en la costa (m).
- D_G = la profundidad en el morro de la estructura (m).

Se supone que el bypass tiene lugar si la profundidad del agua en la punta de la estructura D_G es menor que la profundidad del transporte activo D_{LT} (Frey et al., 2012).

Esta profundidad de transporte activo en la costa, D_{LT} , se define y se fija igual a la profundidad de rotura de las ondas más altas en el lado de la corriente ascendente de la estructura. Esta profundidad se relaciona con la altura de ola significativa H_s (m) utilizada a través de la siguiente expresión:

$$D_{LT} = \left(\frac{1,27}{\gamma} \right) H_s \quad (8)$$

En el que 1,27 es el factor de conversión entre la altura de onda de una décima más alta y la altura de ola significativa y γ el índice de rotura. (Frey et al., 2012)

1.2.3. Conclusiones del estado del arte

La distancia de afección del bypass en LITLINE se relaciona con la longitud de la estructura y con la fricción del fondo. Esta última se calcula con el parámetro de rugosidad de Nikuradse y la amplitud del movimiento de la partícula en el fondo. En ambos parámetros influye la presencia de formas del lecho y, dado que cambian continuamente puede generar variaciones en el resultado propuesto.

Se desconoce las formulaciones utilizadas para la distribución del material de bypass para ambos modelos, a pesar de que el manual de LITLINE realiza una descripción del procedimiento no existen formulaciones detalladas para este tipo de estructura.

Ante la falta de formulaciones para simular en bypass se decide realizar esta investigación para obtener formulaciones que puedan implementarse en un modelo numérico desarrollado por IHCantabria.

1.3. Objetivos

Como se ha dicho, IHCantabria está desarrollando un modelo numérico de evolución de línea de costa tipo one-line llamado CHRONOS y una de las mejoras que aportará CHRONOS frente a otros modelos es el modelado del bypass de sedimentos alrededor de estructuras.

Por lo tanto, este estudio tiene como objetivo principal el estudio del fenómeno de bypass alrededor de estructuras.

Con el fin de cumplir este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos que consisten en la determinación de formulaciones empíricas para parametrizar (ver Figura 3):

- La tasa de sedimento que pasa aguas abajo de la estructura, la tasa de bypass (P_b) respecto del caudal de sedimento aguas arriba de la estructura (Q_{aa}).
- La distribución del sedimento de bypass depositado aguas abajo de la estructura $Q_e(b_1, b_2)$, donde b_1 y b_2 son parámetros de forma, y en particular la distancia de inicio, D_i , y la distancia final, D_f , de afección del bypass.

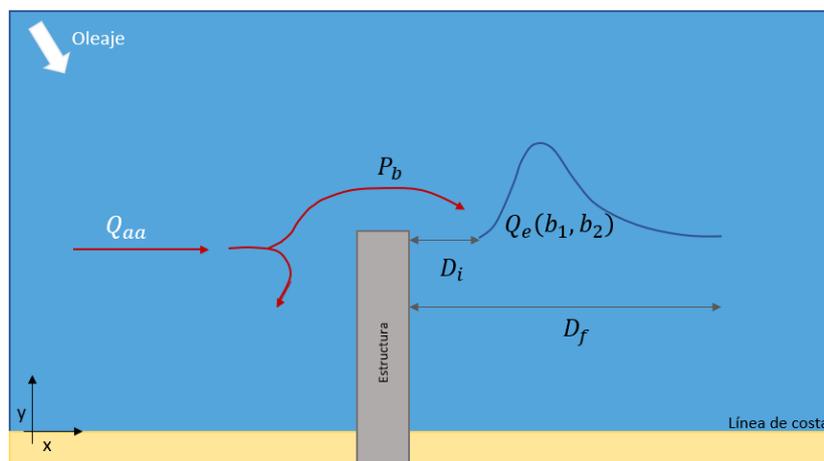


Figura 3: Definición de los parámetros que caracterizan el proceso de bypass en estructuras

1.4. Organización del documento

La estructura del documento es la que sigue:

Capítulo 1. Introducción, en el que se describe la motivación del estudio, se realiza el análisis del estado del arte y se definen los objetivos a lograr con el presente estudio.

Capítulo 2. Metodología, donde se realiza una descripción detallada de los datos utilizados y del procedimiento del estudio junto con formulaciones y modelos utilizados.

Capítulo 3. Resultados, en el que se muestran los resultados obtenidos con el procedimiento.



Capítulo 4. Conclusiones, donde se exponen las principales conclusiones alcanzadas con el estudio y futuras líneas de investigación.

Anejo 1. Casos de oleaje.

2. Metodología

En este capítulo se describen los datos y el procedimiento utilizado especificando los modelos y formulaciones, así como los cálculos efectuados con el fin de alcanzar los objetivos descritos en el apartado 1.3 siguiendo el flujo de trabajo que se expone en la Figura 4.

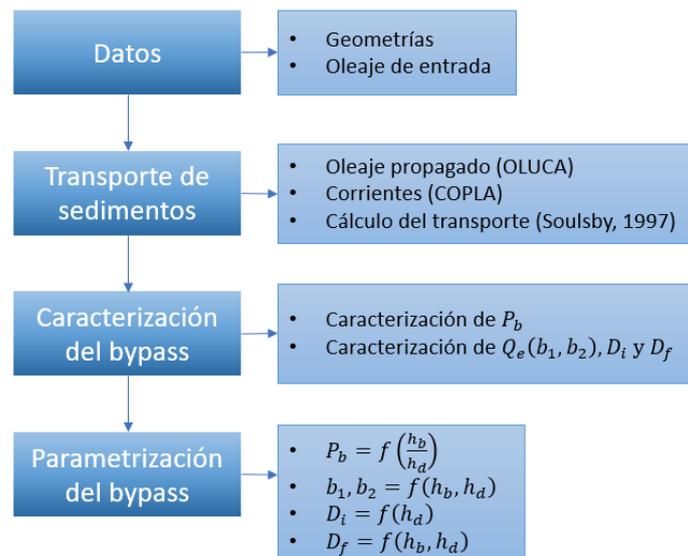


Figura 4: Diagrama del flujo de trabajo

Partiendo de una colección de distintas geometrías (batimetrías y estructuras) y oleajes. Se obtienen los datos de oleaje, corrientes y transporte en cada nodo de la malla de cálculo.

Posteriormente, se realiza un primer tratamiento de estos datos de transporte para caracterizar la tasa de bypass, P_b , y con esta se realiza un segundo tratamiento de datos para caracterizar b_1 , b_2 , D_i y D_f (Dónde b_1 , b_2 son las variables que definen la función de la distribución del sedimento aguas abajo de la estructura, Q_e).

Finalmente, se procede a la parametrización de las variables de interés que caracteriza el bypass en función de las condiciones de geometría y oleaje (h_b , profundidad en rotura del oleaje y h_d , profundidad a pie de la estructura).

2.1. Datos

Los datos utilizados en este estudio son los generados por (Cange, 2017) que se describen a continuación.

2.1.1. Datos de geometrías

Las geometrías estudiadas son unas batimetrías rectas y paralelas con una estructura situada de forma perpendicular a la línea de costa. Las distintas geometrías difieren en las pendientes de batimetría y en las profundidades a la que llega el pie de las estructuras.

En primer lugar, se disponen dos batimetrías teóricas rectas y paralelas con pendiente 1:100 y pendiente 1:10. La pendiente utilizada es la pendiente media ajustada a un perfil teórico de Dean de la forma:

$$h = A x^{2/3} \quad (9)$$

Donde depende únicamente del parámetro A, el cual es función del tamaño de grano medio, D_{50} .

$$A = k w^{0.44} \quad (10)$$

$$w = 273 D_{50}^{1.1} \quad (11)$$

Con un tamaño medio de sedimento de 0.1mm Cange (2017) obtuvo la pendiente 1:100 y con tamaño de 2mm la pendiente 1:10.

En segundo lugar, las estructuras estudiadas tienen una profundidad en el morro, h_d , de 2, 5 y 10 metros con una longitud de 200, 500 y 1000 metros respectivamente para la pendiente 1:100 y longitud de 20, 50 y 100 para la pendiente 1:10, se muestra un ejemplo en la Figura 5. Además, Cange (2017) recoge casos en los que la costa se encuentra avanzada aguas arriba de la estructura (ver Figura 6), la profundidad a la izquierda y derecha pueden ser 2 y 5 metros, 2 y 10 metros y 5 y 10 metros respectivamente.

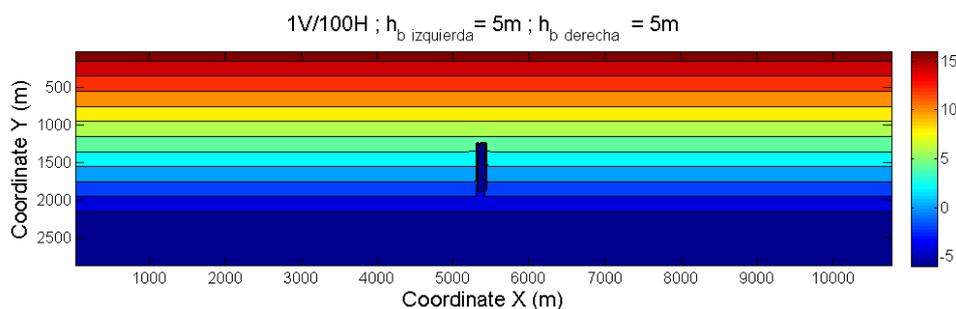


Figura 5: Batimetría con misma profundidad a ambos lados del dique

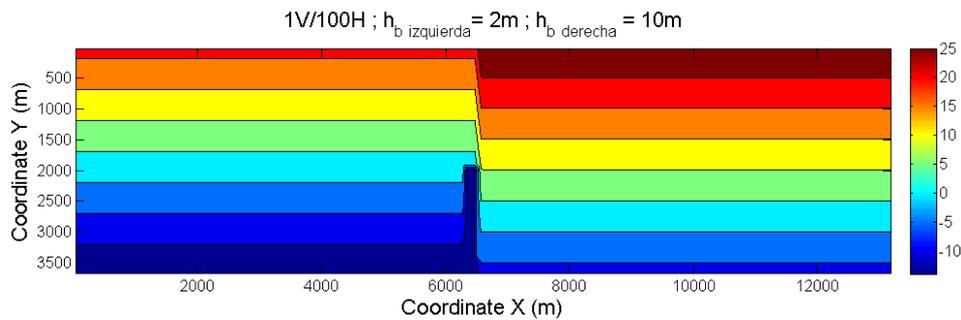


Figura 6: Batimetría con línea de costa avanzada

Con todas las combinaciones posibles de pendientes y profundidades en el morro de la estructura resultan del estudio de Cange (2017) 12 geometrías diferentes.

2.1.2. Oleaje de entrada

En cuanto a los casos de oleaje seleccionados para propagar, se trata de 145 escenarios representativos de las costas españolas obtenidos con la combinación de cinco direcciones de oleaje, ocho alturas de ola y seis periodos.

Estas direcciones son N5W, N15W, N30W, N45W y N60W, quedan así cubiertas las posibilidades de oleaje con incidencia casi perpendicular a la línea de costa y los más oblicuos.

Con el fin de definir las alturas de ola y los periodos de estudio, Cange (2017) recoge las tablas de encuentros de los datos del visor Maruca para todas las boyas tanto del Atlántico norte y sur como del Mediterráneo. Con estos datos calculó los valores más habituales para cada zona hasta obtener una media de toda la península y que posteriormente fueron simplificados para tener periodos comunes a varias alturas de ola. La tabla de valores finales se adjunta en el anejo 1.

2.2. Transporte de sedimentos

2.2.1. Oleaje y corrientes tras la propagación

En la propagación del oleaje hacia la costa, se producen fenómenos de modificación de los frentes de onda y, por tanto, de distribución espacial de la energía del oleaje (refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, disipación de energía por fondo, etc.). Con el objeto de caracterizar correctamente la dinámica del oleaje en la zona de estudio y las corrientes que genera, se hace necesario propagar los oleajes existentes en aguas profundas hacia la zona de interés.

Esta propagación realizada por Cange (2017) utilizando el Modelo de Propagación de Oleaje y Corrientes (OLUCA). El módulo de transformación de ondas (Oluca) es un modelo de refracción y difracción no lineal que simula el comportamiento de ondas

monocromáticas (versión Oluca-mc) y un mar aleatorio (versión Oluca-sp) sobre batimetría irregular de fondo. Estos modelos incluyen el efecto del asomeramiento, la refracción, la disipación de energía (fricción inferior y rotura de la ola), la difracción y la interacción de corriente de onda. Ambas versiones de Oluca se basan en la solución de aproximación parabólica a la ecuación de pendiente suave (MSP)(González et al., 2007).

En el estudio Cange (2017) utilizó Oluca-mc para la propagación de los casos de oleaje en todas las geometrías, obteniendo de este modo mapas de altura de ola y de corrientes en cada caso, así como los datos en cada nodo de la malla.

En este estudio se ha realizado un análisis de los mapas y se descartan las geometrías donde las profundidades a los dos lados de la estructura son diferentes dado que en la propagación del oleaje se observa una importante modificación del oleaje incidente debido al cambio brusco en la profundidad entre el perfil izquierdo y derecho del dique como se puede ver en la Figura 7.

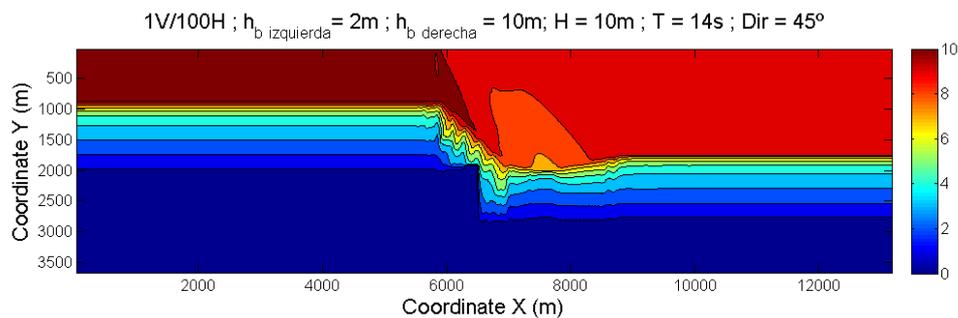


Figura 7: Ejemplo mapa de oleaje propagado con línea de costa aguas arriba avanzada

Del análisis de los mapas de corrientes en los casos propagados se descartan las geometrías con pendiente 1:10 ya que los resultados obtenidos, se pueden observar en la Figura 8, no son válidos para un estudio como el presente.

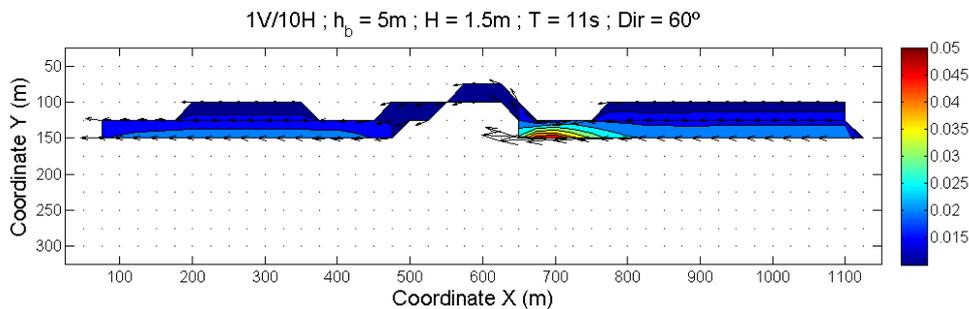


Figura 8: Ejemplo mapa de corrientes con pendiente 1:10

Por lo tanto, para el presente estudio se utilizan las geometrías con pendiente 1:100 y profundidades iguales a ambos lados del morro de la estructura con longitudes variables de 200, 500 y 1000 m, correspondientes a profundidades en el morro de la estructura



de (2, 5 y 10m). Lo que resultan tres geometrías diferentes sobre las que se analizan los 145 casos de oleaje propagados.

En este documento se muestran los ejemplos de resultados para la batimetría con profundidad en el morro del dique de $h_d = 5$ metros. Los casos de $h_d = 2$ y 10 metros también son estudiados, como se ha dicho, y se incorporan en las formulaciones dependientes de la profundidad y en las adimensionales se comprueba su funcionamiento.

2.2.2. Cálculo del transporte

El transporte de arena se define como el transporte de partículas con tamaños en el rango de 0,05 a 2 mm como se encuentra en el lecho de ríos, estuarios y aguas costeras (Van Rijn, 2013).

El cálculo de transporte de sedimentos en la costa es una tarea difícil debido a la complejidad de la hidrodinámica y la variedad de fenómenos. Los procesos de transporte de sedimentos son fuertemente afectados por las ondas de alta frecuencia que introducen movimientos oscilatorios sobre las partículas y actúan generalmente como agentes agitadores de sedimentos y son entonces transportados por la corriente media inducida. Además, influyen otros efectos tales como la variación del nivel medio, efectos de las ondas de rotura e influencia topográfica.

Por lo tanto, para la obtención de datos de transporte de sedimentos se utiliza la formulación de Soulsby (1997), la cual da resultado de transporte en cada punto, y se calcula también con la formulación del CERC (US Army Corps of Engineers, 1984) con el fin de realizar una comparación de los resultados obtenidos.

Formulación de Soulsby-Van Rijn

Los dos modos principales de transporte de arena son el transporte por fondo y el transporte en suspensión. El transporte por fondo se define como constituido por partículas de deslizamiento y rodadura en contacto con el lecho, está dominado por fuerzas de arrastre inducidas por el flujo y por fuerzas de gravedad que actúan sobre las partículas. El transporte en suspensión es el movimiento irregular de las partículas a través de la columna de agua inducida por las fuerzas de arrastre debidas a la turbulencia sobre las partículas. La información detallada es presentada por Van Rijn (1993)

La fórmula del transporte utilizada en este estudio evalúa el transporte de material no cohesivo tanto por fondo como el transporte en suspensión de forma conjunta a través del parámetro A_s .

El cálculo del transporte de sedimentos se ha realizado en base a las formulaciones proporcionadas por Soulsby (1997), expresiones analíticas experimentales aproximadas a las formulaciones para ola-corriente de Van Rijn (1993).

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{1/2} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4} \quad (12)$$

Donde:

q_t = caudal de sedimento en un punto ($m^3/s/m$).

$$q_t = (q_x, q_y) \quad (13)$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \quad (14)$$

$$A_{sb} = \frac{0.005h \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (15)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012hD_{50}D_*^{-0.6}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (16)$$

\bar{U} = velocidad promediada en vertical (\bar{u}, \bar{v}).

C_D =coeficiente de fricción debido a la corriente.

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{\ln \left(\frac{h}{z_0} - 1 \right)} \right]^{-2} \quad (17)$$

z_0 = rugosidad del fondo ($\cong 0.006m$).

κ = constante de Von Kármán ($\kappa=0.4$).

U_{rms} = velocidad orbital cuadrática-media.

$$U_{rms} = \sqrt{2} \frac{\pi H_{rms}}{T_p \sinh(kH)} \quad (18)$$

\bar{U}_{cr} = velocidad crítica de inicio de movimiento del lecho según Van Rijn

$$\bar{U}_{cr} = 0.19(D_{50})^{0.1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.1mm \leq D_{50} \leq 0.5mm \quad (19)$$

$$\bar{U}_{cr} = 8.5(D_{50})^{0.6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0.5mm \leq D_{50} \leq 2mm \quad (20)$$

Asumiendo la rugosidad efectiva como $K_s = 3 D_{90}$; $D_{90} = 2D_{50}$



h = profundidad (m).

D_{50} = diámetro medio del sedimento ($D_{50}=0.1\text{mm}$).

D_{90} = diámetro que es superado por un 10% en peso ($D_{90}=2\cdot D_{50}= 0.2\text{mm}$).

s = densidad relativa.

g = aceleración de la gravedad ($9.81 \text{ m}^2/\text{s}$).

ν = viscosidad cinemática del agua ($\nu = 2\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

$$D_* = \left(\frac{a\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} D_{50} \quad (21)$$

Con los siguientes datos obtenidos de las propagaciones se calcula el transporte en cada nodo de la malla.

- Datos de corrientes U y V (m/s).
- Altura de ola, H (m).
- Periodo, T (s).
- Profundidad, h (m).

Formulación del CERC

Con el fin de comprobar los valores obtenidos de transporte con la formulación aplicada se comparan los resultados con los valores procedentes de la formulación del CERC (US Army Corps of Engineers, 1984)

Este es el modelo más utilizado para estimar la tasa total de transporte de sedimentos a lo largo del litoral, está basado en la suposición de que la tasa total de transporte de sedimentos a lo largo del litoral es proporcional al flujo de energía a lo largo de la costa y se define del siguiente modo:

$$Q = K \left(\frac{\sqrt{gH_b}}{16\sqrt{2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) (1 - p)} \right) H_{rms}^2 \sin(2\alpha_b) \quad (22)$$

Donde:

- Q = tasa de transporte de sedimentos integrado en todo el perfil (m^3/s).
- K = coeficiente de calibración.
- g = gravedad ($9.81\text{m}^2/\text{s}$).
- H_b = altura de ola en rotura (m).
- ρ_s = densidad del sedimento ($2100 \text{ kg}/\text{m}^3$).
- ρ_w = densidad del agua ($1025\text{kg}/\text{m}^3$).



- p = factor de porosidad (0.4).
- $H_{rms} = \frac{H_b}{\sqrt{2}}$
- α_b = ángulo de incidencia del oleaje en rotura ($^\circ$).

El coeficiente K ha definido su valor en función de los diferentes autores utilizando diferentes estadísticos de alturas de ola, basándose en el flujo medio de oleaje etc.

En este estudio se utiliza el propuesto por (Valle, Medina, & Losada, 1993), en el cual existe una dependencia exponencial del K respecto al D_{50} con la relación:

$$K = 1.4 e^{-2.5 D_{50}} \quad (23)$$

Q depende directamente de la altura de ola elevada a la potencia 5/2 y el seno de dos veces el ángulo, lo que implica que el transporte tiene un máximo para 45° y decrece para ángulos mayores o menores que éste.

Los parámetros más importantes son la altura de ola y el ángulo del oleaje. Un error del 10% en la altura de ola de rotura provoca un error del 25% en la tasa de transporte. (Van Rijn, 2001)

Los parámetros en rotura a introducir en esta formulación para cada perfil se calculan buscando la posición donde el módulo de la corriente es máximo y con $D_{50} = 0.1\text{mm}$

2.3. Caracterización del bypass

Para la caracterización del bypass es necesario conocer la tasa de bypass, P_b , y la distribución del sedimento de bypass Q_e , lo que incluye la determinación de D_i y D_f .

Dado que las caracterizaciones de ambas necesitan datos diferentes y la distribución del sedimento de bypass, Q_e , es función de la tasa, se explica en primer lugar la caracterización de la tasa del bypass, P_b , y en segundo lugar la distribución, Q_e , con un apartado de preproceso de los datos en ambos casos.

2.3.1. Caracterización de la tasa de bypass

2.3.1.1. Preproceso

Una vez obtenidos los datos de transporte para ambas direcciones, q_x y q_y , en cada nodo, se representaron los mapas de transporte identificando la intensidad con colores y perfiles de velocidad con flechas y así poder conocer el flujo de sedimento debido al oleaje en cada caso (ver Figura 12, Figura 13 y Figura 14).

Con el fin de observar la magnitud de una forma simple se realiza la integración por perfiles de todo transporte, obteniendo así un vector con un valor para cada posición del eje x que define la línea de costa (ver Figura 9).

Este cálculo se realiza integrando todos los valores del perfil obteniendo Q_{total} .

2.3.1.2. Cálculo de la tasa de bypass

Uno de los objetivos específicos del documento consiste en la parametrización de la tasa del caudal de sedimento de bypass. Por lo tanto, es necesario el cálculo de este valor en cada caso de oleaje.

Se calcula la tasa de bypass de sedimento que cruza el dique como la media de los valores de Q_{aa} en m perfiles frente al morro del dique, entre la media de n perfiles aguas arriba del dique en los cuales el transporte es uniforme, es decir, donde no se encuentra afectado ni por la presencia del morro ni por los contornos, ver en la Figura 9.

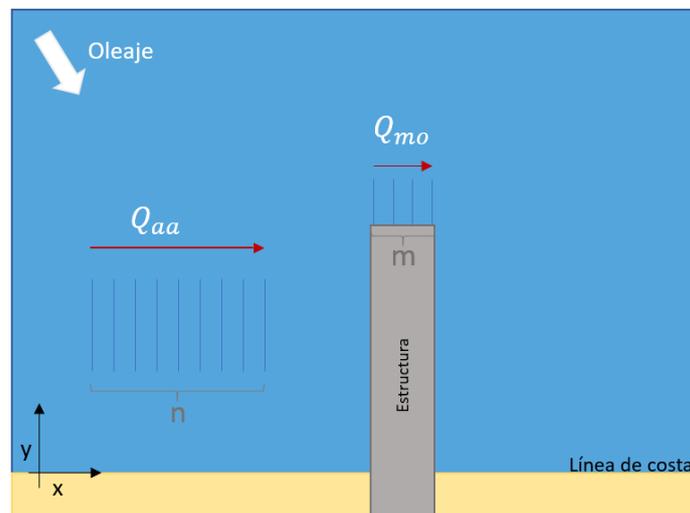


Figura 9: Definición de variables para el cálculo del bypass

$$P_b = \frac{\frac{\sum Q_{mo}}{m}}{\frac{\sum Q_{aa}}{n}} \cdot 100 \quad (24)$$

Donde:

- P_b = tasa de bypass (%).
- Q_{mo} = transporte de sedimentos integrado en cada uno de los perfiles frente al morro del dique (m^3/s)
- m = número de perfiles frente el dique.
- Q_{aa} = transporte de sedimentos integrado en cada uno de los perfiles de transporte uniforme aguas arriba de la estructura (m^3/s).
- n = número de perfiles con transporte uniforme.

Este valor será relacionado con las condiciones de oleaje de cada caso analizado para poder determinar cuándo se produce bypass y el orden de magnitud del mismo.

2.3.2. Caracterización de la distribución del sedimento de bypass

2.3.2.1. Preproceso

Con el fin de definir la distribución del sedimento únicamente procedente del bypass se analiza el transporte de sedimentos para tres distancias de perfiles diferentes.

Se calcula con el mismo procedimiento que en el apartado 2.3.1.1 para Q_{total} , integrando el perfil, se calculan $Q_{positivo}$, y $Q_{exterior}$ cambiando los límites de integración.

En primer lugar, se integran todos los valores del perfil para Q_{total} . En segundo lugar, se integran sólo los valores positivos de cada perfil, $Q_{positivo}$, para evitar que afecten las corrientes en sentido contrario que se producen a la sombra del dique ya que no forman parte del bypass. En tercer lugar, se calcula integrando los valores exteriores de la estructura, esto es, donde la profundidad es mayor al morro de la esta, $Q_{exterior}$. Se pueden identificar las tres variables en la Figura 10.

Dado que el objetivo es estudiar la distribución de la acumulación del sedimento, los vectores anteriores de transporte son transformados en vectores de acumulación-erosión. Para ello, se definen celdas entre dos perfiles como se muestra en la y el material que se deposita en esa celda es el resultado de la diferencia entre transporte que entra, Q_{in} , menos el que sale, Q_{out} , ver Figura 10.

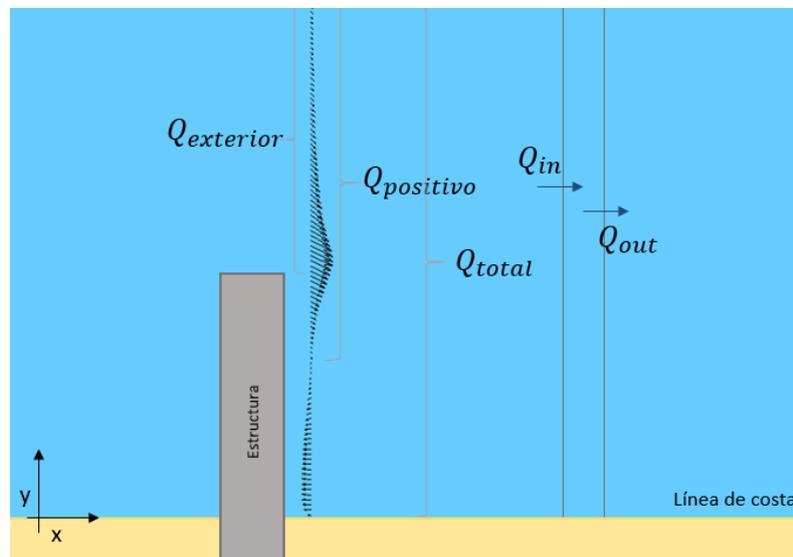


Figura 10: Definición de variables para cálculo de la distribución

Además, con el fin de normalizar la curva se realiza el cociente de este entre la tasa de bypass como se muestra:

$$Q_t = \frac{Q_{in}^{total} - Q_{out}^{total}}{P_b} \cdot 100 \quad (25)$$



$$Q_{pos} = \frac{Q_{in}^{positivo} - Q_{out}^{positivo}}{P_b} \cdot 100 \quad (26)$$

$$Q_{ex} = \frac{Q_{in}^{exterior} - Q_{out}^{exterior}}{P_b} \cdot 100 \quad (27)$$

Donde:

- Q_t = material que se deposita (con la integración de todo el perfil) (m^3/s).
- Q_{pos} = material que se deposita (con la integración de los valores positivos del perfil) (m^3/s).
- Q_{ex} = material que se deposita (con la integración de los valores del perfil exteriores al morro de la estructura) (m^3/s).
- Q_{in}^k = integración del transporte en el perfil que introduce sedimento a la celda, donde k representa exterior, positivo y total en función del caso (m^3/s).
- Q_{out}^k = integración del transporte en el perfil siguiente, evalúa el sedimento que se sigue transportando y por tanto sale de la celda, donde k representa exterior, positivo y total en función del caso (m^3/s).

Se representan conjuntamente con el propósito de determinar su idoneidad, tras este análisis se considera Q_{ex} como la óptima debido a que define claramente el comportamiento del material procedente del bypass eliminando el transporte que se genera en la costa. Por lo tanto, será la utilizada para definir distribución y por tanto también para las distancias inicial, D_i , y final, D_f .

2.3.2.2. Cálculo de la distancia de afección inicial

La curva de sedimentación del material procedente del bypass se observa aguas abajo de la estructura entre una distancia inicial, donde comienza, a una distancia final donde la corriente y el transporte se vuelven uniformes. Estas distancias son imprescindibles para conocer la zona de sedimentación y la distribución de la misma. Son medidas en dirección paralela a la costa desde el margen de la estructura situado aguas abajo como se muestra en la Figura 3.

Se ha calculado la distancia inicial, D_i , en la cual comienza la sedimentación, con un algoritmo que encuentra el último de los valores negativos anteriores al máximo, es decir, donde corta con el cero, ya que la distribución tiene forma asimétrica con cola asintótica como se verá en el apartado 2.3.2.4. En caso de que no existan valores negativos anteriores al máximo, medirá la distancia hasta el punto donde se produzca el mínimo. Este cálculo se realiza con los valores de Q_{ex} en cada caso de oleaje.



2.3.2.3. Cálculo de la distancia de afección final

Como se ha explicado, la distancia final de afección, D_f , es un parámetro necesario. Para calcularlo se creó un algoritmo en que encuentra el primer valor negativo después del máximo de la curva descrita de Q_{ex} , es decir, cuando corta con cero, el transporte se vuelve estable y no se erosiona ni acumula sedimento.

2.3.2.4. Cálculo de la distribución por celda

La curva de sedimentación es válida en el rango de coordenadas comprendido entre la distancia inicial y la final calculadas como se expuso en el apartado anterior.

Para poder parametrizar esta curva, lo primero que se debe cumplir es que la suma de todos sus valores resulte el 100%, ya que se supone que todo el sedimento procedente del bypass se acumula de esta forma. Para ello se estandariza del siguiente modo:

$$Q_e = \frac{Q_{ex}}{\sum_{i=D_{inicial}}^{D_{final}} Q_{ex}(i)} \cdot 100 \quad (28)$$

Donde:

- Q_e = sedimento real, del bypass, acumulado en cada celda estandarizados (%).

Una vez se obtienen los resultados del porcentaje de sedimento acumulado para cada una de las coordenadas entre los límites calculados, Q_e , y se representa, se observa la forma de la curva asimétrica y con cola asintótica.

Por lo que se ajusta una función con la siguiente forma:

$$Q_e^a = b_1 \cdot x \cdot e^{(-b_2 \cdot x^2)} \quad (29)$$

Donde:

- Q_e^a = sedimento ajustado, del bypass, acumulado en cada celda (%).
- x = posición (desde distancia inicial hasta distancia final) (m).
- b_1 y b_2 = coeficientes ajustados.

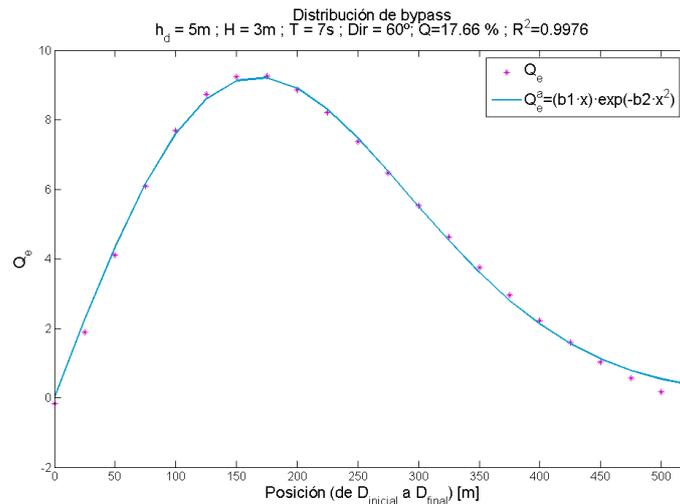


Figura 11: Ejemplo de ajuste de Q_e^o (función) a Q_e (datos)

Como en cada caso de oleaje la curva varía levemente en su forma, se ajusta esta curva para todos los casos de oleaje y en las diferentes profundidades en el morro de la estructura, a través del método de mínimos cuadrado. Este encuentra los valores de los parámetros a ajustar calculando la diferencia mínima entre el valor real y el valor del ajuste como se puede ver en la Figura 11.

Obteniendo así, un valor de b_1 y b_2 para cada caso de oleaje, por lo que se busca una relación entre estos parámetros y las características geométricas y dinámicas de cada caso como se explica en el apartado 2.4.

2.4. Parametrización del bypass

Conocidos los objetivos del estudio y las variables implicadas, las principales variables a relacionar son (ver Figura 3):

- P_b = tasa de bypass (%).
- D_f = distancia final que alcanza el sedimento procedente del bypass medido desde el último extremo del morro de la estructura (m).
- D_i = distancia inicial a la que el sedimento comienza a depositarse medido desde el último extremo del morro de la estructura (m).
- b_1 y b_2 = coeficientes de ajuste de la distribución del sedimento procedente del bypass que se acumula en cada celda.

Con las condiciones de oleaje y geométricas como son:

- H = altura de ola propagada (m).
- T = periodo (s).
- Dir = dirección del oleaje ($^\circ$).
- H_b = altura de ola en rotura (m).



- Dir_b = dirección del oleaje en rotura ($^\circ$).
- h_b = profundidad en rotura (m).
- h_d = profundidad en el morro del dique (m).

Dado que la altura de ola y la dirección de entrada se modificarán al propagar y serán dependientes de la batimetría, para poder aplicar las formulaciones a otros casos se utiliza la altura de ola en rotura, la dirección en rotura y la profundidad en rotura, el único parámetro que no cambia y se utiliza es periodo.

Para obtener los parámetros en rotura se busca el punto del perfil donde la velocidad de la corriente es máxima y se realiza la media de estos valores en los perfiles en los que el transporte sea uniforme aguas arriba de la estructura y no se encuentre afectado ni por el dique ni por los contornos. Son los mismos perfiles que los utilizados en el cálculo de Q_{aa} .

Además, con el fin de que las formulaciones sean adimensionales, la altura de ola y la profundidad en rotura se dividen entre la profundidad en el morro de la estructura en el caso de que no dependan de esta última profundidad.

Una vez obtenidos los parámetros de estudio, P_b , D_f , D_i , b_1 y b_2 , se representan frente a las variables del oleaje en rotura y así conocer la relación con cada parámetro realizando un ajuste a los datos a través de la aplicación Curve Fitting de Matlab obteniendo funciones de ajuste con la siguiente dependencia:

$$P_b = f\left(\frac{h_b}{h_d}\right) \tag{30}$$

$$b_1, b_2 = f(h_b, h_d) \tag{31}$$

$$D_i = f(h_d) \tag{32}$$

$$D_f = f(h_b, h_d) \tag{33}$$

Se ha identificado en cada caso por colores los periodos y las direcciones de oleaje para comprobar la dependencia con los demás parámetros de oleaje, pero no se ha presentado dicha relación.

Una vez realizado el ajuste para la primera h_d (sólo se dispone de $h_d = 2, 5$ y 10 m) se representa la función calculada sobre los datos para las otras profundidades. En el caso de que se ajuste a los valores, la función es válida y adimensional. En el caso de que no se ajuste, significa que existe una dependencia del parámetro h_d y en este caso las funciones no pueden ser adimensionales.

En todos los ajustes se calcula el coeficiente de determinación, R^2 , y el error cuadrático medio, RMSE, con el fin de definir la bondad del ajuste:



- Coeficiente de determinación: es un estadístico utilizado para determinar la calidad del modelo para replicar los resultados y se calcula como el cuadrado del coeficiente de correlación.

$$R^2 = \left(\frac{S_{xy}}{S_{xx}S_{yy}} \right)^2 \quad (34)$$

Donde S_{xx} y S_{yy} son las desviaciones estándar de la muestra y S_{xy} es la covarianza.

Los resultados de este coeficiente varían entre 0 y 1, cuanto mayor sea mayor es la predicción, si es igual a 1 la predicción no tiene error.

- RMSE (Root Mean Square Error): se trata de un estimador que mide la desviación estándar de los puntos de datos a la línea de regresión. Se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los errores cuadráticos. (Montgomery & George C. Runger, 2011)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_{función} - Y_{datos})^2}{n}} \quad (35)$$

Donde $Y_{función}$ es el valor de la variable resultante de aplicar la función, Y_{datos} los datos y n el número de valores.



3. Resultados

3.1. Transporte de sedimentos

3.1.1. Patrones de transporte de sedimentos

Se muestran a continuación tres ejemplos representativos de tres familias entre los cuales se pueden dividir todos los casos ejecutados: cuando la estructura no se interpone al flujo de transporte (Figura 12), cuando una parte del sedimento pasa libremente y otra parte vuelve debido a la presencia de la estructura (Figura 13) y un tercer caso en el que la estructura impide la continuidad del flujo de sedimento en su totalidad (Figura 14).

No todos los casos tienen la misma escala en el eje Y, la de la Figura 12 es diferente. En este caso la rotura del oleaje se produce más lejos de la costa y en los otros casos no existe transporte en estas profundidades, por lo que no se disponen de datos para representar.

El primero de los casos ejemplo se produce cuando la rotura del oleaje se encuentra a mayor profundidad que el morro del dique y lo suficientemente alejada para no verse afectada la zona de la corriente más intensa ya que es la moviliza el sedimento.

En el segundo caso ejemplo, se observa tanto en las magnitudes por colores como en los perfiles que una parte del transporte continua en el morro del dique y otra parte choca con él e impide el paso. Por otra parte, en la zona de abrigo del oleaje del dique se pueden observar como el transporte en la zona más cercana a la línea de costa se produce en sentido contrario.

En el tercero de los casos ejemplo, el transporte es totalmente interrumpido por la estructura, no hay transporte en el morro del dique y por tanto no se produce bypass.

Los casos que interesan en este estudio son los que se clasifican en la familia del segundo caso, donde existe bypass de sedimento. Dado que la variable P_b es la primera en calcularse, se impone el siguiente criterio para realizar el cálculo de las demás y el ajuste de la distribución:

$$5\% \leq P_b \leq 95\% \quad (36)$$

El rango teórico es entre 0 y 100% pero en los valores cercanos se produce más ruido en los contornos de la estructura, impidiendo el cálculo real de las variables de estudio. Por lo tanto, se eliminan los casos situados fuera del rango de la inecuación (36).

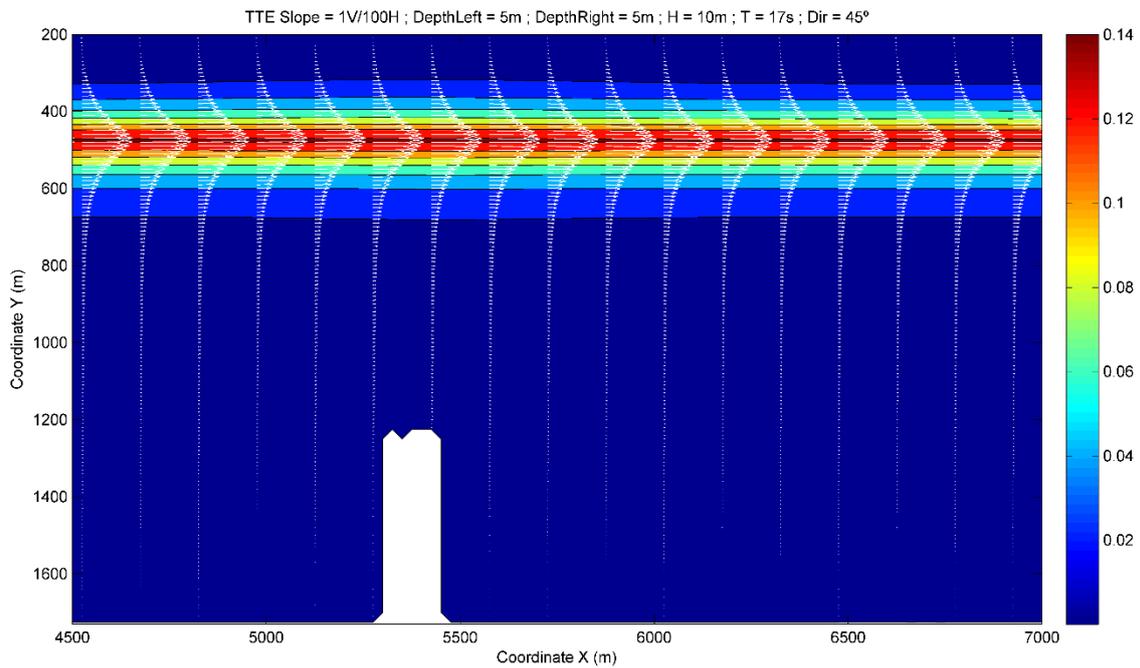


Figura 12: Ejemplo en el que la estructura no interrumpe el transporte litoral de sedimentos

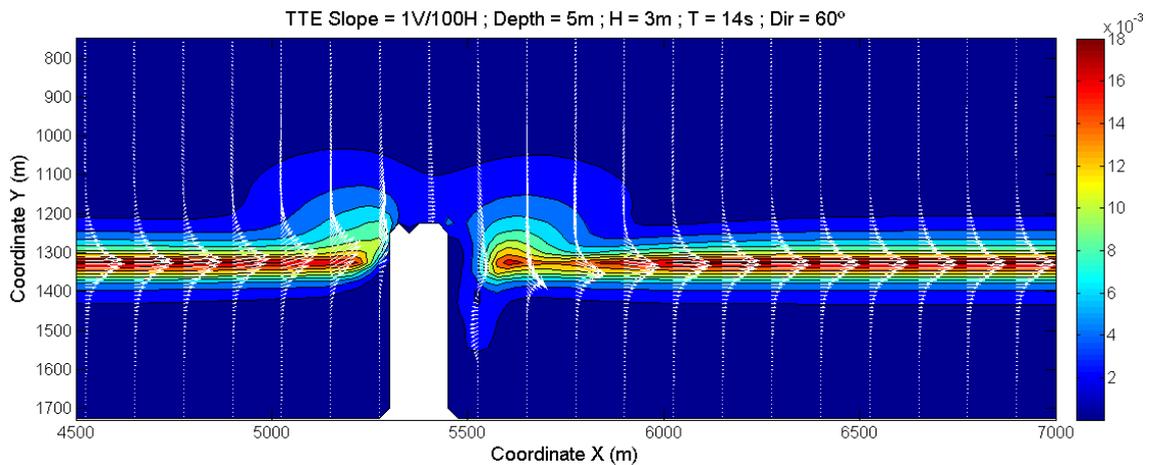


Figura 13: Ejemplo en el que la estructura interrumpe parcialmente el transporte litoral de sedimentos

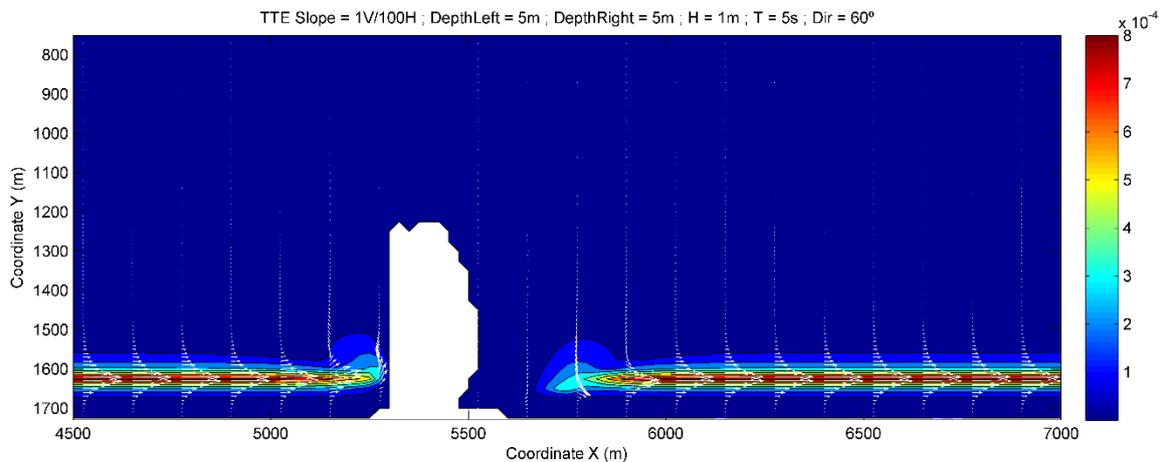


Figura 14: Ejemplo en el que la estructura interrumpe totalmente el transporte litoral de sedimentos

3.2. Caracterización de la distribución de bypass

Se calcula la acumulación de sedimento por celdas de los casos donde se produce bypass según se muestra en las ecuaciones (25), (26) y (27) de las que se obtiene Q_t , Q_{pos} y Q_{ex} y se representados en Figura 15.

El caso que se muestra es el mismo que se observa en los patrones de transporte en el que existe bypass (Figura 13), representando en la coordenada X desde la primera posición aguas arriba del dique hasta donde se observa que el material no se sedimenta ni erosiona y marcando con la línea discontinua el extremo aguas abajo del dique.

Cuando se alcanzan valores negativos significa que se produce erosión, mientras que los valores positivos son sedimentación. Ya que calcula la diferencia de lo que entra menos lo que sale de cada celda encerrada entre dos perfiles como se calcula en el dividendo de las ecuaciones (25), (26) y (27).

De este modo, se puede ver como para los vectores Q_t y Q_{pos} , con el perfil completo y con los valores positivos, se produce una erosión en la zona de sombra de la estructura. En cambio, para el cálculo con el caudal exterior al morro de la estructura, Q_{ex} , se observa que no existe erosión, únicamente el material se va sedimentando definiendo una curva, ya es únicamente el material procedente del bypass. Se puede observar la forma de esta curva claramente a pesar de que se producen efectos de contorno en el extremo del dique.

Por lo tanto, la variable que define esta curva simula la distribución del sedimento procedente del bypass y es la que se va a estudiar en los siguientes apartados. Las curvas de las demás variables, Q_t y Q_{pos} , se ven afectadas por el transporte litoral producido aguas abajo de la estructura, por lo que no resultan de utilidad para el análisis del bypass.

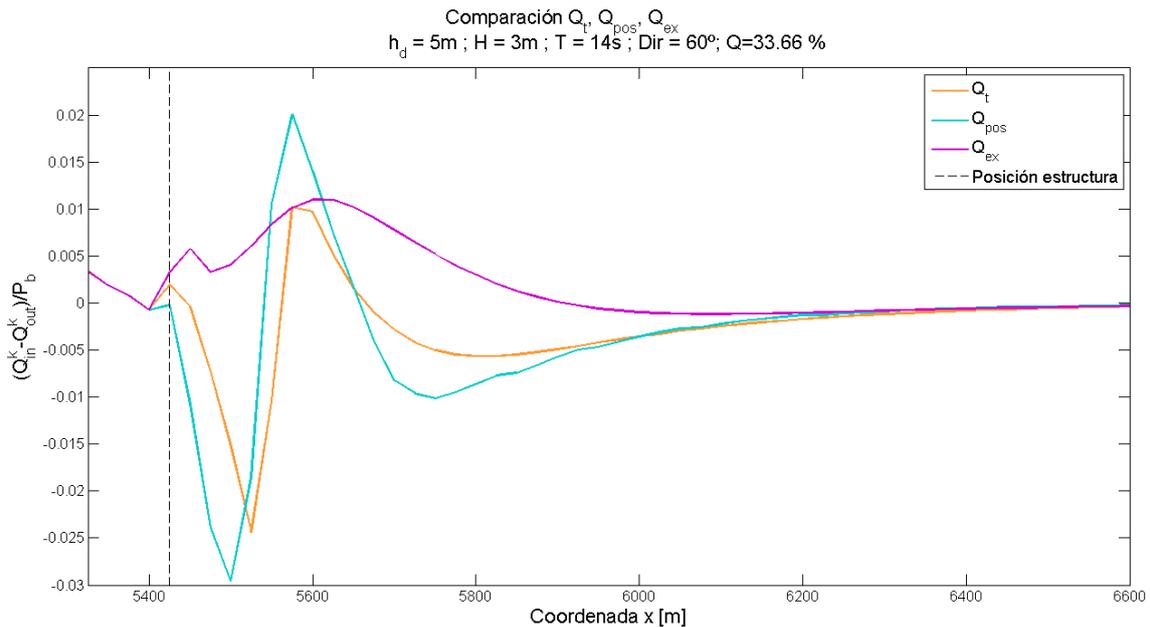


Figura 15: Comparación acumulación de sedimento por perfil con la integración del total, de valores positivos y valores exteriores a la estructura.

Comprobación con formulación del CERC

Como se describe en el apartado de metodología correspondiente, 2.2.2, se calcula el transporte con la fórmula del CERC para el oleaje en rotura, buscando el punto donde la corriente es máxima.

En la Figura 16 se muestra la representación conjunta del sedimento acumulado por perfil calculado con la formulación del CERC y la de Soulsby-Van Rijn.

Como se puede observar, son del mismo orden de magnitud y siguen la misma tendencia. En la zona de la estructura, definida entre el eje Y y la línea discontinua, los resultados para ambas formulaciones son cerca del cero, pasada la estructura se genera una zona de valores negativos, esto es de erosión. Se debe a que se utiliza la formulación de Soulsby (1997) con la suma de todo el perfil y la formulación del CERC, la cual integra todo el perfil. Como se vio en la gráfica anterior, sumando únicamente la parte del perfil exterior al bypass no se observa este fenómeno ya que se produce en la sombra de la estructura.

Tras esta zona de erosión se observa levemente la presencia de la curva de sedimentación del bypass para ambas formulaciones, tendiendo a cero cuando se sedimenta todo ese material.

A pesar de que los valores no coincidan, la forma general y orden de magnitud concuerdan y por tanto se considera un buen resultado.

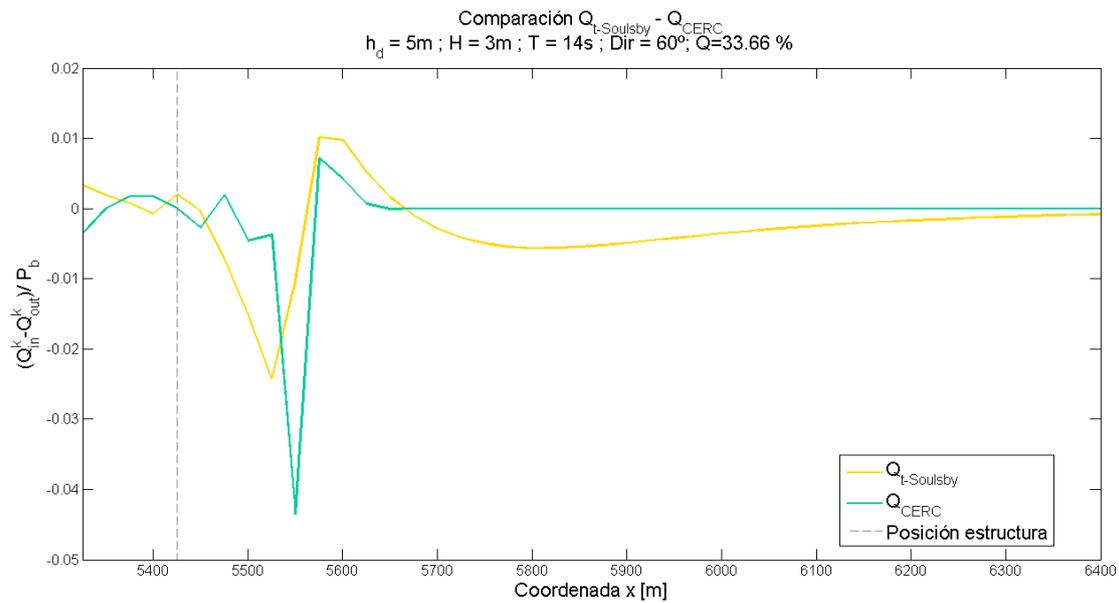


Figura 16: Comparación acumulación de sedimento por perfil con formulación de Soulsby y formulación del CERC

3.3. Parametrización del bypass

3.3.1. Tasa de sedimento de bypass

Con la representación del P_b frente a las variables h_b , H_b , T y dir_b se ha observado que presenta una clara relación con h_b y H_b mientras que no depende del periodo ni dirección. Dado que ambas variables se encuentran relacionadas y la dispersión de los puntos para h_b es menor, además de que se busca adimensionalizar la fórmula, se representó h_b/h_d frente a la tasa de bypass y se identificaron por colores los puntos con los mismos periodos y mismos rangos de direcciones en rotura. A la vista de que no había relación entre ellos, se elimina la posibilidad de dependencia de estas variables, quedando P_b dependiente únicamente del cociente h_b/h_d .

Con estos datos se obtiene la nube de puntos representada en la Figura 17 a la cual se busca la función de ajuste que resulta la ecuación (37):

$$P_b = 78.14 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^{3.282} \quad (37)$$

Donde:

- P_b = tasa de sedimento que se transporta en el bypass (%)
- h_b = profundidad en rotura (m)
- h_d = profundidad en el morro de la estructura (m)

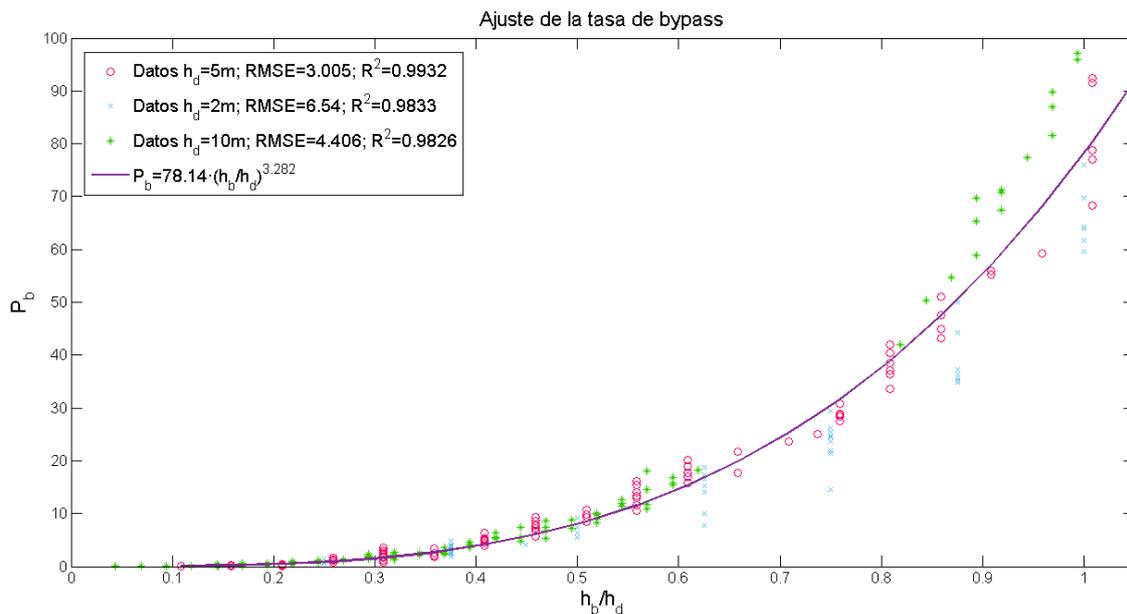


Figura 17: Ajuste del caudal de bypass

Se observa que para mayores valores de h_b/h_d la dispersión de los datos es mayor, lo que implica que para mayores P_b hay más incertidumbre. De todos modos, el valor del error cuadrático medio máximo es 6.54 y los coeficientes de determinación son mayores de 0.98 en todos los casos, lo que señala que la formulación propuesta predice con bastante exactitud la tasa de bypass.

3.3.2. Distancia inicial de afección

Con el fin de definir la distribución del sedimento del bypass calculado es necesario marcar una distancia inicial, donde comienza la sedimentación, y una distancia final, donde ya no existe erosión ni sedimentación.

Se representan a continuación los datos obtenidos de distancia inicial de los casos ejecutados para las profundidades en el morro de la estructura de $h_d=5$ y 10 metros diferenciadas por colores en la Figura 18.

Como se puede ver se trata de una nube de puntos escasa y muy dispersa, principalmente para los datos de $h_d=5$ m. Esto es debido a que, en el entorno de la estructura, a veces, se produce cierto ruido modifica el inicio de la curva de sedimentación y no es posible el cálculo de esta distancia. Por lo tanto, no se puede encontrar un ajuste válido para este parámetro.

Por el momento, se puede usar la media de los valores obtenidos que resulta 100 metros calculada para la totalidad de los datos, 76 metros para los datos de $h_b=5$ m y 145 metros para los de $h_b=10$ m.

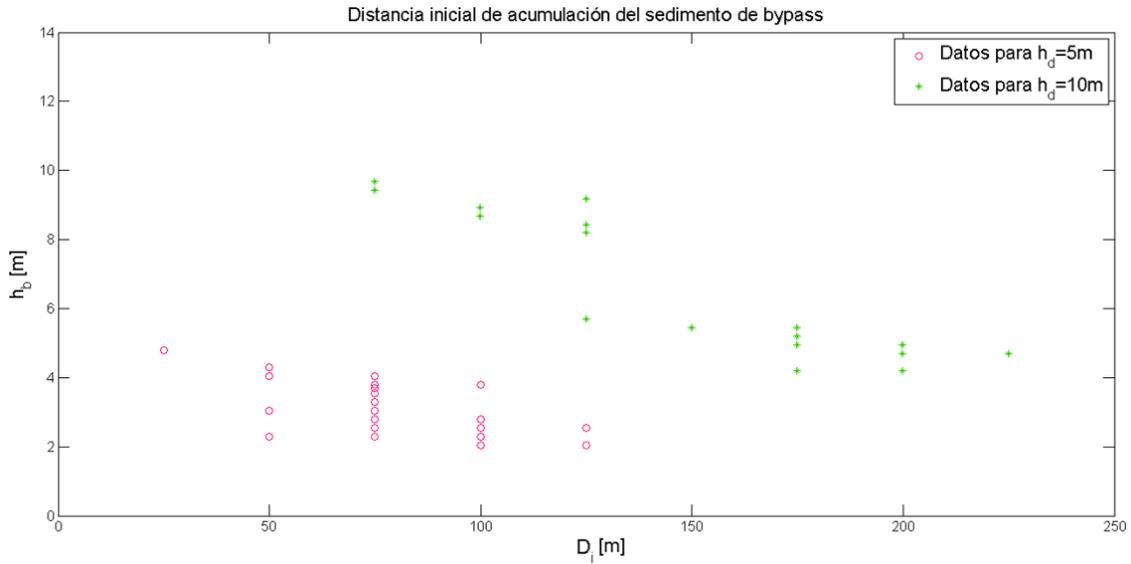


Figura 18: Datos de la distancia inicial de afección

La Figura 19 y la Figura 20 son ejemplos en los cuales no se pudo calcular la distancia inicial debido a los efectos generados en el dique que afectan al inicio de la curva a estudiar. En algunos casos la curva nunca corta con el cero y aunque alcanza un mínimo, no se trata de un mínimo real ya que no se encuentra cerca del cero. Además, hay otros casos en los que se genera una curva doble en la que todavía es más difícil diferenciar la curva de interés.

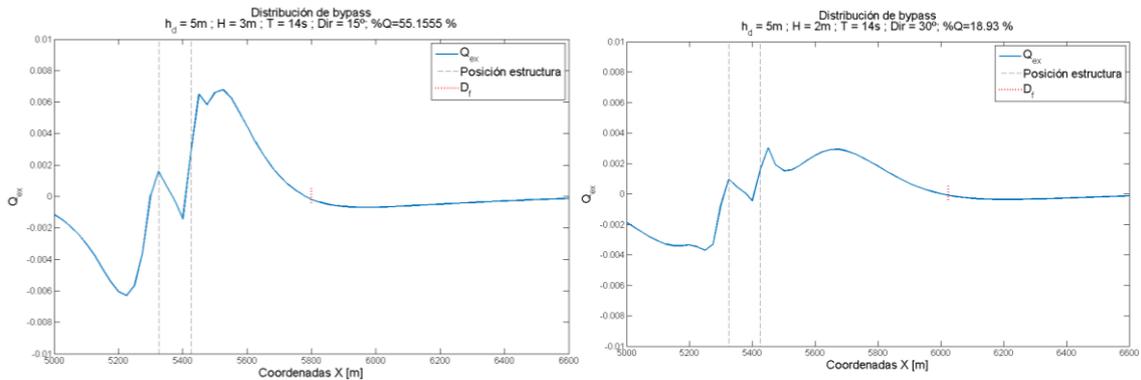


Figura 19: Distribuciones del bypass en algunos de los casos donde no se puede medir D_i

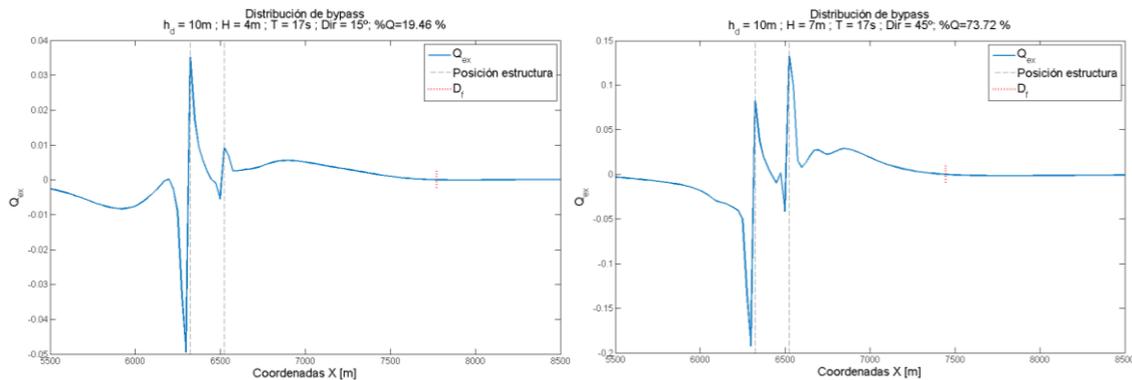


Figura 20: Distribuciones del bypass en algunos de los casos donde no se puede medir D_f

3.3.3. Distancia final de afección

El mismo procedimiento que se realizó para la formulación del P_b se utiliza con la distancia de afección final y observa que el periodo y la dirección no presentan ninguna relación con las distancias. Por lo tanto, se desarrolla la formulación de la distancia final de la sedimentación con la variable de profundidad en rotura, h_b . Además, como se ha observado variación de la pendiente de la recta y de la posición para las diferentes profundidades se ha introducido en la formulación el parámetro que define la profundidad en el morro de la estructura, h_d , planteando la hipótesis de que D_f varía linealmente con h_d . Se representa en la Figura 21 conjuntamente los datos para $h_d=5$ metros y $h_d=10$ metros con el ajuste realizado en cada caso.

La distancia final se obtendrá en todos los casos a través de la ecuación (38):

$$D_f = (-12.7h_d - 22.82)h_b + 297.7h_d - 677.2 \quad (38)$$

Donde:

- D_f = distancia que alcanza el sedimento procedente del bypass medido desde el último extremo del morro de la estructura (m).
- h_b = profundidad en rotura (m).
- h_d = profundidad en el morro del dique (m).

Para el caso de $h_d=5$ metros, los datos se correlacionan con los resultados de la función descrita con un coeficiente de determinación de 0.87 y un error cuadrático medio de 31 metros. Recordando que el espaciado de las mallas de propagación es de 25 metros, el error calculado sería de menos de dos celdas.

En el caso de profundidad a pie de estructura de 10 metros el error cuadrático medio obtenido son 45 metros, lo que serían casi dos celdas de la malla.

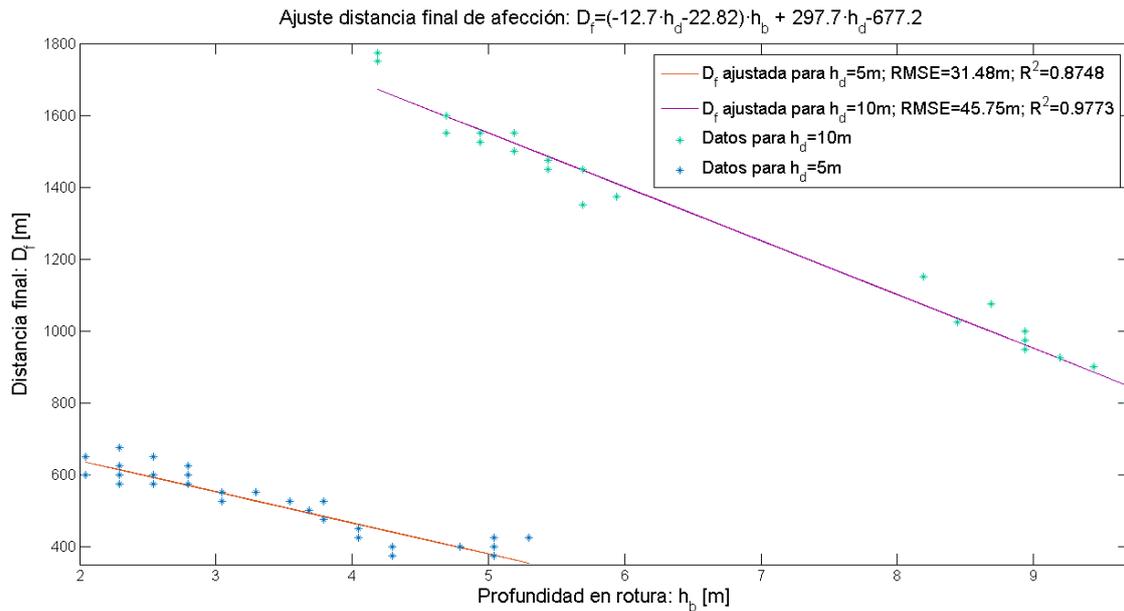


Figura 21: Ajuste distancia de afección final del bypass

A la vista de la bondad del ajuste obtenido se observa que el error medio es de menos de dos celdas de la malla en ambos casos de estudio.

A pesar de esto, esta formulación tiene ciertas limitaciones ya que sólo se dispone de dos profundidades. Por lo tanto, los parámetros (en función de h_d) de la recta que define la distancia final se ajustan a una recta ya que se sólo se define con dos datos. Sería necesario comprobar este ajuste con casos ejecutados para otras profundidades de la estructura.

3.3.4. Parámetros b_1 y b_2 de la formulación de la distribución

De la distribución de sedimento del bypass de la ecuación (28) ajustada a la formulación propuesta, ecuación (29), se obtienen los parámetros b_1 y b_2 para cada caso. Siguiendo la metodología descrita, la misma que para los parámetros anteriores ajustados, se observa una clara dependencia de la variable profundidad en rotura, h_b , y como sólo se dispone de dos h_d se hace la hipótesis de dependencia lineal para esta variable (ver Figura 22 y Figura 23).

De este modo, realizando el ajuste a una función exponencial y calculando los parámetros en función de la profundidad en el morro de la estructura, h_d , se obtienen las siguientes formulaciones para los parámetros b_1 y b_2 :

$$b_1 = (-0.005934h_d + 0.06005) \exp[(0.02286h_d - 0.3119)h_b] \quad (39)$$

$$b_2 = (-0.00001525h_d + 0.00001588) \exp[(0.00906h_d - 0.3028)h_b] \quad (40)$$

Donde:

- h_d = profundidad en el morro de la estructura (m).

- h_b = profundidad de rotura (m).

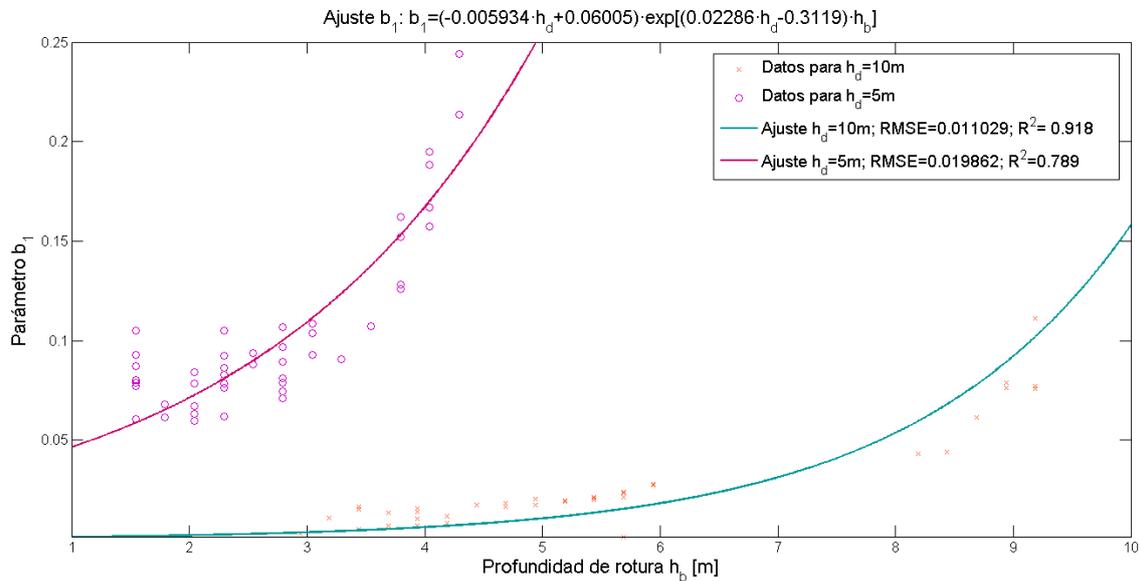


Figura 22: Ajuste parámetro b_1

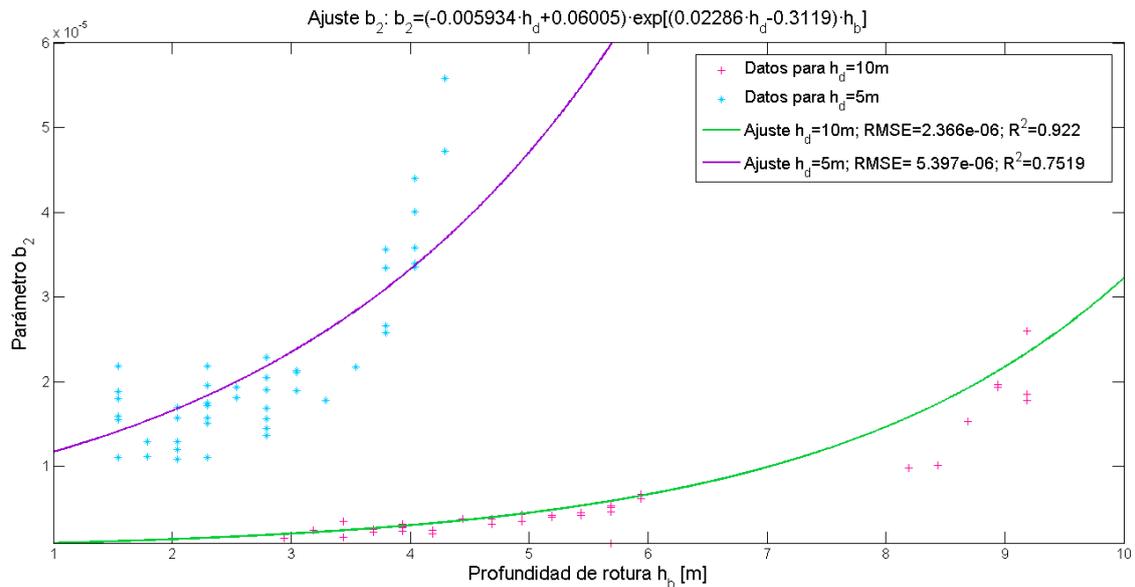


Figura 23: Ajuste del parámetro b_2

Los ajustes realizados a una función exponencial de primer grado se consideran adecuados ya que los coeficientes de determinación son como mínimo 0.75.

En ambos coeficientes b_1 y b_2 el ajuste es mejor para el para la profundidad $h_d = 10$ metros ya que el error mínimo cuadrático es menor y el coeficiente de determinación mayor en comparación con $h_d = 5$ metros a pesar de que con la observación de los gráficos se puede suponer mejor ajuste para $h_d = 5$ metros.



4. Conclusiones y futuras líneas de investigación

4.1. Conclusiones

Tras realizar el estudio del fenómeno de bypass alrededor de estructuras y determinar formulaciones empíricas para parametrizar la tasa de bypass, la distancia de afección y la distribución del sedimento procedente del bypass se puede concluir lo siguiente.

- Se ha parametrizado la **tasa de bypass, P_b** , en función del cociente entre profundidad en rotura y profundidad en el morro de la estructura obteniendo la relación (37) con una correlación alta.
- Se propone emplear la media de los valores obtenidos para cada profundidad en el morro de la estructura por falta de datos para la obtención de la **distancia inicial, D_i** , de sedimentación del material procedente del bypass.
- Se ha obtenido la parametrización de la **distancia final, D_f** , de afección del sedimento y se ajusta a la recta (38) con sus dos coeficientes función de la profundidad en el morro de la estructura, h_d , y muestra que la correlación es alta.
- Se ha ajustado la **distribución del bypass, Q_e** , de sedimentos a la función (29) con dos parámetros independientes función de la profundidad de rotura y profundidad en el morro de la estructura, ecuaciones (39) y (40). Del cálculo de los estadísticos de ajuste se obtiene que los errores son bajos y la correlación alta.
- La tasa y distribución del bypass son independientes de la dirección y el periodo del oleaje.

Las formulaciones empíricas que se han determinado podrán ser implementadas en el modelo CHRONOS, permitiendo determinar la cantidad de sedimento de bypass y su distribución en la costa aguas abajo de la estructura a partir de la profundidad en rotura del oleaje y la profundidad en el morro de la estructura.

4.2. Futuras líneas de investigación

En primer lugar, podría introducirse una dependencia de h_d en la formulación de P_b con el fin de perfeccionar el ajuste propuesto ya que en la Figura 17 se puede apreciar una leve variación entre los datos para las diferentes profundidades h_d . Para $h_d=2m$ los datos se encuentran infravalorados y para $h_d=10m$ los datos se encuentran sobrevalorados, el mejor ajuste es para la profundidad intermedia, $h_d=5m$.

En segundo lugar, se podría parametrizar la distancia inicial disponiendo de más datos. Como se explica en el apartado 3.3.2 los datos de la distancia inicial de sedimentación son insuficientes para realizar un ajuste ya que en muchos de los casos se encuentra afectada por efectos generados en la estructura.



Finalmente, es interesante realizar un ajuste en los dos términos de las rectas (38), (39) y (40) con más datos de otras h_d , con el fin de comprobar los ajustes realizados ya que se ha realizado un ajuste lineal con $h_d=5m$ y $h_d=10m$ podrían no ser suficientes.

En términos generales, se considera la necesidad de generar otras geometrías con el fin de ampliar la base de datos disponible. Por ejemplo: otras pendientes de playa, otras profundidades a pie de dique, diferentes profundidades a ambos lados de la estructura y diferente ancho de dique.



Bibliografía

- Cange, V. (2017). *Application of a morphodynamic evolution model (IH-MOEC) for beaches in theoretical and real litoral cases.*
- DHI. (2016). LITLINE User Guide.
- Frey, A., Connell, K., Hanson, H., Larson, M., Thomas, R., Munger, S., & Zunde, A. (2012). GenCade version 1 model theory and user's guide.
- GIOC. (2017). *Apuntes de Máster en Ingeniería Costera y Portuaria. Introducción fundamentos de ingeniería de costas.*
- González, M., Medina, R., Gonzalez-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., & García, E. (2007). An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers and Geosciences*, 33(7), 916–931. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.005>
- Hans Hanson, N. C. K. (1989). GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. *Coastal Engineering Research Center Vicksburg Ms.* Vicksburg, Mississippi, USA: Department of the army.
- IHCantabria. (2017). *Apuntes Máster Ingeniería Costera y Portuaria. La forma en planta de las playas.*
- Kristensen, S., Dronen, N., Deigaard, R., & Elfrink, B. (2017). *Bypass in groyne fields: Case study along the Lobito spit.*
- Larson, M., Kraus, N. C., & Conell, K. (2006). Cascade Version 1 : Theory and Model Formulation, (June).
- Montgomery, D. C., & George C. Runger. (2011). *Applied Statistics and Probability for Engineers, Fifth Edition.* Arizona: John Wiley & Sons, Inc. Retrieved from www.wiley.com/college/montgomery%5CnEngineering
- Ruiz, L., Gonzalez, M., & Medina, R. (2016). *Modelo de Evolución Morfodinámica de Zonas Costeras en Escalas de Medio a Largo Plazo.* Universidad de Cantabria.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands Richard Soulsby HR Wallingford 1997.* London: Thomas Telford.
- US Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual.* (Waterways Experiment Station, Ed.) (Vol. I). Vicksburg, Mississippi, Ms, USA.
- Valle, R., Medina, R., & Losada, M. A. (1993). Dependence of Coefficient. *Journal of Waterwy, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(5).
- Van Rijn, L. C. (1993). *Simple general formula for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters.*
- Van Rijn, L. C. (2001). *Longshore sediment transport* (Delft Hydr).
- Van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867–887. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2011.05.004>



Van Rijn, L. C. (2013). *Design of hard coastal structures against erosion*.



Anejo 1. Casos de oleaje.

H	T	Dir
0.5	5	N5W N15W N30W N45W N60W
	7	N5W N15W N30W N45W N60W
	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
1	5	N5W N15W N30W N45W N60W
	7	N5W N15W N30W N45W N60W
	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
1.5	5	N5W N15W



		N30W N45W N60W
	7	N5W N15W N30W N45W N60W
	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
2	5	N5W N15W N30W N45W N60W
	7	N5W N15W N30W N45W N60W
	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
	14	N5W N15W N30W N45W N60W
3	7	N5W



		N15W N30W N45W N60W
	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
	14	N5W N15W N30W N45W N60W
4	9	N5W N15W N30W N45W N60W
	11	N5W N15W N30W N45W N60W
	14	N5W N15W N30W N45W N60W
	17	N5W N15W N30W N45W N60W
7	11	N5W N15W N30W N45W N60W



	14	N5W N15W N30W N45W N60W
	17	N5W N15W N30W N45W N60W
10	14	N5W N15W N30W N45W N60W
	17	N5W N15W N30W N45W N60W