



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y
SEDIMENTOLÓGICOS EN BYPASS DE
ARENA EN PLAYAS CON ESTRUCTURAS**

Trabajo realizado por:

Gustavo Adolfo Hernández Cortés

Dirigido:

Dr. Ernesto Mauricio González Rodríguez

MSc. Erica Pellón de Pablo

Titulación:

**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, octubre de 2019

TRABAJO FINAL DE MASTER



Contenido

Resumen	5
Abstract	9
1. Introducción	13
1.1. Motivación del estudio	13
1.2. Estado del arte	16
1.2.1. Modelos one-line.....	16
1.2.2. Modelos actuales y cómo resuelven el bypass de sedimento	17
1.2.3. Conclusiones del estado del arte.....	20
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo General.....	21
1.3.2. Objetivos Específicos	21
1.4. Organización del documento.....	22
2. Metodología	23
2.1. Datos de Partida.....	24
2.1.1. Datos de geometrías.....	24
2.1.2. Datos de Oleaje	28
2.2. Modelado Numérico	29
2.2.1. Mallas de modelado	29
2.2.2. Oleaje y corrientes tras la propagación.....	29
2.2.3. Cálculo del transporte	32
2.3. Caracterización del bypass.....	34
2.3.1. Caracterización de la tasa de bypass.....	34
2.3.2. Caracterización de la distribución del sedimento de bypass	36
2.4. Parametrización del bypass	39
3. Resultados y Análisis	41
3.1. Parametrización del bypass	41
3.1.1. Tasa de sedimento de bypas	41
3.1.2. Distancia inicial de afección.....	49
3.1.3. Distancia final de afección	51
3.1.4. Parámetros b1 y b2 de la formulación de la distribución	59



4. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	64
4.1. Conclusiones	64
4.2. Futuras líneas de investigación.....	66
Bibliografía.....	67
Anejo 1. Casos de oleaje.....	69

Índice de figuras

Figura 1: Estructuras de estabilización de playas en Cartagena Colombia.	14
Figura 2: Ejemplo de estructura costera artificial con ancho considerable.	15
Figura 3: Diagrama para la definición de la ecuación de la conservación del sedimento	17
Figura 4: Esquema donde se especifica el parámetro geométrico B.	21
Figura 5: Definición de los parámetros que caracterizan el proceso de bypass en estructuras (Costas, 2017).....	22
Figura 6: Diagrama del flujo de trabajo.....	23
Figura 7: Batimetría $D_{50} = 0.1$ mm y $h_d = 10$ m.....	26
Figura 8: Batimetría $D_{50} = 0.1$ mm y $h_d = 10$ m.....	26
Figura 9: Batimetría $D_{50} = 0.3$ mm y $h_d = 3$ m.....	26
Figura 10: Batimetría $D_{50} = 0.1$ mm, $h_d = 5$ m y $b = 200$ m.	27
Figura 11: Batimetría $D_{50} = 0.3$ mm, $h_d = 5$ m y $b = 200$ m.	27
Figura 12: Ejemplo de malla generadas en el modelo Mopla.	29
Figura 13: Ejemplo mapa de isoalturas de onda propagado con línea de costa.....	30
Figura 14: Ejemplo mapa de oleaje propagado con Mopla.....	30
Figura 15: Ejemplo mapa de corrientes con Perfil de Dean $D_{50} = 0.1$ mm.	31
Figura 16: Ejemplo mapa de corrientes con Perfil de Dean $D_{50} = 0.1$ mm, en Mopla.	31
Figura 17: Definición de variables para el cálculo del bypass (Costas, 2017)	35
Figura 18: Definición de variables para cálculo de la distribución (Costas, 2017)	36
Figura 19: Ejemplo de ajuste de Q_e^a (función) a Q_e (datos)	38
Figura 20: Comparación entre datos actuales y la Curva de ajuste de Costas en 2017. 42	
Figura 21: Curva de ajuste de P_b para Perfil 1 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.1$ mm).....	43
Figura 22: Curva de ajuste de P_b para Perfil 2 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.2$ mm).....	44
Figura 23: Curva de ajuste de P_b para Perfil 3 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.3$ mm).....	44
Figura 24: Curva de ajuste de P_b para Perfil 4 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.5$ mm).....	45
Figura 25: Curva de ajuste de P_b para Perfil 5 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 1$ mm).....	45
Figura 26: Ajuste de P_b para todas las geometrías.....	46
Figura 27: Comparación de la Tasa de sedimentos a través del bypass para diferentes anchos de estructura.	47
Figura 28: Comparación de la Tasa de sedimentos a través del bypass para diferentes Diámetros de partícula	48
Figura 29: Variación de P_b con respecto al diámetro de la partícula para un estado de mar determinado.....	48
Figura 30: Ajuste de la Distancia media de afección inicial.....	50



Figura 31: Comparación resultados actuales con la línea de ajuste de Costas (2017). .	52
Figura 32: Distancia Final de afección de bypass para $h_d = 5$ m y $D_{50}=0.1$ mm.....	53
Figura 33: Distancia Final de afección de bypass para $h_d = 5$ m para todos los perfiles.	54
Figura 34: Distancia Final de afección del bypass incluida la influencia de la pendiente media del perfil.....	55
Figura 35: Valores de D_f para las diferentes profundidades de morro (h_d).	55
Figura 36: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=10$ m.....	56
Figura 37: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=5$ m.....	57
Figura 38: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=3$ m.....	57
Figura 39: Variación de D_f para estructuras de diferente ancho en el perfil 1.	58
Figura 40: Variación de D_f respecto al diámetro medio de la partícula en el perfil 1....	58
Figura 41: Valores de b_1 obtenidos para las diferentes profundidades de morro (h_d)..	59
Figura 42: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 5 m.	60
Figura 43: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 3 m.	61
Figura 44: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 10 m.	61
Figura 45: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 10 m.....	62
Figura 46: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 5 m.	63
Figura 47: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 3m.....	63



Resumen

Título: Análisis de la influencia de parámetros geométricos y sedimentológicos en bypass de arenas en playas con estructuras.

Autor: Gustavo A. Hernández Cortés.

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

Convocatoria: octubre 2019.

Palabras clave: bypass, estructuras, playas, transporte de sedimentos, modelos

La construcción de estructuras en el litoral, trae consigo una modificación en sistema sedimentario y en la morfología de las playas, 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).

Consciente de esta situación, IHCantabria ha venido 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, para lo cual, Costas (2017) desarrolló a manera de Trabajo Final de Master, unas expresiones matemáticas que permitían estimar la Tasa de sedimentos y manera como se distribuía espacialmente éste aguas abajo de la estructura.

Si bien estas expresiones obtenidas por Costas (2017), se constituyeron en un primer paso en la búsqueda de caracterizar numéricamente el fenómeno de bypass de arena, resultan no concluyentes ya que solo se analizaron 2 geometrías, correspondiente a playas con pendiente de lecho 1:100 y con estructuras con profundidad de morro de 5 m y 10 m.

Este estudio tiene como objetivo principal, analizar un mayor número de geometrías de playas, que incluyan parámetros geométricos y sedimentológicos, como los son la pendiente del lecho, el ancho de la estructura y el diámetro de la partícula. Esto con el fin de establecer si el comportamiento del bypass de arena guarda relación con estas variables.

Estas nuevas variables fueron seleccionados para ser tenidas en cuenta en el análisis, teniendo en cuenta la naturaleza del fenómeno del bypass. La pendiente del lecho, según Goda (1975), tiene influencia sobre la profundidad a la que rompe el oleaje en una playa, el diámetro de la partícula determina la forma del perfil de la playa según Dean (1977) y ancho de la estructura puede alguna manera influir en el comportamiento del bypass.

Con la intención de alcanzar los objetivos trazado en el estudio, se adoptó la metodología mostrada en Ilustración 1.

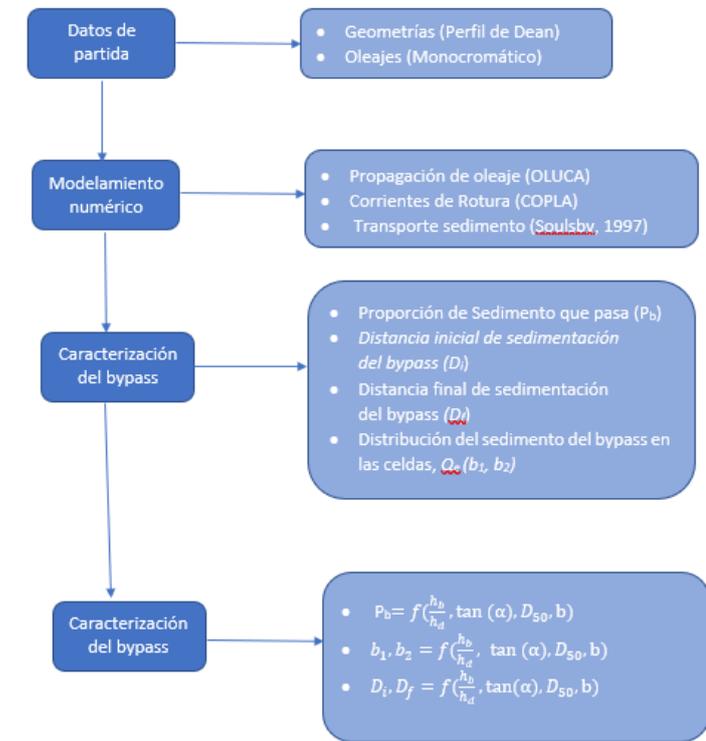


Ilustración 1: Metodología seguida en el estudio.

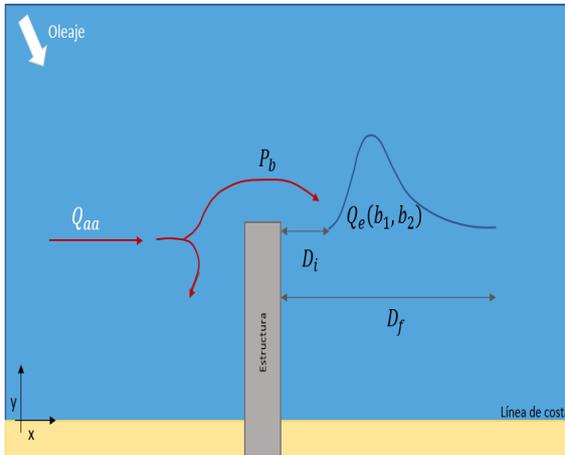
Se emplearon en el estudio un total de 20 geometrías, correspondientes playas con batimetrías correspondientes a 5 perfiles de Dean para diámetros medios de 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.5 mm y 1 mm. Cada una de estas playas fueron dispuestas de estructuras transversales tipo espigón de 50 m de ancho y con profundidades en el morro de 10 m, 5 m y 3 m, llegando así a 15 geometrías. Finalmente se incluyeron 5 geometrías más, correspondientes a las mismas geometrías con estructuras con profundidad de morro de 5 m, pero ahora con ancho de estructura de 200 m.

En cuanto al oleaje, se empleó el propuesto por Cange (2017), el cual 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. Estos oleajes fueron propagados a costa empleando el modelo OLUCA desarrollado por el IHCantabria.

Con los datos de altura de onda y corrientes en la zona de rotura, se cálculo el transporte de sedimento mediante las formulaciones de Soulsby (1997), la estimación de la profundidad de rotura se llevó a cabo empleado el criterio de Goda (1975) con la pendiente media del perfil de Dean hasta la profundidad del morro de la estructura.

Con los valores de capacidad de transporte de sedimento en cada una de las celdas del modelo, se procedió a caracterizar el fenómeno del bypass, mediante la estimación de

la tasa de sedimentos que pasa a través del bypass y la forma como este se distribuye aguas abajo de la estructura. Los modelos conceptuales y matemáticos empleados para tal efecto fueron los empleados por Costas (2017) y se presentan a continuación:



$$P_b = \frac{\frac{\sum Q_{mo}}{m}}{\frac{\sum Q_{aa}}{n}} \cdot 100$$

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

Ilustración 2: Modelo conceptual y matemático para la caracterización del bypass de arena. (Costas 2017)

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.

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

Las expresiones obtenidas como resultado de este estudio y las conclusiones del mismo se presentan a continuación:

- La **tasa de bypass, P_b** , solo guarda dependencia con el cociente entre profundidad en rotura y profundidad en el morro de la estructura. La ecuación obtenida se presenta a continuación:

$$P_b = 90 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^3$$

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)



- Se pudo obtener un ajuste exponencial de los valores medios de D_i y $\tan(\alpha)$, con una correlación de 0.87. La expresión obtenida se presenta a continuación:

$$D_i = 46.038(\tan \alpha)^{-0.354}$$

Donde,

D_i = Distancia promedio de Afección Inicial (m)

$\tan(\alpha) = \frac{h_d}{L}$ = Pendiente media del lecho (m/m)

- Se obtuvo la siguiente expresión para la estimación de la distancia final de afección de bypass, la cual presenta coeficiente de correlación superior a 0.78.

$$D_f \tan(\alpha) = -0.9h_b + 2h_d$$

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).

$\tan \alpha$ = Pendiente media (m/m)

- A continuación, se presentan las expresiones obtenidas para los parámetros b_1 y b_2 , que sirven de parámetros de ajuste a la curva de distribución del bypass.

$$\frac{b_1}{(\tan \alpha)^2} = \frac{(28000)}{h_d^2} \exp \left[5 \frac{h_b^{1.5}}{h_d^2} \right]$$

$$\frac{b_2}{(\tan \alpha)^2} = \frac{6}{h_d^2} \exp \left[\frac{1.2h_b^{2.3}}{h_d^2} \right]$$

Donde,

b_1 y b_2 = Variables de ajuste

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

h_b = profundidad de rotura (m).

$\tan(\alpha)$ = pendiente media del perfil batimétrico (m/m).

Es importante resaltar que si bien todas las expresiones matemáticas obtenidas durante este análisis, no incluyen directamente la variable D_{50} , estas sí guardan relación indirecta con dicha variable, toda vez que los perfiles de Dean empleados en las geometrías, dependen directamente del tamaño de la partícula. De igual manera, las pendientes medias de estos perfiles, fueron empleadas para estimar la profundidad de rotura según el criterio de Goda (1975).



Abstract

Title: Numerical analysis of the influence of geometric and sedimentological parameters in de sand bypass on Coastal structures.

Author: Gustavo Hernández Cortés.

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

Call: October of 2019

Key words: bypass, structures, beach, sediment transport, numerical models, bypass

The construction of structures on the coast, brings about a modification in sedimentary system and in the morphology of the beaches, in general, the presence of structures will lead to an advance of the upstream coast and the erosion of the coast line downstream of the structure (DHI, 2016).

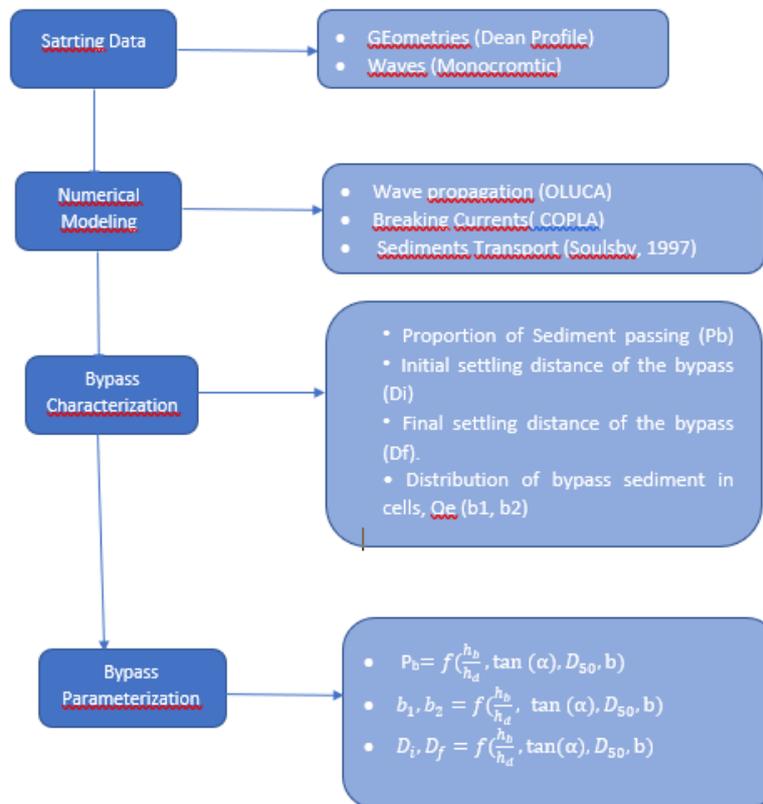
Aware of this situation, IHCantabria has been developing a numerical model of coastline evolution called CHRONOS. One of the main milestones of CHRONOS is the modeling of sediment bypass around structures, for which, Costas (2017) developed as a Master Final Work, some mathematical expressions that allowed to estimate the Sediment Rate and how it was distributed spatially this downstream of the structure.

Although these expressions obtained by Costas (2017), were a first step in the search to numerically characterize the phenomenon of sand bypass, they are inconclusive since only 2 geometries were analyzed, corresponding to beaches with slope of bed 1: 100 and with structures with a depth of 5 m and 10 m.

The main objective of this study is to analyze a greater number of beach geometries, which include geometric and sedimentological parameters, such as, the slope of the bed, the width of the structure and the diameter of the particle. This in order to establish whether the sand bypass behavior is related to these variables.

These new variables were selected to be taken into account in the analysis, taking into account the nature of the bypass phenomenon. The slope of the bed, according to Goda (1975), has influence on the depth at which the waves break on a beach, the diameter of the particle determines the shape of the profile of the beach according to Dean (1977) and the width of the structure can Somehow influence bypass behavior.

With the intention of achieving the objectives set in the study, the methodology shown in Illustration 1 was adopted.



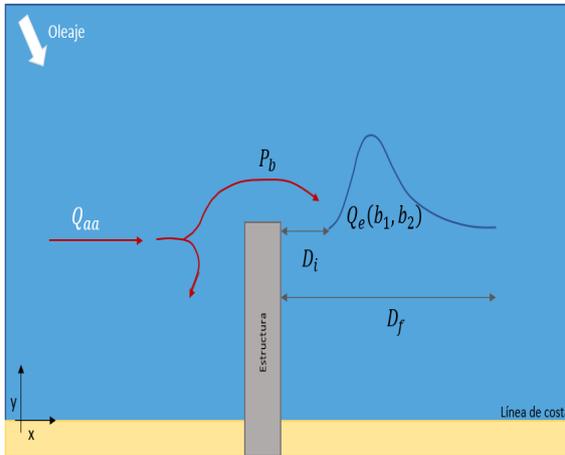
A total of 20 geometries were used in the study, corresponding beaches with bathymetries corresponding to 5 Dean profiles for mean diameters of 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.5 mm and 1 mm. Each of these beaches were disposed of 50 m wide breakwater transverse structures and with depths of 10 m, 5 m and 3 m in the breakwater head, thus reaching 15 geometries. Finally, 5 more geometries were included, corresponding to the same geometries with structures with a 5 m breakwater head depth, but now with a structure width of 200 m.

As for the waves, the one proposed by Cange (2017) was used, which collects the meeting tables of the Maruca viewer data for all the buoys of both the North and South Atlantic and the Mediterranean. With these data, he calculated the most common values for each zone until obtaining an average of the entire peninsula and which were subsequently simplified to have common periods at various wave heights. The table of final values is attached in Annex 1. These waves were propagated at the expense using the OLUCA model developed by the IHCantabria.

With the data of wave height and currents in the break zone, sediment transport was calculated using Soulsby's (1997) formulations, the estimation of the depth of breakage was carried out using the Goda criterion (1975) with the average slope of Dean's profile to the depth of the structure's head.

With the values of sediment transport capacity in each of the model cells, the bypass phenomenon was characterized by estimating the sediment rate that passes through

the bypass and how it is distributed downstream of the structure. The conceptual and mathematical models used for this purpose were those used by Costas (2017) and are presented below:



$$P_b = \frac{\sum Q_{mo}}{\frac{\sum Q_{aa}}{n}} \cdot 100$$

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

Where,

P_b = Bypass rate (%).

Q_{mo} = sediment transport integrated in each of the profiles in front of the dike's head (m³ / s)

m = number of profiles in front of the dike.

Q_{aa} = Sediment transport integrated in each of the uniform transport profiles upstream of the structure (m³ / s).

n = number of profiles with uniform transport.

Q_e = real sediment, bypass, accumulated in each standardized cell (%).

The expressions obtained as a result of this study and its conclusions are presented below:

- The bypass rate, P_b , only depends on the ratio between depth at break and depth at the head of the structure. The obtained equation is presented below:

$$P_b = 90 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^3$$

Where,

P_b = sediment rate that is transported in the bypass (%).

h_b = depth at break (m).

h_d = depth in the head of the structure (m)



- An exponential adjustment of the mean values of D_i and $Tan(\alpha)$ could be obtained, with a correlation of 0.87. The expression obtained is presented below:

$$D_i = 46.038(\tan \alpha)^{-0.354}$$

Where,

D_i = Average distance of Initial Condition (m).

$Tan(\alpha) = \frac{h_d}{L}$ = Average slope of the bed (m / m).

- The following expression was obtained for the estimation of the final distance of bypass condition, which has a correlation coefficient greater than 0.78.

$$D_f \tan(\alpha) = -0.9h_b + 2h_d$$

Where,

D_f = distance that the sediment from the bypass measured from the last end of the structure head (m) reaches.

h_b = depth at break (m).

h_d = depth at the head of the dike (m).

$\tan \alpha$ = average slope of the bathymetric profile (m / m).

- The expressions obtained for parameters b_1 and b_2 , which serve as adjustment parameters to the bypass distribution curve, are presented below.

$$\frac{b_1}{(\tan \alpha)^2} = \frac{(28000)}{h_d^2} \exp \left[5 \frac{h_b^{1.5}}{h_d^2} \right]$$

$$\frac{b_2}{(\tan \alpha)^2} = \frac{6}{h_d^2} \exp \left[\frac{1.2h_b^{2.3}}{h_d^2} \right]$$

Where.

b_1 y b_2 = Adjustment Parameters

h_d = depth in the head of the structure (m).

h_b = depth of breakage (m)

$Tan(\alpha)$ = average slope of the bathymetric profile (m / m).

It is important to highlight that although all the mathematical expressions obtained during this analysis do not directly include the D_{50} variable, these do have an indirect relationship with that variable, since the Dean profiles used in the geometries depend directly on the particle size. . Similarly, the average slopes of these profiles were used to estimate the depth of break according to the criteria of Goda (1975).



1. Introducción

1.1. Motivación del estudio

En la actualidad y ya desde de hace tiempos atrás, las playas constituyen estructuras naturales o artificiales que cumplen básicamente funciones de protección costera, uso lúdico y de albergue de fauna y flora. En general, las playas prestan de manera simultánea al menos 2 de estas funciones, las cuales se pueden ver afectadas por actuaciones que se ejecuten directa o indirecta sobre ésta.

En medio de este panorama, muchas ciudades y países del mundo tienen al turismo de sol y playa como un renglón importante de su economía, al mismo tiempo que viene en crecimiento la conciencia ambiental, que ha llevado a la declaratoria de zonas protegidas grandes extensiones de litoral, situación esta, que promueve la preservación de las condiciones naturales de las playas. A pesar de lo anterior, estas estructuras o ecosistemas costeros, presentan gran fragilidad y son altamente vulnerable a las actividades antrópicas y/o naturales.

Los cambios sufridos por las playas debido a condiciones naturales, se pueden clasificar como de largo, medio y corto plazo. Efectos como el ascenso del nivel del mar por efectos del cambio climático, no solo produciría que el mar ocupara zonas de playa seca actualmente, sino que, modificaría también los patrones de oleajes y corrientes en frente de playa, modificando la morfología de estas últimas. A mediano plazo, se destacan los cambios estacionales que sufren las playas, como podría ser el basculamiento de las mismas. Finalmente, a corto plazo, se destacan los procesos de erosión o acreción que sufren las playas durante temporales.

Por su parte, las actividades antrópicas que tienen efectos sobre la morfodinámica de las costas, se pueden clasificar en indirectas y directas. Las primeras corresponden a actuaciones en lugares relativamente lejanos a playa, pero que afecta la dinámica sedimentaria de esta última, por ejemplo, la construcción de presas hidráulicas, la canalización de cauces naturales y el cambio de cobertura natural de las cuencas. Las actividades directas, corresponden a la construcción de estructuras portuarias y de estructuras de estabilización de playas, tipo rompeolas, espolones, escolleras, etc.

En la actualidad, la erosión costera y la acreción, son los fenómenos que más impacta de manera negativa la funcionalidad de las playas a lo largo del mundo, de acuerdo con Van Rijn, 2011, en Europa la tasa de pérdida de área costera es del orden de los 15 Km²/año. Esta situación es en gran medida consecuencia de la construcción de presas hidráulicas y otras estructuras que han modificado el régimen de aporte de sedimento de las cuencas a las playas, generándose así un desequilibrio en el balance sedimentario de estas últimas. Este desequilibrio, detona un proceso en cadena de construcción de estructuras perpendiculares a la costa, que tienen como objetivo estabilizar la arena existente en las playas.

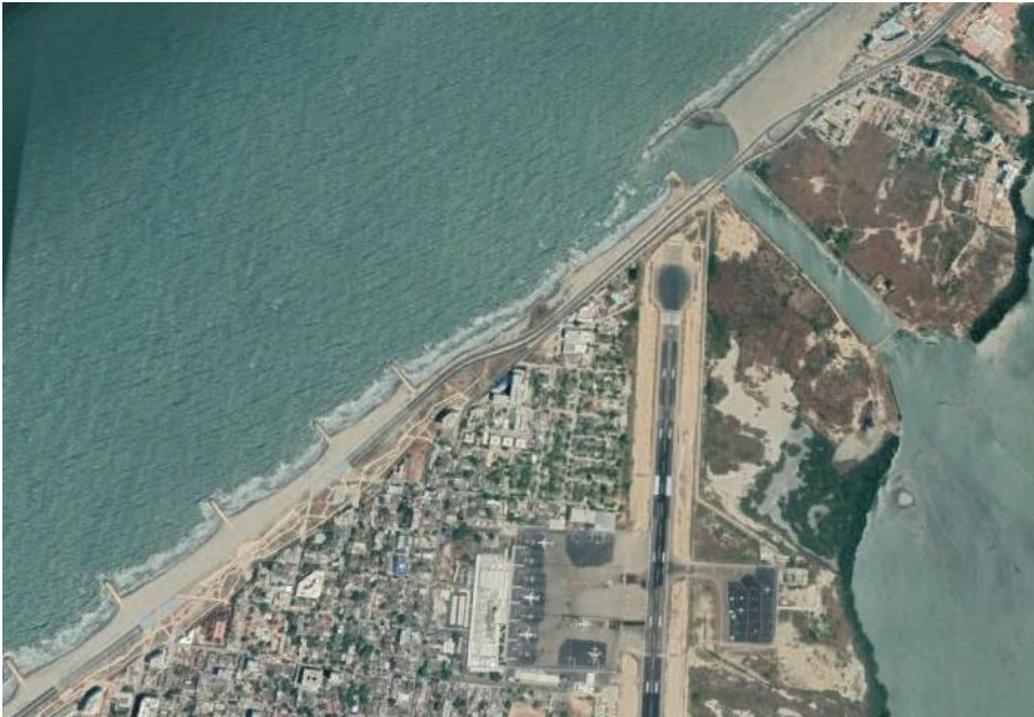


Figura 1: Estructuras de estabilización de playas en Cartagena Colombia.

Si bien estas estructuras perpendiculares a la costa pueden estabilizar un sector de una playa determinada, está comprobado que introducen una perturbación en el sistema sedimentario y consecuentemente en la morfología natural (Kristensen, Dronen, Deigaard, & Elfrink, 2017) (ver Figura 1). Estructuras como estas, de acuerdo con Hans Hanson en 1998, generan un bloque de las corrientes y los sedimentos hacia aguas abajo. Lo anterior, se traduce generalmente, en un proceso de acreción en el lado aguas arriba de la estructura y uno de erosión en el sector aguas abajo de la misma.

De acuerdo con todo lo anterior, la construcción de este tipo de estructuras en el litoral, traerá consigo una modificación en sistema sedimentario y en la morfología de las playas, situación de gran importancia, que debe ser tenido en cuenta al momento de diseñarlas y de evaluar sus impactos sobre el entorno. Por tanto, si se pretende adelantar una correcta gestión del litoral, es necesario entender el funcionamiento morfodinámico del sistema y contar con modelos numéricos que resuelvan los procesos.

Consciente de esta situación, IHCantabria ha venido 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, para cual se han desarrollado Trabajos de Master anteriores que tenían como objetivo final la obtención de 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.

En este sentido, durante el año 2017, la Ingeniera Raquel Costas adelantó una investigación a manera de trabajo final de master, consistente en obtener expresiones matemáticas que representaran de manera adecuado el fenómeno de bypass de arena a través de estructuras transversales a la línea de costa. En dicha investigación, solo se obtuvieron resultados satisfactorios para geometrías correspondientes un pendiente de playa de 1:100.

Debido al reducido número de análisis efectuados por Costas (2017), estos resultados no fueron concluyentes y se estableció la necesidad de profundizar en esa línea de investigación, mediante la inclusión de un mayor número de geometrías que pudieran ampliar el universo de aplicación de las ecuaciones.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo final de master se constituye en la continuidad de esa línea de investigación, buscando a que conlleve finalmente a la inclusión en CHRONOS de un modelo matemático que represente de manera adecuada el fenómeno de bypass, para lo cual, en esta oportunidad, se han incluido parámetros geométricos y sedimentológicos, como lo son diferentes pendientes de lecho, diferentes diámetros de la partícula y diferentes anchos de estructura.

Los nuevos parámetros incluidos, fueron seleccionados teniendo en cuenta la naturaleza del fenómeno de bypass. La inclusión del parámetro ancho de estructura (B), busca tener en cuenta que existen estructuras costeras naturales y artificiales, que presentan un ancho considerable (Ver Figura 2), por lo cual se busca establecer si esta variable geométrica tiene influencia en la tasa de bypass y en la distribución espacial del mismo.



Figura 2: Ejemplo de estructura costera artificial con ancho considerable.

Por su parte, los diferentes perfiles de playa y la variación del tamaño de la partícula, busca establecer si estas variables sedimentológicas afectan de manera significativa el comportamiento del bypass. La inclusión de diferentes perfiles de playas, responde también a la intención de tener en cuenta la variabilidad geométrica de los perfiles de



playa, aunados a la influencia que sobre estos perfiles tiene el tamaño de partícula. De esta manera, el perfil no solo se constituye como una variable geométrica, si no también como una sedimentológica.

1.2. Estado del arte

En términos de transporte de sedimento litoral, la modelación numérica de las corrientes en la franja correspondiente a la zona de rotura, es la que tiene mayor relevancia. Lo anterior debido, a que es en esta zona donde el oleaje presenta mayor interacción con el fondo, poniendo en suspensión el sedimento, haciéndolo susceptible a ser arrastrado por las corrientes que se generan en la rotura del oleaje. Este proceso, sencillo de describir en palabras, encierra una gran complejidad física y matemática, que hace difícil su representación matemática y numérica, razón por la cual es necesario imponer simplificaciones que permitan representar numéricamente de manera adecuada este fenómeno.

Las principales dificultades para la modelación de los procesos en la zona de rompiente, radican en la tridimensionalidad del sistema y en las diferentes escalas temporales en las que ocurren los diferentes procesos. En cuanto a la tridimensionalidad del problema, esta situación se ha manejado mediante el análisis aislados de la planta y el perfil de playa dada su independencia en el contexto de una determinada dinámica (IHCantabria, 2017). En lo que a la escala temporal se refiere, se han resuelto desarronllado modelos de corto plazo (escala horas-días), medio plazo (días-meses) y largo plazo (años).

Lo anterior implica la existencia de diferentes modelos para el análisis de las diferentes escalas temporales y espaciales de los procesos. El modelo CHRONOS se encuadra como un modelo one-line, este tipo de modelos será caracterizado de manera amplia en el apartado 1.2.1.

A continuación, se presentan los modelos que hasta la fecha incluyen metodologías de cálculo para predecir el comportamiento de línea de costa en el tiempo, algunos de ellos incluyen en sus rutinas modelos numéricos capaces de resolver el problema de bypass de arena a través de una estructura transversal a la línea de costa. Este este estado del arte fue extraído del documento desarrollado por Costas, 2017, es su trabajo de fin de master en la Universidad de Cantabria, y fue complementado, incluyendo la descripción del modelo CHRONOS de esta misma universidad y los resultados de la investigación de la misma Costas en el año 2017.

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 3), de la playa en la posición X (ver Figura 3) 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 3). 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).

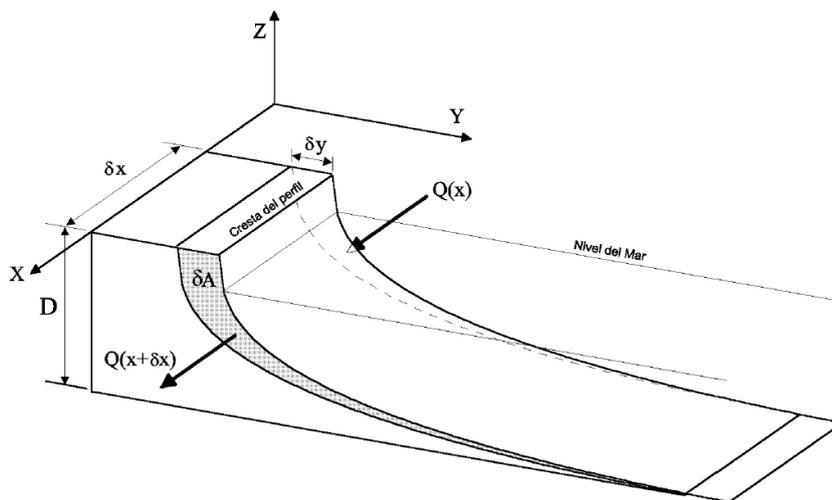


Figura 3: Diagrama para la definición de la ecuación de la conservación del sedimento

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 ($^\circ$).
- 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 $H_{1/10}$ y la altura de ola significativa y γ el índice de rotura. (Frey et al., 2012)

1.2.2.3. CHRONOS

IHCantabria está desarrollando un modelo numérico de evolución de línea de costa tipo one-line denominado cronos CHRONOS, para lo cual, ha establecido una línea de investigación enfocada en la obtención de expresiones matemáticas que permitan simular de manera adecuada el comportamiento del bypass de sedimentos a través de una estructura.

Dentro de la línea de investigación, Costas (2017) dio un primer paso que permitió obtener expresiones matemáticas para estimar el Caudal de sedimentos a través del bypass, y la manera como se distribuye espacialmente. A continuación, se presentan las ecuaciones correspondientes al porcentaje de caudal de sedimentos que pasa a través del bypass y la distancia final de afectación del mismo.

$$P_b = 78.14 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^{3.282} \quad (9)$$

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)



$$D_f = (-12.7h_d - 22.82)h_b + 297.7h_d - 677.2 \quad (10)$$

Donde:

- h_d = profundidad en el morro de la estructura (m).
- h_b = profundidad de rotura (m).
- D_f = Distancia final de afección del bypass (m).

Si bien, el anterior, se constituye en un paso importante en la búsqueda del modelo matemático que describa adecuadamente el fenómeno de bypass, no son resultados concluyentes ya que son el resultado de pruebas numéricas solo para una pendiente de playa de 1:100, un único espesor de estructura y un solo diámetro de partícula, es necesario verificar su aplicabilidad para un universo mayor de situaciones y parámetros.

En este sentido, en este estudio se tuvieron en cuenta 3 nuevas variables, dos geométricas (Pendiente de playa y Ancho de la estructura) y una sedimentológica (D_{50}). De tal manera, que se realizaron pruebas con 20 diferentes geometrías, en la que se combinaron 5 diferentes perfiles de lecho, con 3 anchos diferentes de estructura, para diámetros medios de partículas que van desde 0.1 mm hasta 1 mm. Los diferentes perfiles, anchos de estructura y diámetros de partículas empleados en el estudio, serán explicado con detalles en el apartado 2.1 del presente documento.

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. (Costas, 2017)

IHCantabria, a través del trabajo realizado por Costas en 2017. Llegó a unas expresiones matemáticas que pretenden caracterizar el fenómeno del bypass, sin embargo, se hace necesario ampliar el número y variedad de los datos obtenidos. Debido a lo anterior, en este proyecto se pretende analizar un mayor número de variables geométricas (Pendiente del lecho y ancho de la estructura) y de variables sedimentológicas (D_{50}), con el fin de validar o modificar las expresiones matemáticas obtenidas por Costas en el 2017. Es importante aclarar que cuando se hace referencia al ancho B de la estructura, se esta hablando de la dimensión de esta en el sentido paralelo a la línea de costa (Ver Figura 4)



Figura 4: Esquema donde se especifica el parámetro geométrico B.

1.3. Objetivos

En este apartado se trazarán los objetivos que marcarán el hilo conductor de este trabajo investigativo.

1.3.1. Objetivo General

Verificar la aplicabilidad de expresiones matemáticas establecidas por Costas (2017) para el modelado del bypass de sedimentos a través de una estructura transversal a la línea de costa. De igual manera, en caso de ser necesario, ajustarlas y/o completarlas teniendo en cuenta nuevos parámetros geométricos (Pendiente del lecho y ancho de la estructura) y sedimentológicos (D_{50}) que puedan incidir en el proceso del bypass.

1.3.2. Objetivos Específicos

Durante el proceso seguido para alcanzar el objetivo general trazado para este trabajo, se deberá alcanzar los siguientes objetivos específicos.

- Establecer si la ecuación desarrollada por Costas en 2017, para la estimación de la tasa de sedimento que pasa aguas abajo de la estructura (P_b), aplica para diferentes pendientes del lecho, anchos de estructuras y diferentes diámetros de partículas. En caso de no ser así, establecer la ecuación o el grupo de ecuaciones, que permita estimar adecuadamente esta tasa.
- Establecer si las ecuaciones desarrolladas por Costas en 2017 para la estimación de la distribución del sedimento de bypass depositado aguas abajo de la estructura (Q_e), así como distancia de inicio, D_i , y la distancia final, D_f , de afección del bypass, son aplicables para diferentes pendientes del lecho, anchos de estructuras y diferentes diámetros de partículas. De no ser así, obtener expresiones matemáticas que incluyan los parámetros analizados que tengan influencia en la forma como se distribuye el sedimento aguas abajo de la estructura.

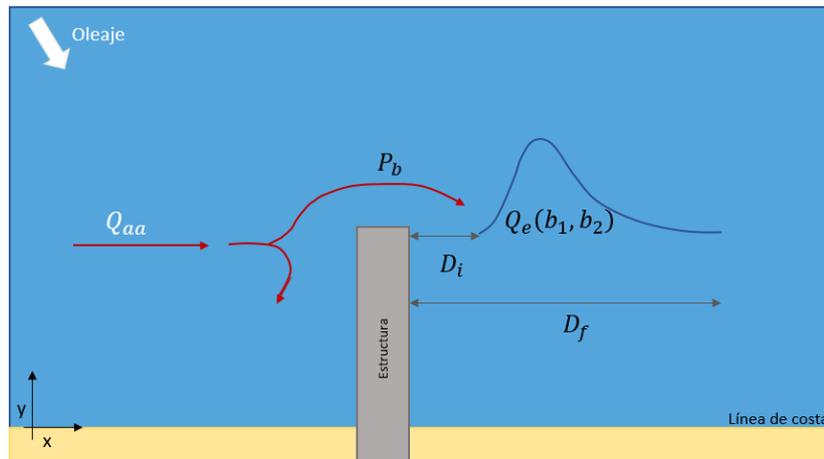


Figura 5: Definición de los parámetros que caracterizan el proceso de bypass en estructuras (Costas, 2017)

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 el presente capítulo, se describen los datos, métodos, procedimientos, modelos matemáticos, conceptuales y numéricos empleados en el presente estudio tendientes a alcanzar los objetivos trazados. En el siguiente flujograma, se muestra esquemáticamente la metodología empleada:

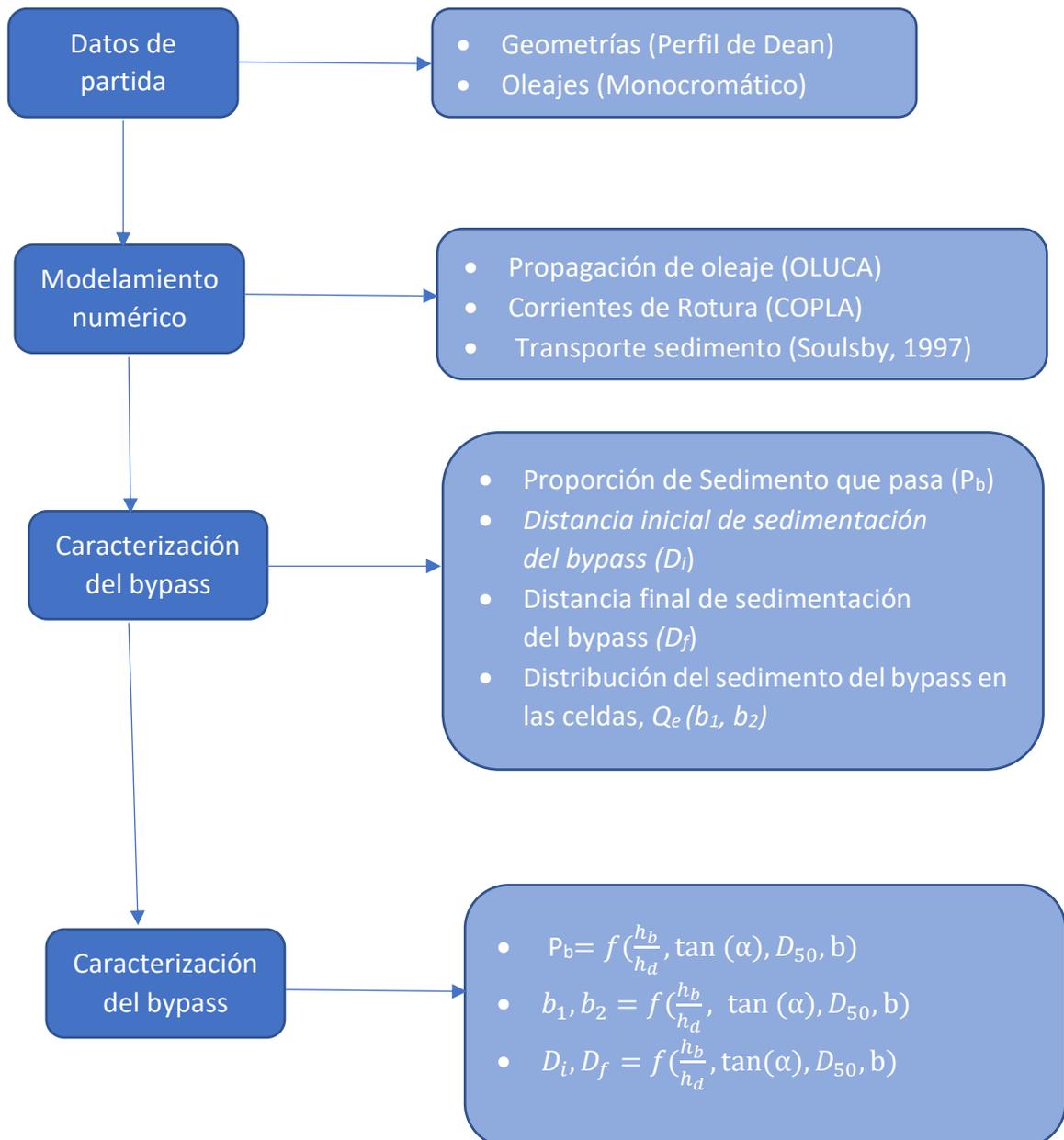


Figura 6: Diagrama del flujo de trabajo



Con el fin de obtener las expresiones matemáticas que describan de manera adecuada el fenómeno de bypass a través de una estructura dura transversal a la línea de playa, se generaron inicialmente un juego de geometrías, en las que se variaron las batimetrías, las longitudes y anchuras de las estructuras. Posteriormente, se simula el comportamiento hidrodinámico de las diferentes geometrías, cuando son expuestas a una serie determinada de oleajes. Estas simulaciones, permiten obtener datos de oleaje y corrientes de rotura en cada nodo de la malla, mediante la utilización de los modelos computacionales OLUCA y COPLA respectivamente.

Los datos de velocidad y dirección de las corrientes, los batimétricos y de oleaje, son tomados como insumos, para mediante la aplicación del modelo matemático de transporte de sedimentos propuesto por Soulsby en 1997, estimar el transporte de sedimento en cada una de las celdas que componen el modelo numérico.

Una vez estimados las tasas de transporte de sedimento en cada una de las celdas del modelo numérico, es posible llevar a cabo operaciones sobre ellas para estimar la proporción de sedimentos que pasa a través de la estructura (bypass), P_b . De igual manera, se lleva a cabo 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). (Costas, 2017)

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, h_d , profundidad a pie de la estructura, Pendiente media del perfil, D_{50} y ancho de la estructura).

2.1. Datos de Partida

En este apartado se describen las características geométricas, tanto de las batimetrías empleadas, como de las estructuras transversales que actuaran como barrera al transporte litoral. Así mismo, se describen las características de la serie de oleajes empleadas durante las simulaciones numéricas.

2.1.1. Datos de geometrías

Las geometrías empleadas corresponden a batimetrías rectas y paralelas, que presentan una estructura dura perpendicular a línea de costa. Las geometrías difieren entre sí, en los perfiles batimétricos transversales y en la profundidad a la cual se sitúa el morro de la estructura dura.

En cuanto a las batimetrías, es importante resaltar que, los adelantos iniciales alcanzados por Cange y Costas durante el 2017, se llevaron a cabo empleando batimetrías rectas y paralelas, cuyas pendientes correspondían a las pendientes medias del perfil de Dean para diferentes D_{50} . En este caso particular, no se emplearán batimetrías con pendiente constante, sino que se generaron batimetrías correspondientes a perfiles de Dean. De esta manera, los perfiles batimétricos



corresponden a un perfil de equilibrio propuesto por Dean y no a una recta teórica. A continuación, se presentan las formulaciones matemáticas que describen el perfil de equilibrio propuesto por Dean.

$$h = A x^{2/3} \tag{11}$$

El parámetro A, depende únicamente del del diámetro medio del grano (D_{50}), calculándose con las siguientes expresiones:

$$A = k w^{0.44} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} w &= 1.1 * 10^6 D_{50}^2 (m) & D_{50} < 0.1 \text{ mm} \\ w &= 273 D_{50}^{1.1} (m) & 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \\ w &= 4.36 D_{50}^{0.5} (m) & D_{50} > 1 \text{ mm} \end{aligned} \tag{13}$$

El coeficiente K, es un factor de ajuste de perfil y variar entre una playa y otra, sin embargo, para este estudio, se empleó el 0.51 propuesto por Dean en 1987. Se emplearon perfiles correspondientes a los siguientes D_{50} :

PERFIL	D_{50} (mm)
P1	0.1
P2	0.2
P3	0.3
P4	0.5
P5	1

Tabla 1: Perfiles batimétricos empleados.

A cada una de las batimetrías generadas, se le dispuso una estructura perpendicular a las batimétricas, a profundidades de morro (h_d) de 3, 5 y 10 m, cada una con su respectiva longitud de acuerdo a la batimetría. A continuación, en las Figura 7, Figura 8 y Figura 9, se presentan a manera de ejemplo, algunas de las geometrías empleadas en el análisis.

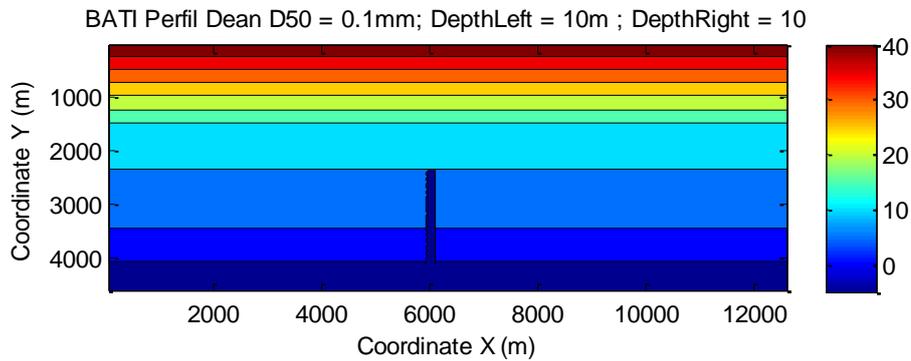


Figura 7: Batimetría D50 = 0.1 mm y hd= 10 m.

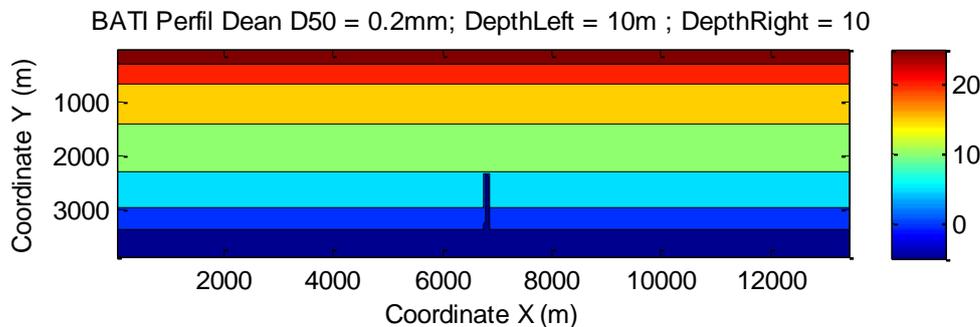


Figura 8: Batimetría D50 = 0.2 mm y hd= 10 m.

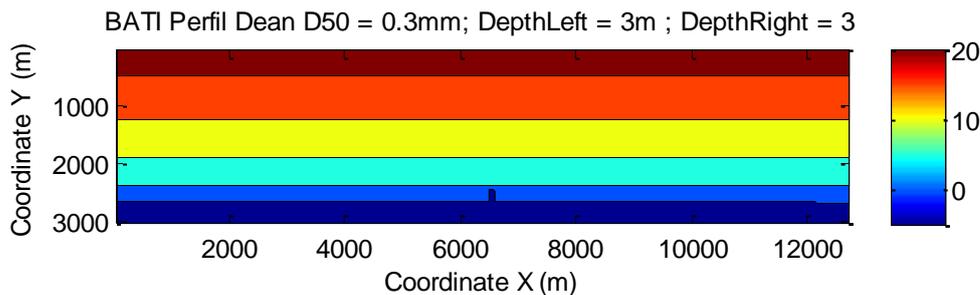


Figura 9: Batimetría D50 = 0.3 mm y hd= 3 m.

De acuerdo con lo anterior, se generaron 15 posibles geométricas, combinando los 5 perfiles batimétricos, con las 3 posibles profundidades a pie de morro, todas con anchos de estructura de 50 m. Adicionalmente, con el fin de conocer la influencia de ancho de la estructura sobre la tasa de bypass, se generaron 5 geometrías más; estas con anchos de estructuras de 200 m, para los casos en los que la profundidad a pie de morro es de 5 m. De esta manera, se analizaron un total 20 geometrías. En las Figura 10 y Figura 11,



se presentan a manera de ejemplo, las geometrías correspondientes a un ancho de estructura de 200 m para los perfiles correspondientes a $D_{50} = 0.1 \text{ mm}$ y $D_{50} = 0.5 \text{ mm}$.

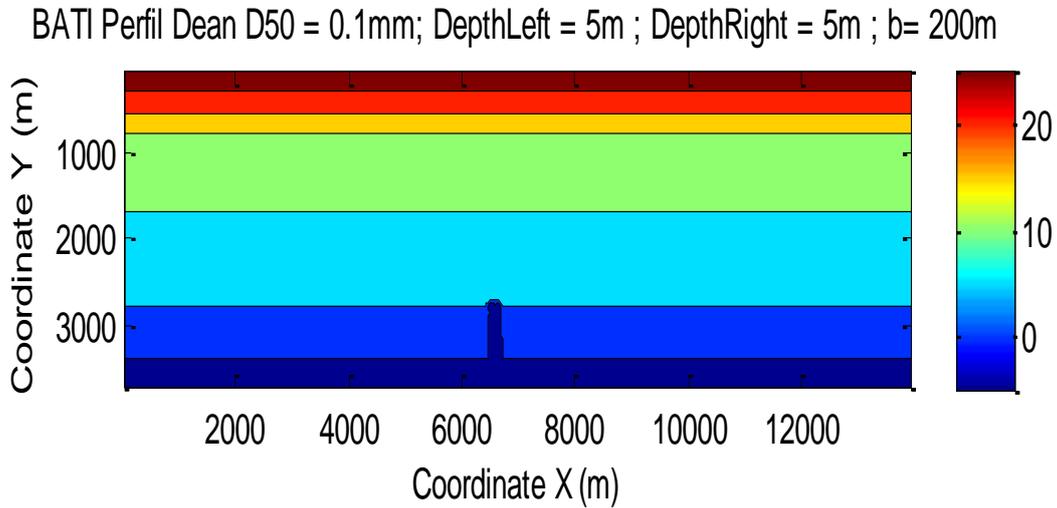


Figura 10: Batimetría $D_{50} = 0.1 \text{ mm}$, $h_d = 5 \text{ m}$ y $b = 200 \text{ m}$.

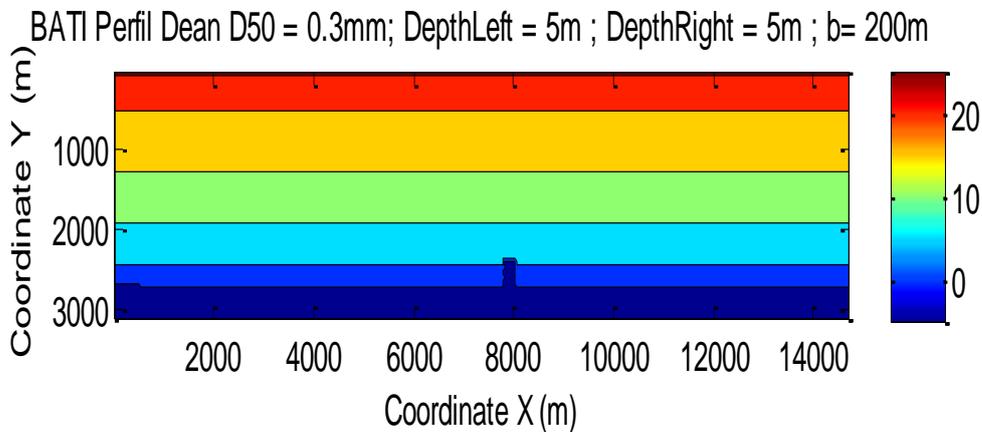


Figura 11: Batimetría $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$, $h_d = 5 \text{ m}$ y $b = 200 \text{ m}$.

En el siguiente cuadro se presentan resumidas las 20 geometrías que fueron analizadas durante el presente estudio.

GEOMETRÍA	h_d (m)	Ancho de Est. (B) (m)	PERFIL ASOCIADO A
1	10	50	$D_{50} = 0.1$ mm
2			$D_{50} = 0.2$ mm
3			$D_{50} = 0.3$ mm
4			$D_{50} = 0.5$ mm
5			$D_{50} = 1$ mm
6	5	50	$D_{50} = 0.1$ mm
7			$D_{50} = 0.2$ mm
8			$D_{50} = 0.3$ mm
9			$D_{50} = 0.5$ mm
10			$D_{50} = 1$ mm
11	3	50	$D_{50} = 0.1$ mm
12			$D_{50} = 0.2$ mm
13			$D_{50} = 0.3$ mm
14			$D_{50} = 0.5$ mm
15			$D_{50} = 1$ mm
16	5	200	$D_{50} = 0.1$ mm
17			$D_{50} = 0.2$ mm
18			$D_{50} = 0.3$ mm
19			$D_{50} = 0.5$ mm
20			$D_{50} = 1$ mm

Tabla 2: Relación de las Geometrías empleadas en el estudio.

2.1.2. Datos de Oleaje

Para las simulaciones numéricas se emplearon una serie de oleajes representativos de las cosas españolas, En total 145 oleajes monocromáticos, con alturas de olas (H) entre 0.5 m y 10 m, períodos entre 5 s y 17 s y direcciones de N5W, N15W, N30W, N45W y N60W. De esta manera se cubre todo el abanico de direcciones que pueden generar movimiento de sedimentos en las geometrías empleadas, empezando con oleajes casi paralelos a la línea de costa y terminado en oleajes casi perpendiculares.

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. (Costas, 2017).

2.2. Modelado Numérico

2.2.1. Mallas de modelado

Las batimetrías fueron cargadas en la herramienta de modelo numérico MOPLA, que permitirá la propagación del oleaje y la generación de las corrientes. Para tal efecto, las geometrías debieron ser discretizadas mediante la construcción de mallas estructuradas con celdas cuadradas de 32 m ancho. En la Figura 12, se muestra una de las mallas generadas.

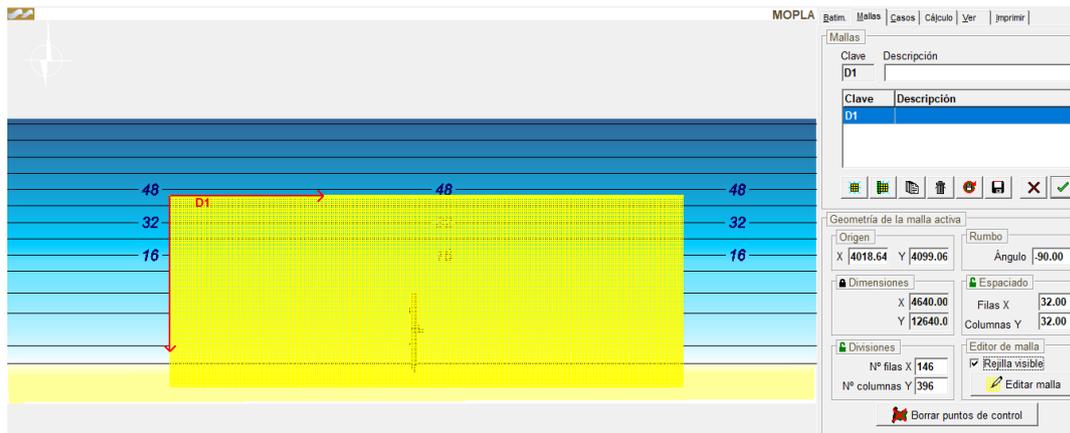


Figura 12: Ejemplo de malla generadas en el modelo Mopla.

2.2.2. Oleaje y corrientes tras la propagación

Los oleajes relacionados en el anejo 1, corresponden a climas marinos en aguas indefinidas, en donde la batimetría y los contornos del sistema, no han logrado modificarlo aún. Durante el proceso de propagación del oleaje hacia la playa, intervienen varios fenómenos que modifican el frente de ola y la manera como este distribuye su energía; los fenómenos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión, los procesos de disipación de energía y la rotura, finalmente modifican el patrón de oleaje, generando corrientes que a la postre son el motor del transporte litoral de sedimentos.

Para llevar a cabo esta propagación, se empleó 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).

Como ya se comentó, para este estudio, la propagación se llevó a cabo empleando Oluca_mc, obteniendo de esta manera, los mapas de altura de ola significativa y corrientes, en la totalidad del dominio de cada proyecto.

En Figura 13, se muestra el mapa de altura de ola significativa para una geometría correspondiente a un perfil de Dean de $D_{50}=0.1\text{mm}$, $H_d=10\text{ m}$, y un oleaje $N60^\circ W$, con $H_s=10\text{ m}$ y $T_p=17\text{ s}$. En la Figura 14, se muestra el mismo mapa, pero generado por MOPLA, en ellos se puede observar la formación de la zona de sombra aguas abajo de la estructura.

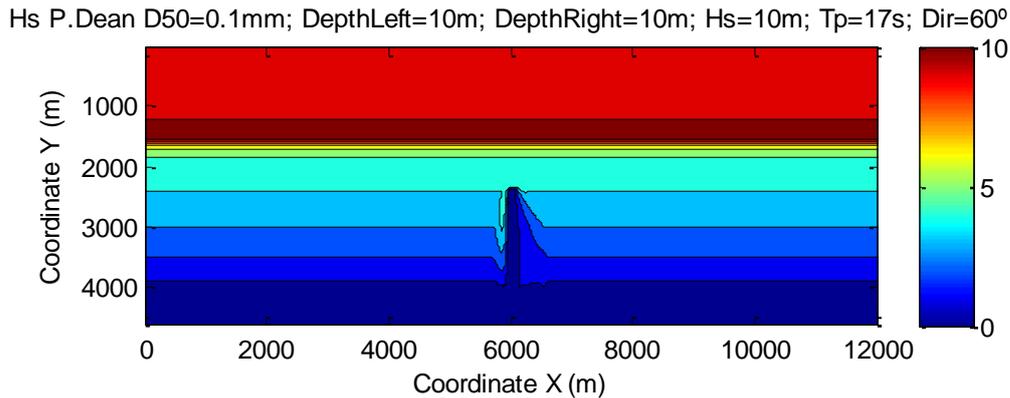


Figura 13: Ejemplo mapa de isoalturas de onda propagado con línea de costa.

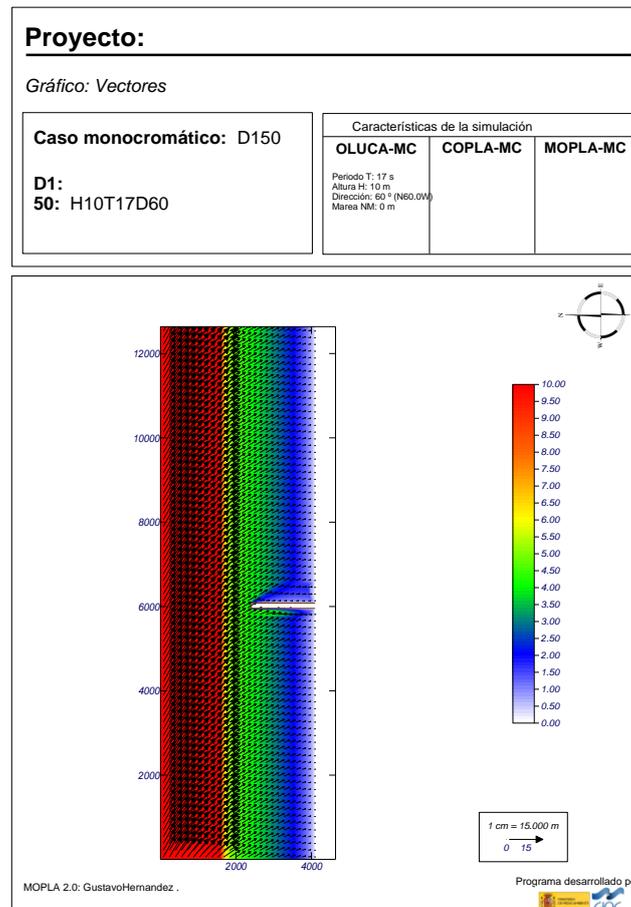


Figura 14: Ejemplo mapa de oleaje propagado con Mopla

De igual manera se obtuvieron los mapas de corrientes para cada uno de los oleajes propagados hasta costa. En la Figura 15, se presenta el mapa de corrientes para una geometría correspondiente a un perfil de Dean de $D_{50}=0.1\text{mm}$, $H_d=10\text{ m}$, y un oleaje $N60^\circ W$, con $H_s=10\text{ m}$ y $T_p=17\text{ s}$. En la Figura 16, se muestra el mismo mapa, pero generado por MOPLA, en ellos se puede observar la formación de la zona de sombra aguas abajo de la estructura.

Corrientes P.Dean $D_{50}=0.1\text{mm}$; DepthLeft=10m; DepthRight= 10m; H=10m; T=17s; Dir=60°

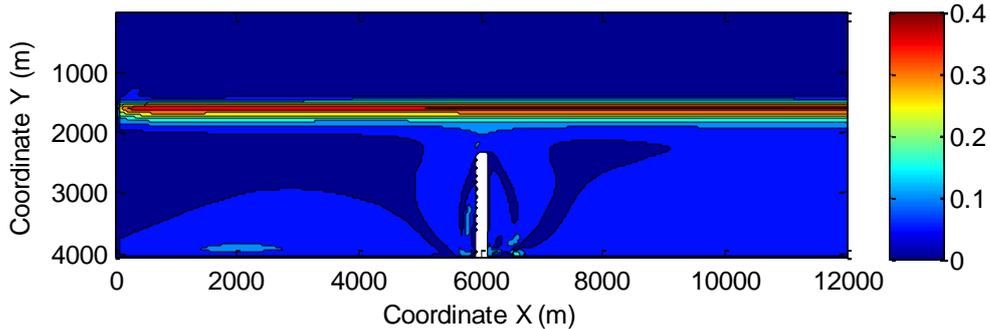


Figura 15: Ejemplo mapa de corrientes con Perfil de Dean $D_{50}=0.1\text{ mm}$.

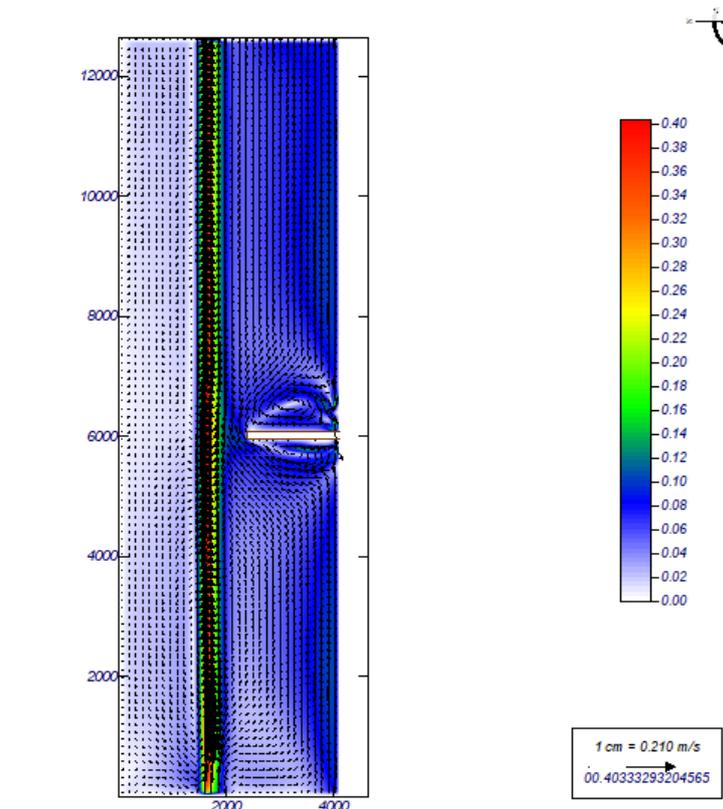


Figura 16: Ejemplo mapa de corrientes con Perfil de Dean $D_{50}=0.1\text{ mm}$, en Mopla.



Es importante resaltar que, para oleajes poco energéticos, con periodos menores a 7 s, el modelo COPLA requiere que la última celda se subdivida para poder representar adecuadamente las corrientes. De no hacerlo, se pueden presentar errores consistentes en la generación de corrientes en sentido contrario al sentido de la oblicuidad del oleaje.

2.2.3. Cálculo del transporte

En este estudio se empleará la metodología desarrollada por Costas en 2017 para el cálculo de transporte de sedimento, por tal razón, se transcribe literalmente a continuación dicha metodología:

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.

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).

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{1/2} - \bar{U}_{cr} \right]^{2.4} \quad (14)$$

Donde:

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

$$q_t = (q_x, q_y) \quad (15)$$

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \quad (16)$$

$$A_{sb} = \frac{0.005h \left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{1.2}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (17)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012hD_{50}D_*^{-0.6}}{[(s-1)gD_{50}]^{1.2}} \quad (18)$$

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

C_D =coeficiente de fricción debido a la corriente.

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{h}{z_0} - 1\right)} \right]^{-2} \quad (19)$$

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

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

U_{rms} = velocidad orbital cuadrática-media.

$$U_{rms} = \sqrt{2} \frac{\pi H_{rms}}{T_p \sinh(kH)} \quad (20)$$

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

$$\bar{U}_{cr} = 0.19(D_{50})^{0.1} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \quad 0.1mm \leq D_{50} \leq 0.5mm \quad (21)$$

$$\bar{U}_{cr} = 8.5(D_{50})^{0.6} \log_{10} \left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \quad 0.5mm \leq D_{50} \leq 2mm \quad (22)$$

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

h = profundidad (m).

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

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

s = densidad relativa.



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

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

$$D_* = \left(\frac{a\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} D_{50} \quad (23)$$

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).

2.3. Caracterización del bypass

Para caracterizar el bypass, se requiere establecer conocer básicamente, la tasa de bypass (P_b) y la manera como se va depositando el sedimento una vez sobrepasa la estructura dura (Q_e). Esta manera de depositarse el sedimento, permite inferir la distancia a la estructura en la que el sedimento inicia su decantación (D_i) y la distancia hasta donde la pluma de sedimento tiene influencia (D_f).

A continuación, se describen los procesos de caracterización tanto de la distribución del bypass (Q_e), como de la tasa de bypass (P_b).

2.3.1. Caracterización de la tasa de bypass

El proceso descrito a continuación, es transcripción fiel de lo escrito por Costas 2017 en un su Trabajo Final de Master. Ella desarrollo la metodología para la caracterización de la distribución del bypass (Q_e) y de la tasa de bypass (P_b).

En el presente trabajo, como se comentó anteriormente, es la continuación de la línea e investigación iniciada por Costas en el 2017. Dado que en su momento Costas solo obtuvo resultados satisfactorios para una geometría de una sola pendiente, un solo tamaño de grano y estructuras del mismo ancho, este trabajo sigue la misma metodología de caracterización del bypass pero incluyendo parámetros adicionales como lo son: Pendiente de la playa, diámetro de la partícula y ancho de la estructura.

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.

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 17).

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 17.

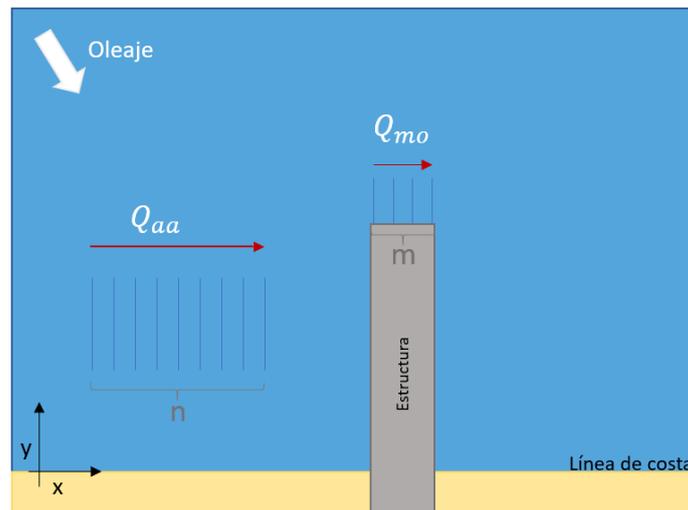


Figura 17: Definición de variables para el cálculo del bypass (Costas, 2017)

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

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 18.

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, donde 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 18.

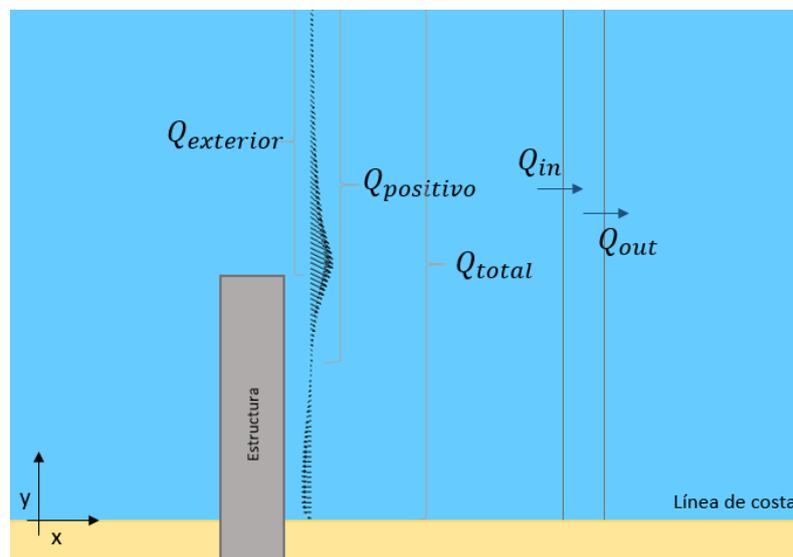


Figura 18: Definición de variables para cálculo de la distribución (Costas, 2017)

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

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

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

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

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).
- Q_b = Caudal de material que pasa a través del bypass (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 de la misma.

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:

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

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:

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

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.

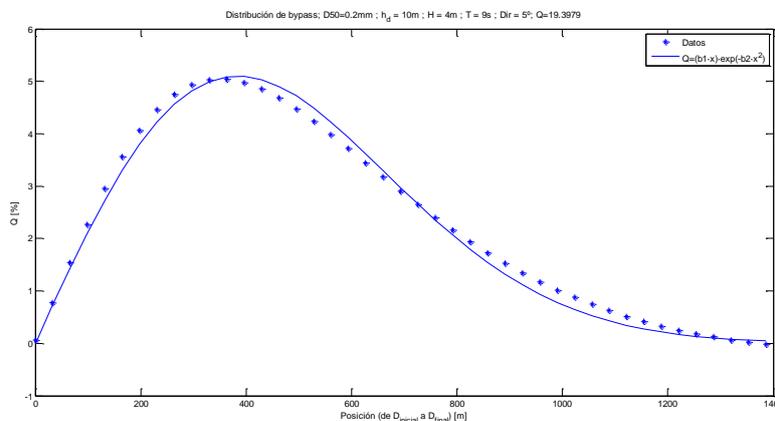


Figura 19: Ejemplo de ajuste de Q_e^a (función) a Q_e (datos)



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 19.

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 5):

- 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).
- Perfil de playa ($f(D_{50})$)
- Ancho de la estructura (B)
- Diámetro de la partícula (D_{50})

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} . Sin embargo, con el fin de establecer profundidades de rotura menos discretizada que las que ofrece la malla estructurada del modelo Mopla, se empleó el criterio de rotura de Goda (1975) para estimar esta profundidad.

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:

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

$$b_1, b_2 = f(h_b, h_d, \tan(\alpha)) \quad (31)$$

$$D_i = f(h_d, \tan(\alpha)) \quad (32)$$

$$D_f = f(h_b, h_d, \tan(\alpha)) \quad (33)$$

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 $h_d = 3, 5$ 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 y Análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos luego de los diferentes casos objeto de análisis en el presente proyecto.

3.1. Parametrización del bypass

En este numeral, se abordarán varios tópicos. Inicialmente se compararán los resultados obtenidos en el presente estudio, con los obtenidos por Costas en 2017 cuando empleó las geometrías generadas por Cange (2017). Posteriormente, se analizará si los parámetros establecidos para el bypass, dependen de factores como la pendiente del lecho, el ancho de estructura y el D_{50} .

3.1.1. Tasa de sedimento de bypas

Tal como estableció Costas en 2017, la tasa de sedimentos del bypass (P_b), no guarda relación con parámetros como el Período y la Dirección del oleaje. P_b se encuentra directamente relacionados con la profundidad de rotura del oleaje (h_b) y con la profundidad a la que se encuentra el morro (h_d). Con el fin adimensionalizar la curva, se graficó la tasa de sedimentos (P_b), contra el coeficiente $\left(\frac{h_b}{h_d}\right)$.

Dado que las geometrías generadas para este estudio difieren de las generadas por Cange (2017) y Costas (2017), en el sentido que éstas usaron perfiles con pendiente constantes, mientras que para este caso se emplearon perfiles de Dean, el primer paso es comparar los resultados obtenidos por Costas en 2017, con los obtenidos en presente estudio.

3.1.1.1. Comparación con Costas 2017

A continuación, en la Figura 20, se presentan los datos obtenidos para un perfil de Dean correspondiente a un D_{50} de 0.1 mm, el cual corresponde a un perfil de pendiente media constante de 1H/100V empleado por Costas en 2017.

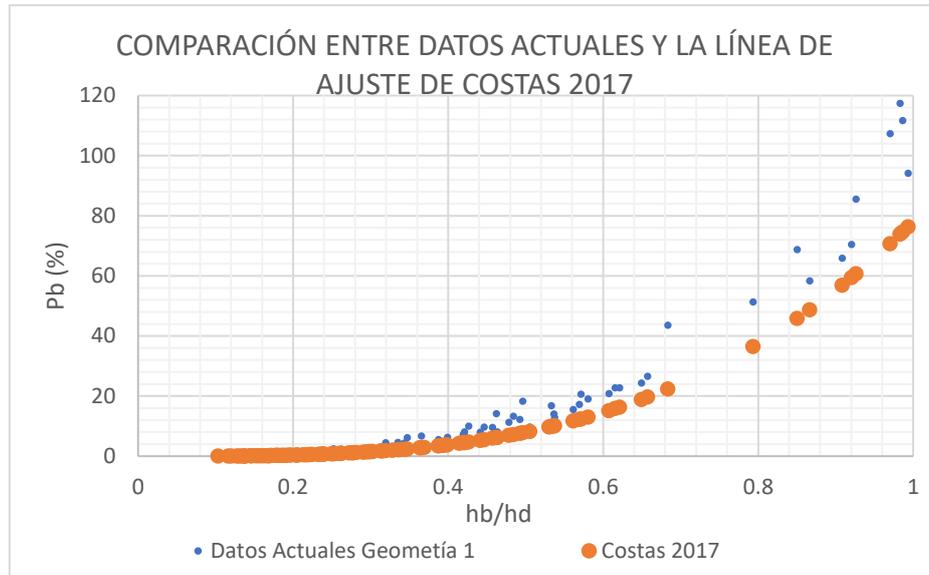


Figura 20: Comparación entre datos actuales y la Curva de ajuste de Costas en 2017.

Como se observa en la imagen anterior, el ajuste que obtuvo Costas en 2017, se encuentra levemente por debajo de la nube de puntos obtenida en el estudio actual. El anterior desfase, se puede deber a las diferencias en las batimetrías empleadas en ambos estudios.

Con el fin recordar la ecuación de ajuste a la cual llegó Costas en su investigación de 2017, se presenta a continuación dicha expresión matemática. Es importante resaltar que guarda la misma estructura de la ecuación obtenida en el presente estudio, con variaciones las constantes de ajuste.

$$P_b = 78.14 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^{3.282} \quad (36)$$

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)

3.1.1.2. Ajuste de P_b con las batimetrías actuales

Teniendo en cuenta que las batimetrías que emplean el perfil de Dean se ajustan más a la realidad que las empleadas por Costa en 2017, se llevó a cabo un nuevo ajuste con los datos obtenidos en este estudio. La Figura 21, muestra la curva de ajuste para los resultados de P_b obtenidos para las Geometrías generadas con el Perfil 1 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.1$ mm)

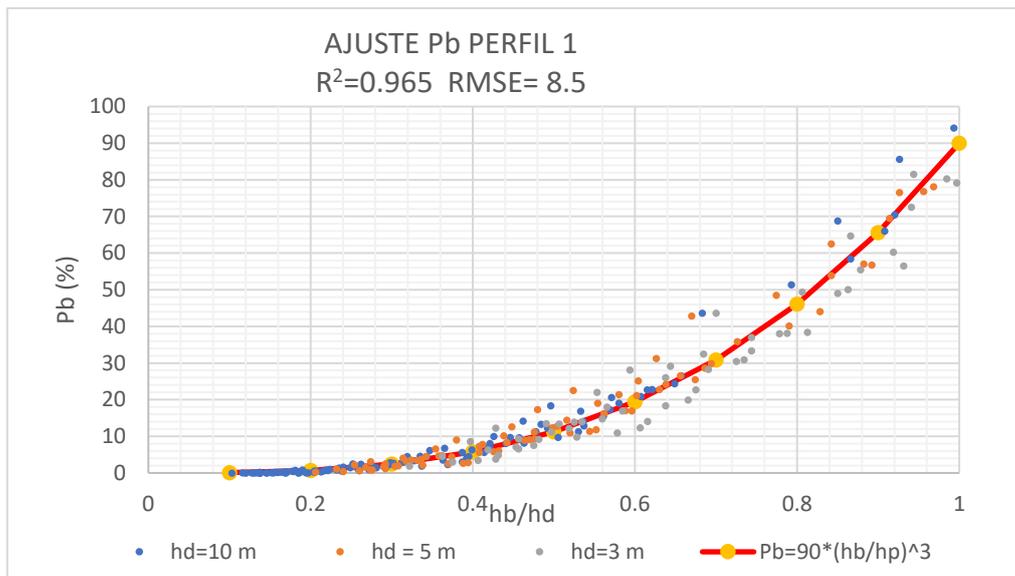


Figura 21: Curva de ajuste de P_b para Perfil 1 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.1 \text{ mm}$).

Con estos datos, se obtiene la nube de puntos representada en la Figura 21, obteniendo la función de ajuste descrita por la ecuación (36):

$$P_b = 90 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^3 \quad (37)$$

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)

Se observa en la Figura 21, que los datos se ajustan muy bien a la curva, obteniendo coeficientes de determinación mayores de 0.9 en todos los casos, lo que señala que la formulación propuesta predice con bastante exactitud la tasa de bypass.

Dado que uno de los objetivos de este estudio, es establecer si el comportamiento de la tasa de bypass depende de la pendiente batimétrica, se repitió el anterior procedimiento para batimetrías correspondientes a otros perfiles de Dean. A continuación, la Figura 22, muestra los resultados obtenidos para el Perfil 2 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.2 \text{ mm}$).

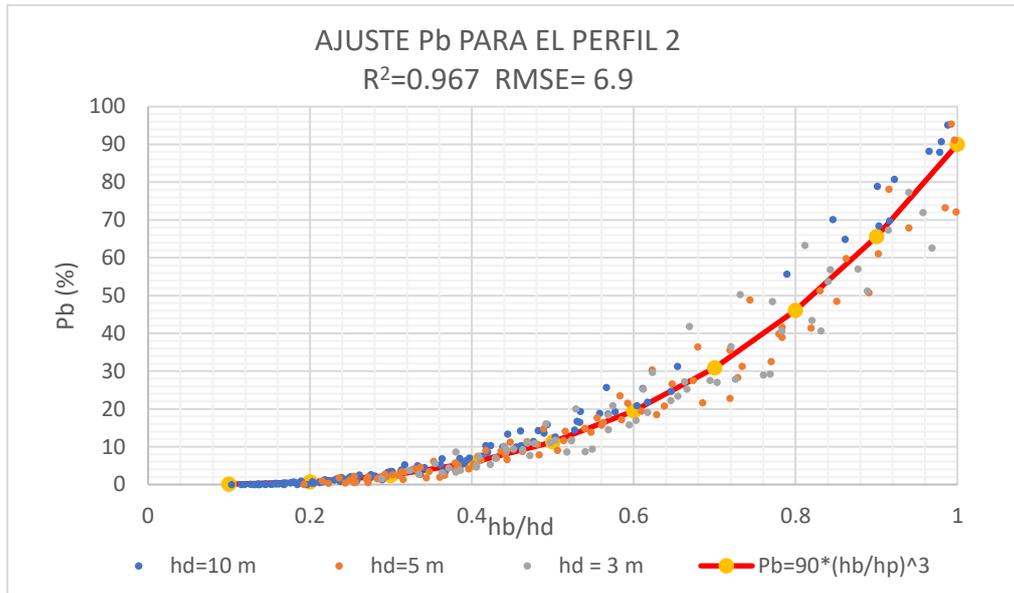


Figura 22: Curva de ajuste de P_b para Perfil 2 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.2$ mm).

Se puede observar en la figura anterior, que la curva de ajuste obtenida para el Perfil 1, ajusta adecuadamente también para la batimetría correspondiente al Perfil 2. Para este caso, se obtuvo un Coeficiente de Correlación (R^2) de 0.967, y RMSE = 6.9, lo cual sigue siendo muy bueno.

Para el caso del Perfil 3, se obtuvieron igualmente resultados satisfactorios, como se puede observar en la Figura 23. Para este caso, se obtuvo un Coeficiente de Correlación (R^2) de 0.967, y RMSE = 6.2, lo cual sigue siendo muy bueno.

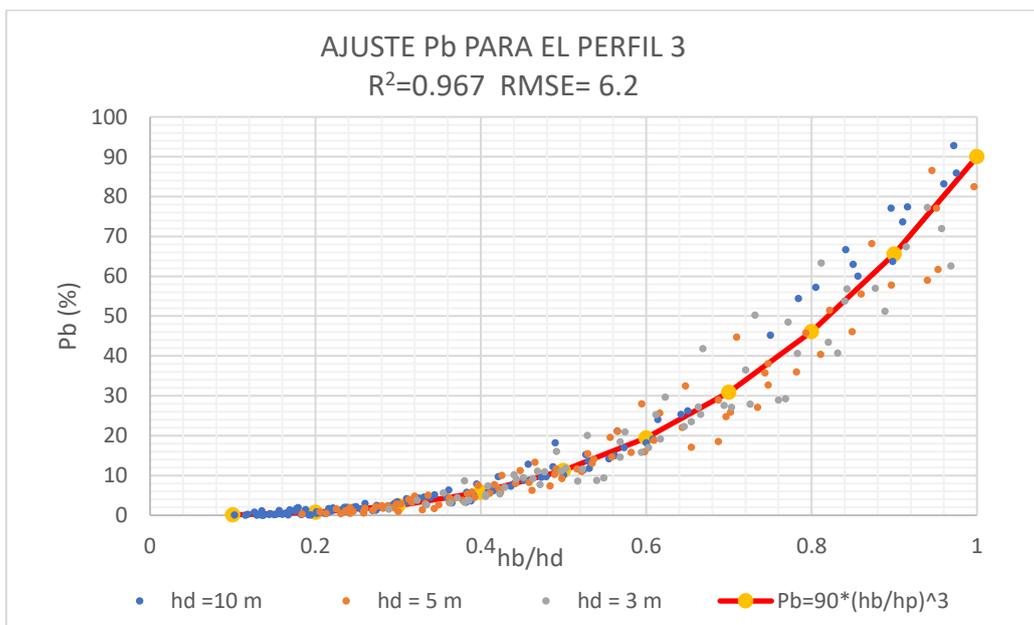


Figura 23: Curva de ajuste de P_b para Perfil 3 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.3$ mm).



Para las batimetrías correspondientes al Perfil 4, se llevó a cabo el mismo procedimiento, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 24. El ajuste fue satisfactorio, obteniendo Coeficiente de Correlación (R^2) de 0.967, y RMSE = 5.9.

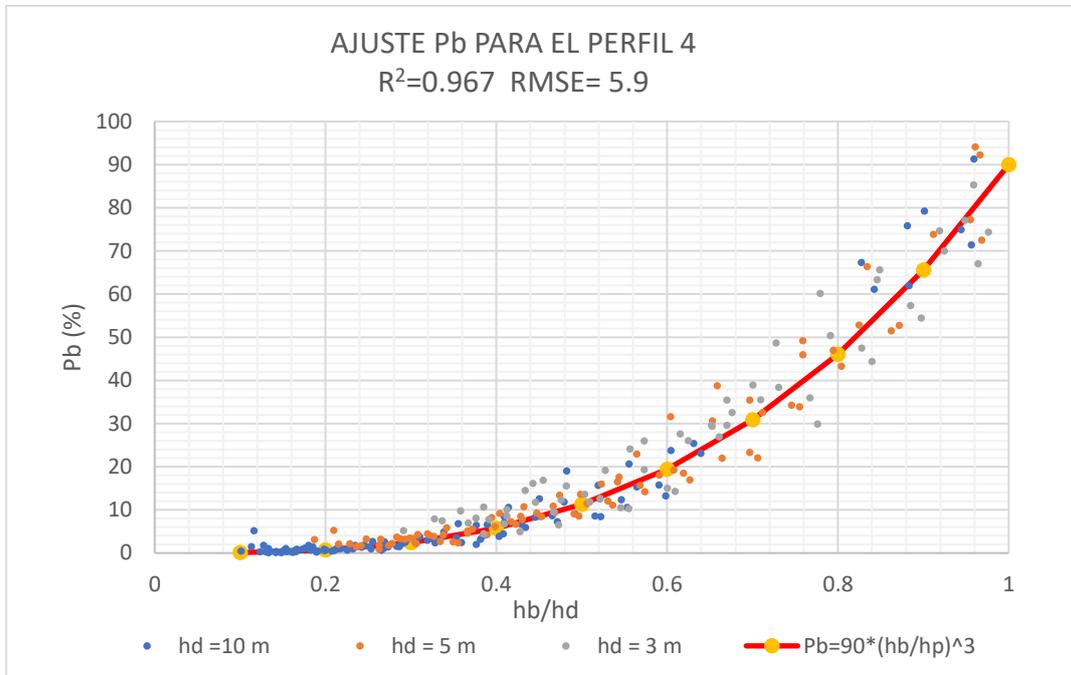


Figura 24: Curva de ajuste de P_b para Perfil 4 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 0.5$ mm).

Las últimas batimetrías analizadas corresponden al Perfil 5 (Perfil de Dean para $D_{50} = 1$ mm), los resultados de estas fueron también muy satisfactorios, Coeficiente de Correlación (R^2) de 0.964, y RMSE = 5.2.

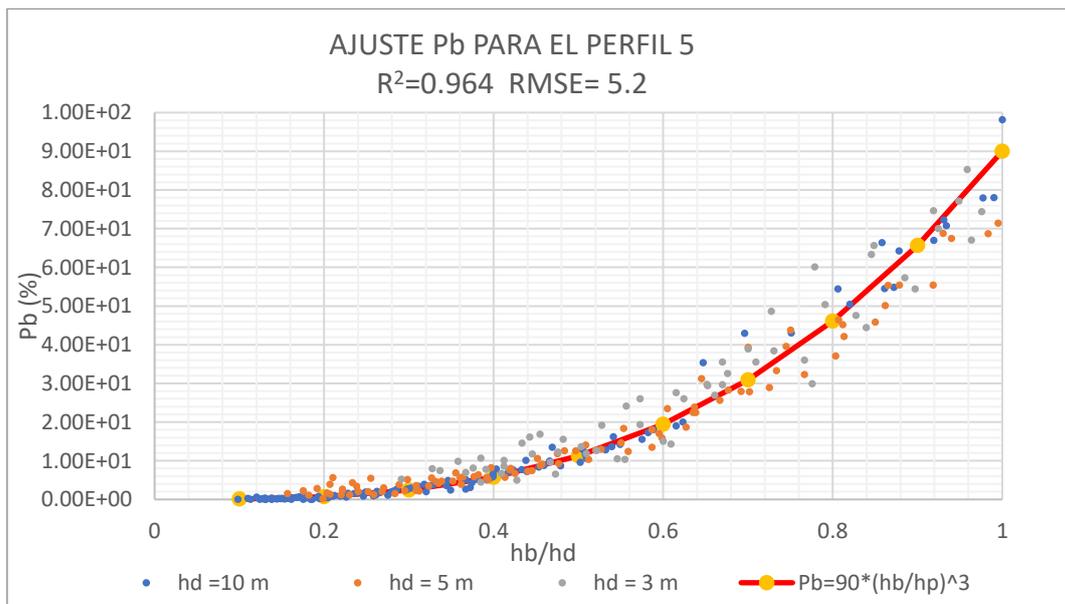


Figura 25: Curva de ajuste de P_b para Perfil 5 (Correspondiente a un perfil de Dean con $D_{50} = 1$ mm).



Finalmente, se graficaron los resultados de todas las geometrías analizadas conjuntamente con la curva de ajuste establecida. En la Figura 26, se muestra esta gráfica y se puede observar que el ajuste es bastante satisfactorio, con un Coeficiente de Correlación General (R^2) de 0.97, y RMSE = 5.4.

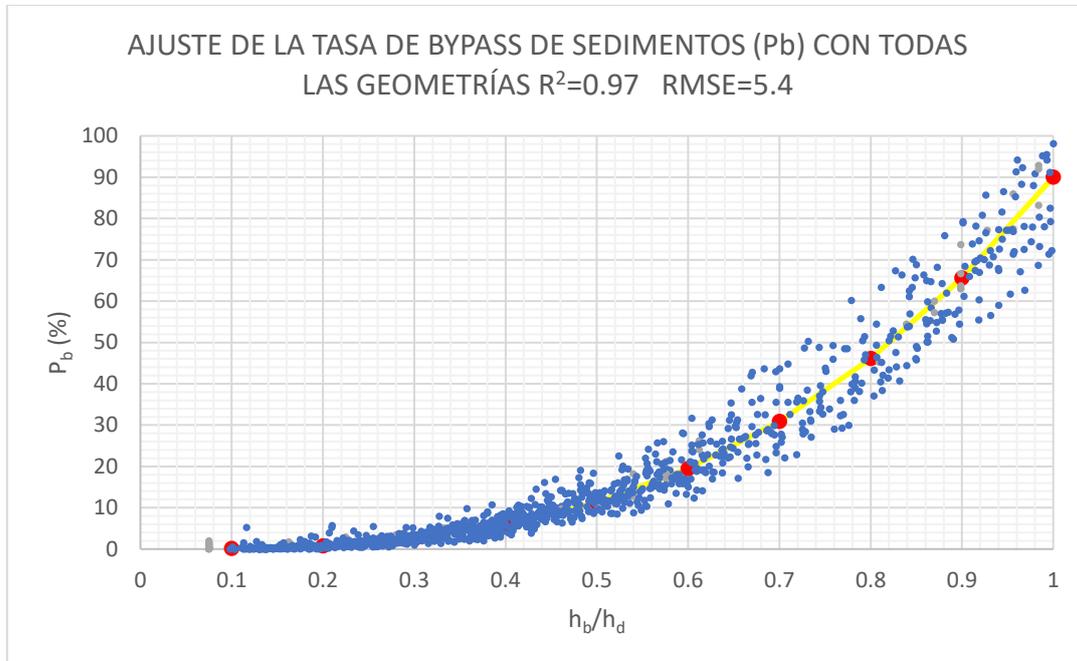


Figura 26: Ajuste de P_b para todas las geometrías

3.1.1.3. Dependencia del P_b con el Ancho de la Estructura (B)

Con el objetivo de establecer si la tasa de sedimentos del bypass varía con el ancho B de la estructura, se graficaron de manera conjunta los resultados de la Tasa de sedimentos del bypass obtenidas para la geometría con batimetría correspondiente a un perfil de Dean de $D_{50} = 0.1\text{mm}$ y con profundidad del morro (h_d) de 5 m, para anchos de estructura de 50 m, 100 m y 200m. A continuación, se presenta los resultados obtenidos en la Figura 27.

Se puede observar en la Figura 27, que la tasa de bypass no guarda relación con el ancho de la estructura, en otras palabras, el porcentaje de sedimentos que pasa a través del bypass, no varía con el la variación del ancho de la estructura.

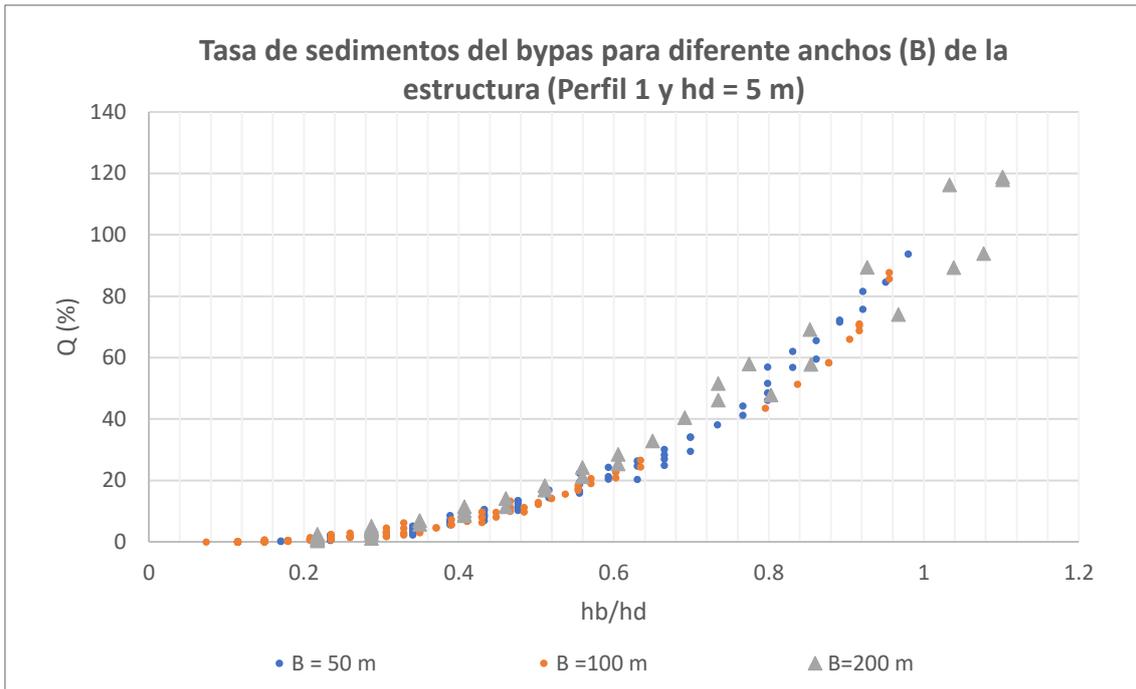


Figura 27: Comparación de la Tasa de sedimentos a través del bypass para diferentes anchos de estructura.

3.1.1.4. Dependencia del Pb con el Diámetro de la partícula (D_{50})

Con el objetivo de establecer si la tasa de sedimentos del bypass varía con el diámetro de la partícula de sedimento, se graficaron de manera conjunta los resultados de la Tasa de sedimentos del bypass obtenidas para la geometría 1, suponiendo que el perfil se mantiene estable para diferentes diámetros medio de partícula (D_{50}). De esta manera, se estimaron las tasas de bypass para una misma geometría, con D_{50} de 0.1 mm, 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm y 2 mm, encontrando que la tasa de bypass no presenta variaciones significativas cuando se varía el diámetro de la partícula. A manera de ejemplo, en la Figura 28, se muestran los resultados obtenidos para la Geometría 1.

Se puede observar en la Figura 28, que la tasa de bypass no guarda relación con el diámetro de la partícula, en otras palabras, el porcentaje de sedimentos que pasa a través del bypass, no se modifica con el la variación del diámetro de la partícula.

Esta operación se llevó a cabo con las diferentes geometrías analizadas en el presente estudio, obteniendo los mismos resultados en todas ellas, razón por la cual solo se presenta los resultados obtenidos para la geometría 1 a manera de ejemplo.

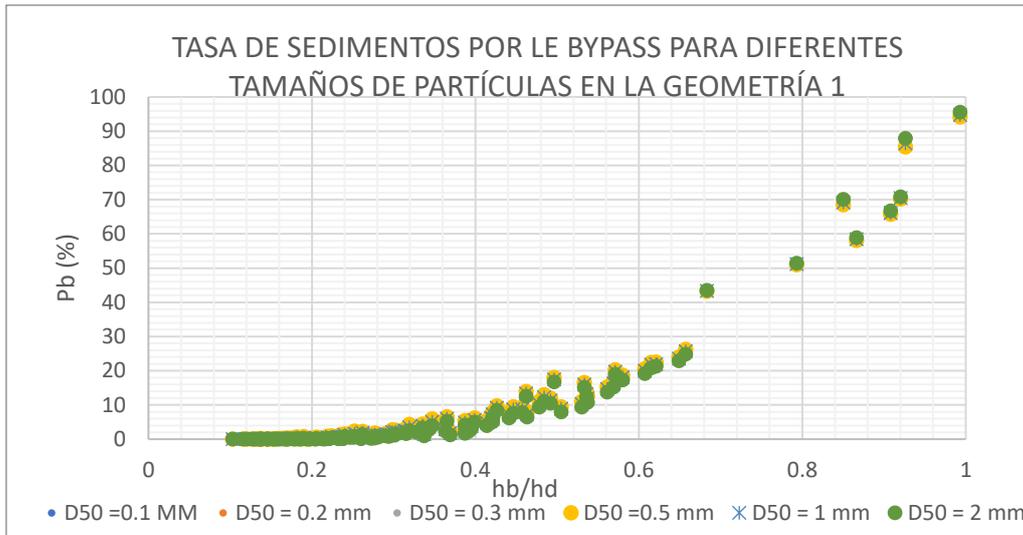


Figura 28: Comparación de la Tasa de sedimentos a través del bypass para diferentes Diámetros de partícula

Con el objetivo de mostrar de manera más clara el hecho de que para una geometría determinada, el porcentaje de sedimentos que pasa a través del bypass no guarda relación con el diámetro de la partícula, en la Figura 29 se graficó la tasa de baypass que se presenta en la Geometría 1 para un estado de mar determinado, en función del diámetro medio de la partícula. Se observa claramente, que existe un leve descenso en el porcentaje de bypass a medida que se incrementa el diámetro de la partícula, pero no es un descenso significativo; para este caso en particular, pasa de 20.86% para un $D_{50} = 0.1$ mm, a un 19.1 % para un $D_{50} = 2$ mm.

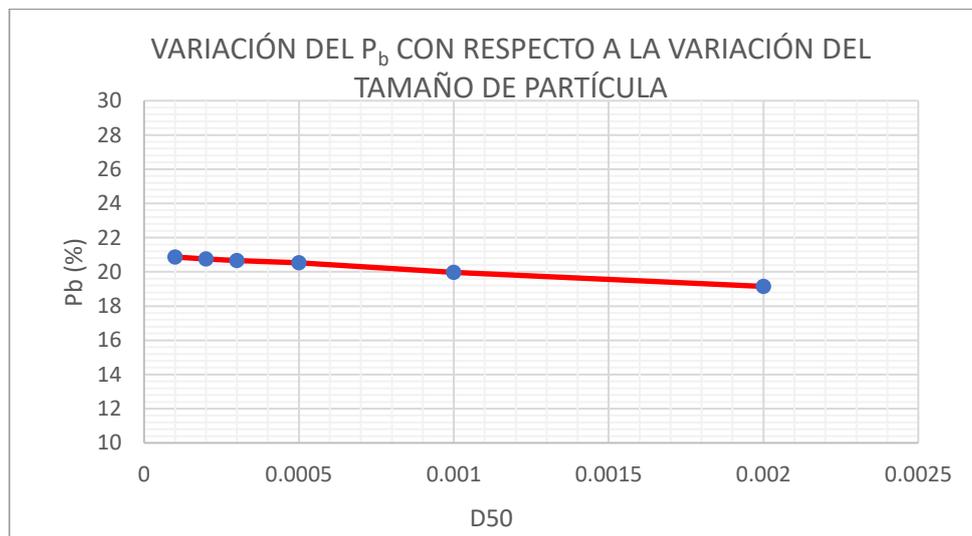


Figura 29: Variación de P_b con respecto al diámetro de la partícula para un estado de mar determinado.

Lo anterior, no significa que el caudal de sedimento que pasa a través de un bypass no varíe con relación al tamaño de la partícula. Lo que significa es que, la fracción del caudal de sedimentos que viene siendo transportado aguas arriba de la estructura, que logra



pasar hacia aguas abajo de la mismo a través del bypass, se mantiene sensiblemente constante sin importar tamaño de la partícula.

3.1.2. Distancia inicial de afección

La distancia inicial de afección, es aquella medida desde el final de la estructura, hasta el punto donde el sedimento del bypass inicia su decantación. Los resultados obtenidos muestran una nube dispersa de puntos, sin correlación alguna entre los parámetros graficados. Lo anterior, puede deberse a ruido numérico que la estructura introduce al modelo en su cercanía. Razón por la cual, no se pudo establecer un ajuste válido para esta variable.

Esta misma situación fue evidenciada durante la investigación adelantada por Costas (2017), en la que no se pudo obtener una correlación satisfactoria para este parámetro.

En la Tabla 3, se presenta el valor medio de la Distancia Inicial de afección y la desviación estándar para cada una de las geometrías analizadas.

Geometría	Di Promedio (m)	Desv. Estándar
1	320	67.4
2	250	75
3	232	58.7
4	184	40.8
5	165	30.3
6	224	31.3
7	190	24.1
8	180	23
9	164	24.1
10	150	34.7

Tabla 3: Valores medios de D_i y de la Desviación estándar

De la Tabla 3, se puede resaltar que para 60% de las geometrías la desviación estándar no supera la longitud correspondiente a una celda de la malla del modelo, un 80% no supera las celdas y el 100% no supera la distancia correspondiente a 3 celdas.

Con el fin de intentar establecer una correlación entre las Distancias promedio de afección inicial y algunos parámetros del sistema, se graficó conjuntamente ésta con la el parámetro $Tan(\alpha) = (hd/L)$, donde L es la longitud en metro de la estructura.

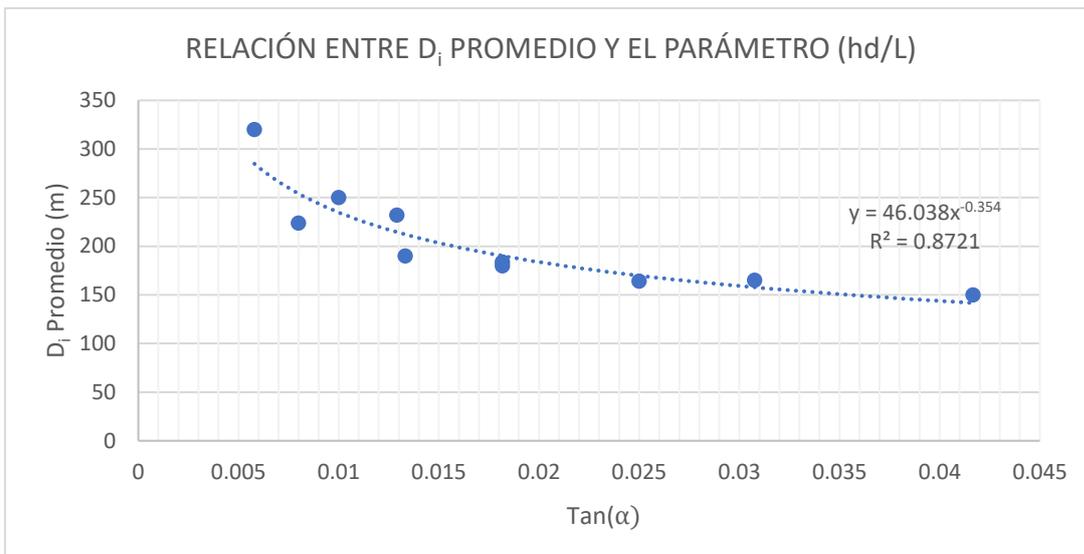


Figura 30: Ajuste de la Distancia media de afectación inicial.

Como se observa en la Figura 30, se pudo obtener una correlación satisfactoria, con $R^2 = 0.87$, entre la Relación $\tan \alpha$ y la Distancia promedio de Afectación Inicial (D_i). la Expresión se presenta a continuación:

$$D_i = 46.038(\tan \alpha)^{-0.354} \quad (38)$$

Donde,

D_i = Distancia promedio de Afectación Inicial (m)

$\tan(\alpha) = \frac{h_d}{L}$ = Pendiente media del lecho (m/m)

h_d = Profundidad en el morro (m)

L = Longitud de la estructura (m)

La longitud de cada una de estructuras se muestra en la siguiente Tabla:

Geometría	L (m)
1	1725
2	1000
3	775
4	550
5	325
6	625
7	375
8	275
9	200
10	120

Tabla 4: Longitudes de estructura para cada geometría empleada.



3.1.2.1. Dependencia de D_i con el Ancho de la Estructura (B)

Dado el ruido numérico que se genera en las proximidades de aguas abajo de la estructura, no fue posible establecer si la Distancia inicial de afección del bypass guarda relación con el diámetro de la partícula. Sin embargo, se pudo establecer que las distancias medias de afección inicial no varían con la variación del del ancho de la estructura dentro del rango analizado ($50 \text{ m} < B > 200 \text{ m}$).

3.1.2.2. Dependencia de D_i con el diámetro de la partícula (D_{50})

Dado el ruido numérico que se genera en las proximidades de aguas abajo de la estructura, no fue posible establecer si la Distancia inicial de afección del bypass guarda relación con el diámetro de la partícula. Sin embargo, se pudo establecer que las distancias medias de afección inicial no varían con la variación del ancho de la estructura en el rango analizado ($0.1 \text{ mm} < D_{50} > 2 \text{ mm}$).

3.1.3. Distancia final de afección

Tal como estableció Costas en 2017, la Distancia Final de afección del bypass (D_f), no guarda relación con parámetros como el Período y la Dirección del oleaje. D_f se encuentra directamente relacionados con la profundidad de rotura del oleaje (h_b) y con la pendiente media del lecho ($\tan(\alpha)$).

Dado que las geometrías generadas para este estudio difieren de las generadas por Cange y Costas durante el 2017, en el sentido que éstas usaron perfiles con pendiente constantes, mientras que para este caso se emplearon perfiles de Dean, el primer paso es comparar los resultados obtenidos por Costas en 2017, con los obtenidos en presente estudio.

3.1.3.1. Comparación con Costas (2017)

A continuación, en la Figura 31, se presentan los datos obtenidos para un perfil de Dean correspondiente a un D_{50} de 0.1 mm, el cual corresponde a un perfil de pendiente media constante de 1H/100V empleado por Costas en 2017. ES importante recordar que la expresión a la que llego Costas (2017) para la Distancia final de afección es la siguiente:

$$D_f = (-12.7h_d - 22.82)h_b + 297.7h_d - 677.2 \quad (39)$$

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).

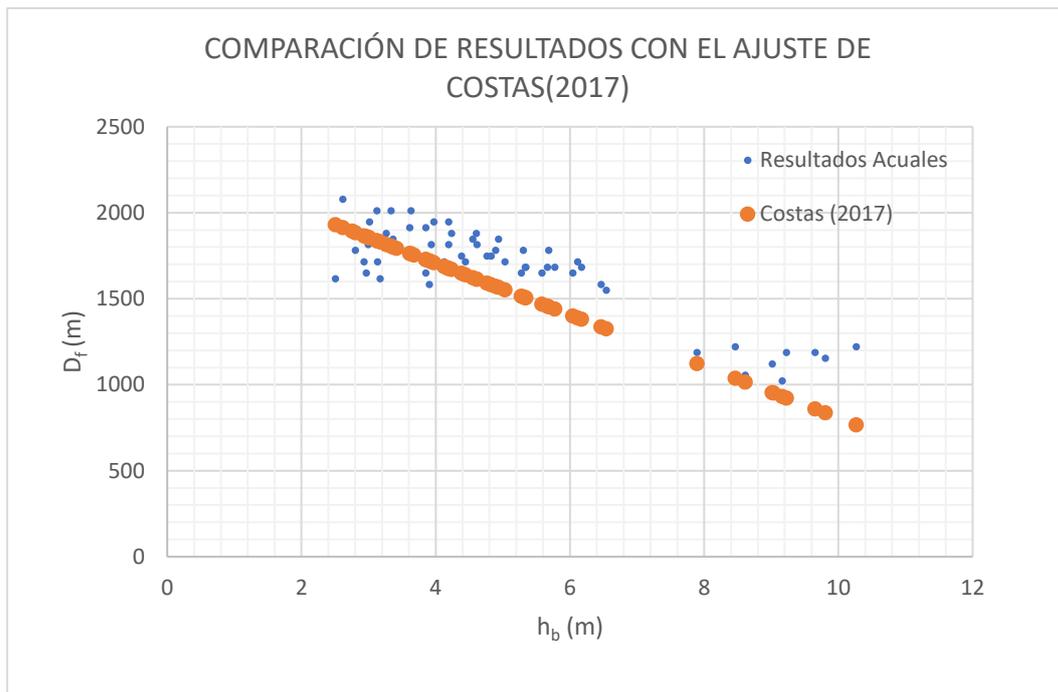


Figura 31: Comparación resultados actuales con la línea de ajuste de Costas (2017).

Como se observa en la imagen anterior, el ajuste que obtuvo Costas en 2017, se encuentra levemente por debajo de la nube de puntos obtenida en el estudio actual. El anterior desfase, se puede deber a las diferencias en las batimetrías empleadas en ambos estudios.

3.1.3.2. Ajuste con los resultados actuales

De la misma manera como se procedió en la obtención de la fórmula para P_b , se procedió con el objetivo de establecer una ecuación que permitiera estimar la distancia final de afección del bypass (D_f). De esta manera, inicialmente de manera gráfica se buscó establecer alguna correlación entre D_f y parámetros como el Período pico de la ola y la dirección de la misma, sin obtener resultados satisfactorios. Posteriormente, se graficó la variable D_f contra la profundidad de rotura del oleaje h_b , observando un patrón que permitía establecer una correlación.

En la Figura 32: Distancia Final de afección de bypass para $h_d = 5$ m y $D_{50} = 0.1$ mm., se muestra un ejemplo de la gráfica de D_f Vs h_b , para la geometría correspondiente al Perfil 1, con profundidad de morro de $h_d = 5$ m.

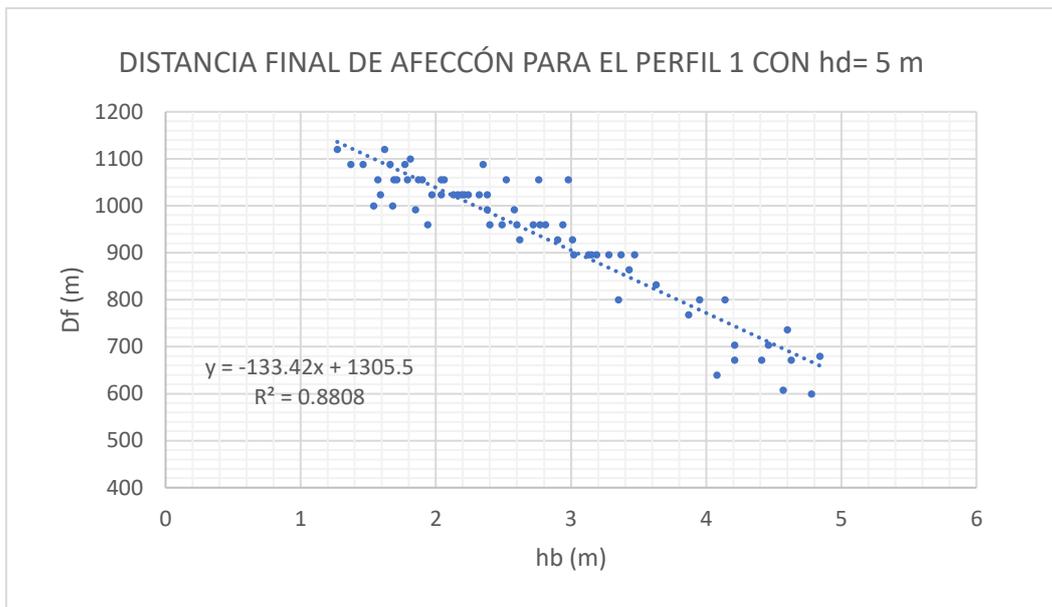


Figura 32: Distancia Final de afección de bypass para $h_d = 5$ m y $D_{50} = 0.1$ mm.

En la gráfica anterior, se observa que para esta geometría los resultados se ajustan con un Coeficiente R^2 de 0.88 a una línea recta. Estos resultados son parecidos a los obtenidos por Costas en 2017, con la diferencia que esta curva se localiza en valores de D_f superiores a los obtenidos por Costas, por ejemplo, el menor valor D_f registrado en el estudio de Costas en 2017 para una geometría de pendiente 1/100 y $h_d = 5$ m, es de 380 m, en este estudio se obtuvo un valor de D_f para la misma geometría de 600 m. Como ya se comentó anteriormente, estas diferencias obedecen a que Costas en 2017 empleó geometrías con perfiles lineales de pendiente constante, mientras que en este estudio se emplearon batimetrías con perfiles de Dean.

De esta manera, se corrobora lo establecido por Costas en 2017, referente a la correlación existente entre D_f y h_b , sin embargo, en aquel estudio solo se analizó una batimetría, razón por la cual, no se pudo establecer si esta ecuación variaba para diferentes perfiles batimétricos. Es por lo anterior que, en el presente estudio se incluyó como variable de análisis la pendiente del lecho, representada en diferentes perfiles de Dean. En la Figura 33, se muestran las nubes de puntos de los resultados obtenidos para las diferentes Geometrías analizadas con profundidad de morro $h_d = 5$ m.

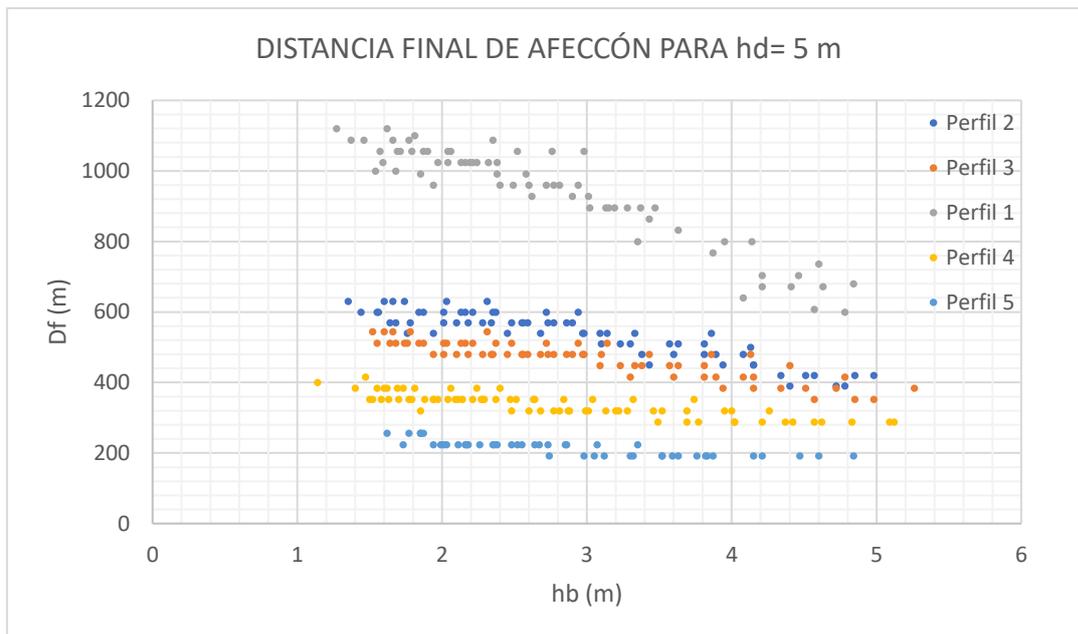


Figura 33: Distancia Final de afección de bypass para $h_d = 5$ m para todos los perfiles.

Como se puede observar en la Figura 33, la pendiente del perfil si tiene incidencia sobre la Distancia Final de afección del bypass, se observa que a medida que se incrementa la pendiente del perfil, la Distancia final de afección decrece. Lo anterior era esperable toda vez que, a mayor profundidad la velocidad es menor, propiciándose más rápidos las condiciones de decantación del grano.

De acuerdo con lo anterior, era necesario establecer una expresión matemática que tuviese en cuenta la influencia del perfil de playa en la determinación de la distancia final de afección del bypass. Sin embargo, dado que los que los perfiles de Dean no presentan pendiente constante, se optó por introducir la variable $\tan \alpha$, la cual representa la relación entre la profundidad de la estructura en el morro y la Longitud de la estructura. De acuerdo con lo anterior, la expresión es la siguiente:

$$\tan \alpha = \frac{h_d}{L} \tag{40}$$

Donde,

$\tan \alpha$ = Tangente media (m/m)

h_d = Profundidad del morro (m)

L = Longitud de la Estructura (m)

En la Figura 34, se presentan graficados los valores de $D_f \cdot \tan(\alpha)$ Vs h_d , observándose que de esta manera todos los resultados de los diferentes perfiles batimétricos se agrupan en una sola nube bien definida.

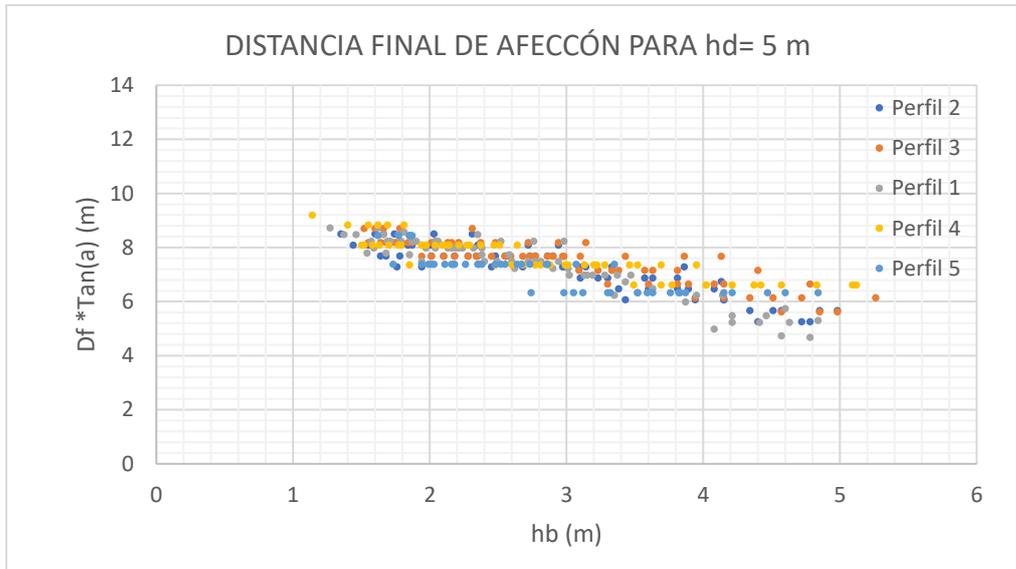


Figura 34: Distancia Final de afección del bypass incluida la influencia de la pendiente media del perfil.

El mismo procedimiento se siguió para las profundidades de morro de 10 m y 3 m, obteniendo los siguientes resultados.

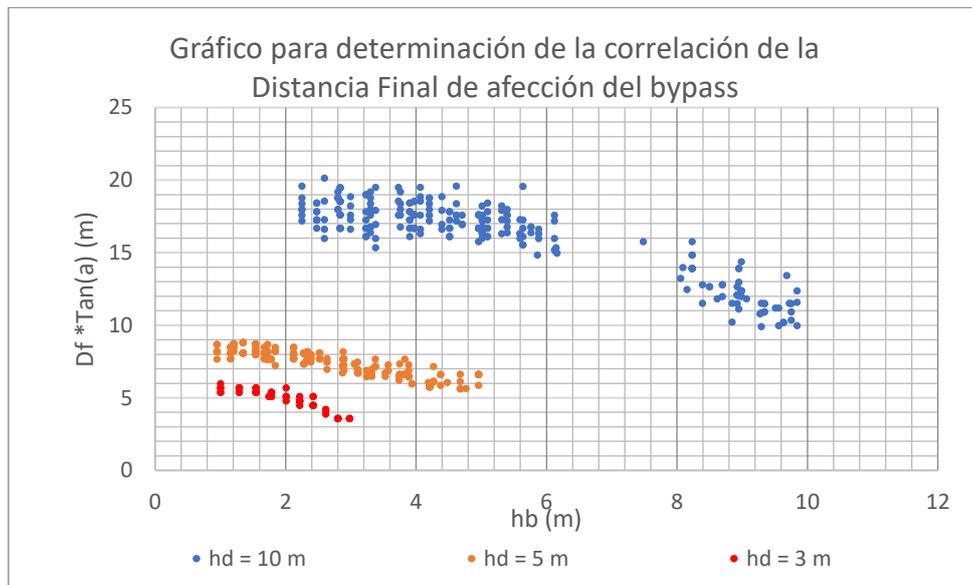


Figura 35: Valores de D_f para las diferentes profundidades de morro (h_d).

Dado que se observó en la Figura 35, que las nubes de puntos para cada h_d se encontraban paralelas unas de otras, se intentó establecer una ecuación que se ajustara adecuadamente para todas las geometrías. De esta manera se obtuvo la expresión 40, mostrada a continuación:



$$D_f \tan(\alpha) = -0.9h_b + 2h_d \quad (41)$$

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).
- $\tan \alpha$ = Tangente media (m/m)

Con el fin evidenciar el ajuste de la ecuación con los resultados obtenidos para las 3 diferentes profundidades de morro (h_d) analizadas, se presentan las siguientes gráficas. En estas se puede observar que el coeficiente de determinación R^2 fluctúa entre 0.78 y 0.83, lo cual se considera satisfactorio.

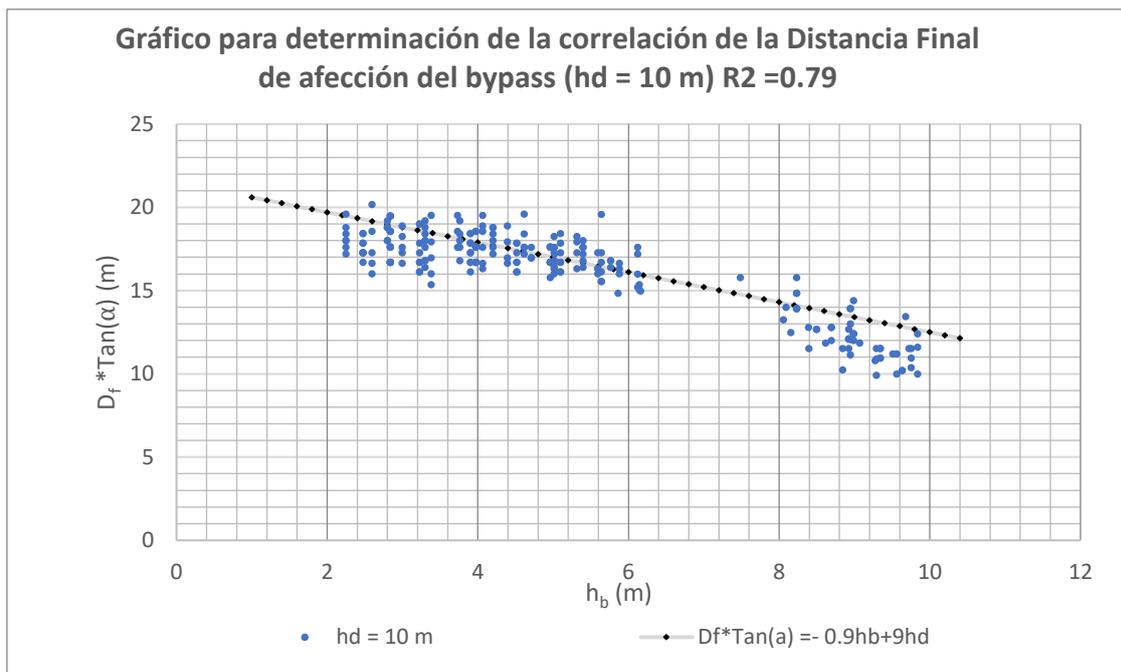


Figura 36: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=10$ m.

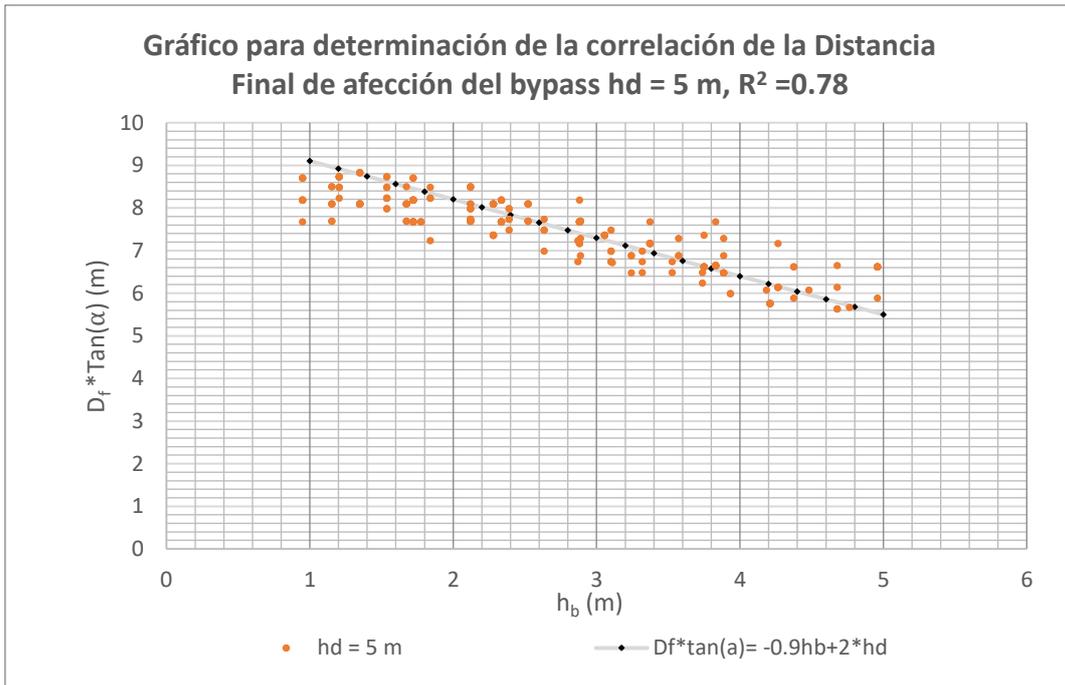


Figura 37: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=5$ m.

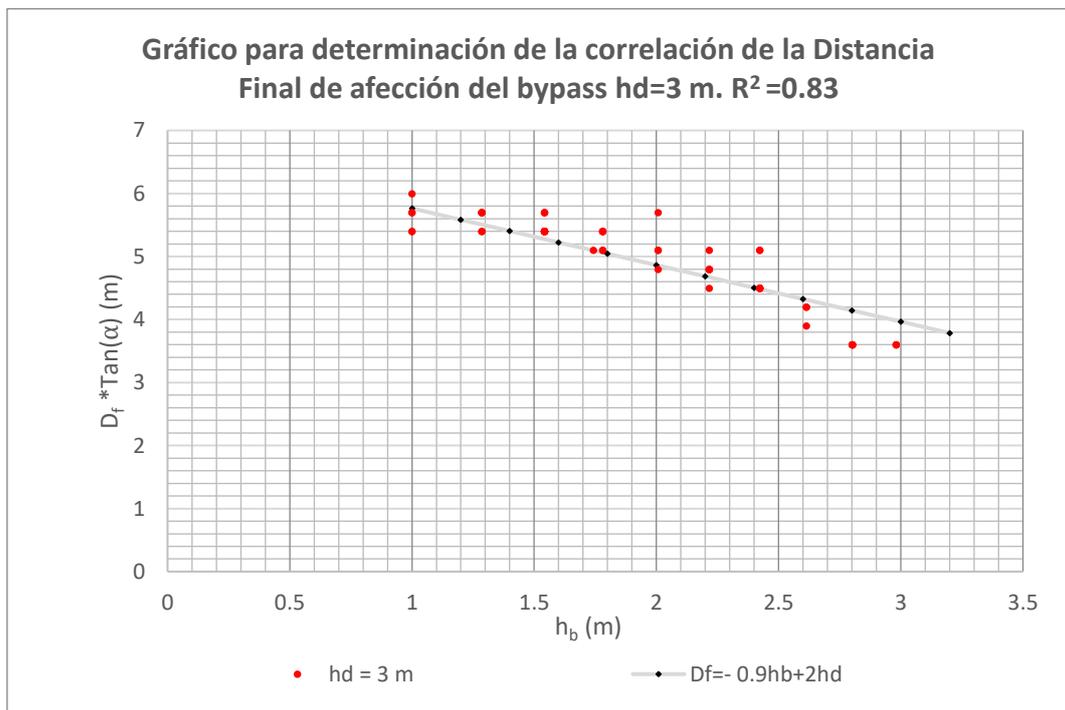


Figura 38: Correlación Distancia Final de afección para $h_d=3$ m.

3.1.3.3. Dependencia de D_f con el Ancho de la Estructura (B)

En la Figura 39, se comparan los resultados de D_i obtenidos para las geometrías 8 y 18, decir, dos geometrías con igual perfil y profundidad de morro, pero con anchos diferentes de la estructura. Esta grafica presentada a manera de ejemplo, demuestra

que el ancho de la estructura no introduce modificaciones significativas en la distancia final de afección del bypass.

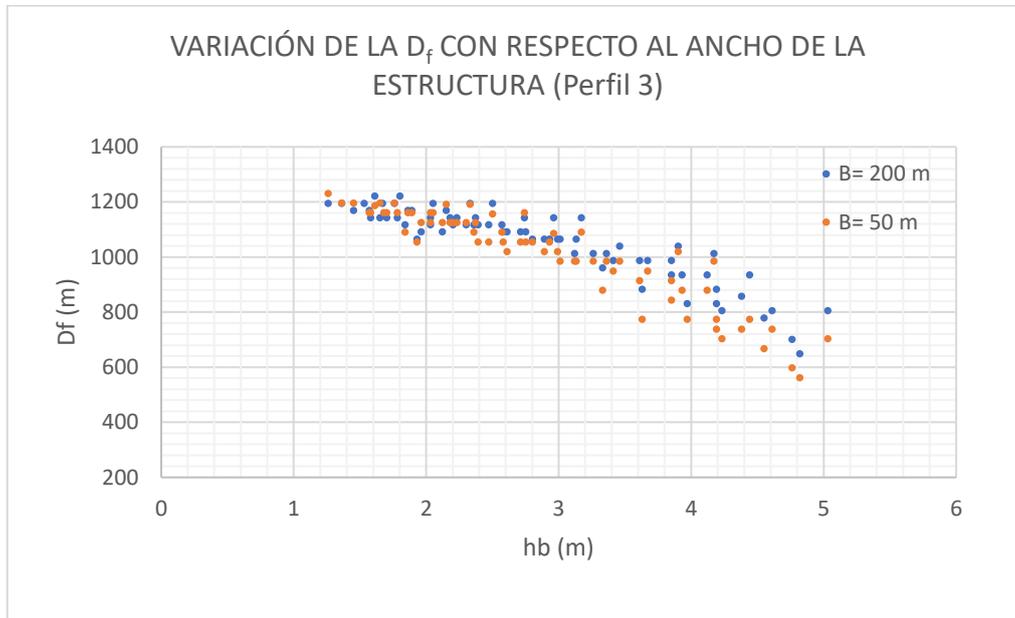


Figura 39: Variación de D_f para estructuras de diferente ancho en el perfil 1.

3.1.3.4. Dependencia de D_f con el diámetro de la partícula (D_{50})

Se pudo establecer que las distancias medias de afección inicial no varían con la variación Diámetro medio de la partícula en el rango analizado ($0.1 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$). Ver Figura 40.

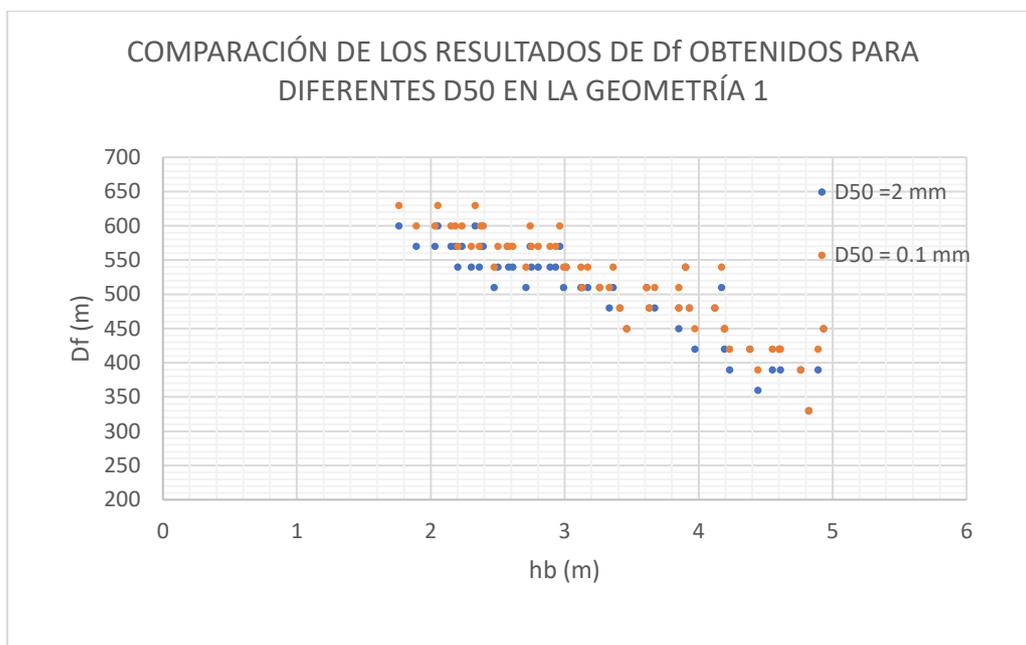


Figura 40: Variación de D_f respecto al diámetro medio de la partícula en el perfil 1.



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

En este numeral se mostrarán los resultados obtenidos en el ajuste de los parámetros b_1 y b_2 los cuales hacen parte de la función de ajuste de la distribución del sedimento del bypass.

3.1.4.1. Parámetro b_1

De la distribución de sedimento del bypass descrita en el numeral 2.3.2.4 ajustada a la formulación propuesta, ecuación (29), se obtienen los parámetros b_1 para cada caso. Siguiendo la metodología descrita, la misma que para los parámetros anteriores ajustados, se pudo establecer la dependencia de la variable con los parámetros, h_b y la pendiente media ($\tan(\alpha)$). Lo anterior se puede observar claramente en la Figura 41, mostrada a continuación:

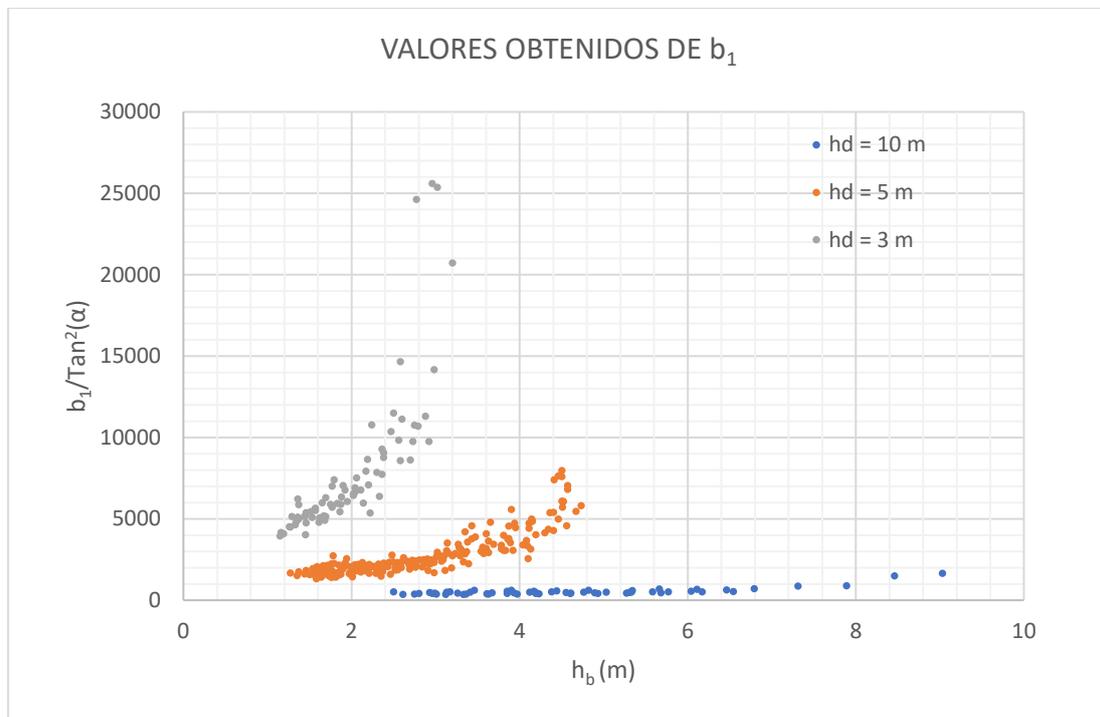


Figura 41: Valores de b_1 obtenidos para las diferentes profundidades de morro (h_d)

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 el parámetro b_1 :

$$\frac{b_1}{(\tan \alpha)^2} = \frac{(28000)}{h_d^2} \exp \left[5 \frac{h_b^{1.5}}{h_d^2} \right] \quad (42)$$



Donde:

- b_1 = Variable de ajuste
- h_d = profundidad en el morro de la estructura (m).
- h_b = profundidad de rotura (m).
- $Tan(\alpha)$ = pendiente media del perfil batimétrico (m/m).

En las siguientes imágenes, se muestra el ajuste de la ecuación 41 para cada una de las 3 profundidades de morros analizados en el presente trabajo.

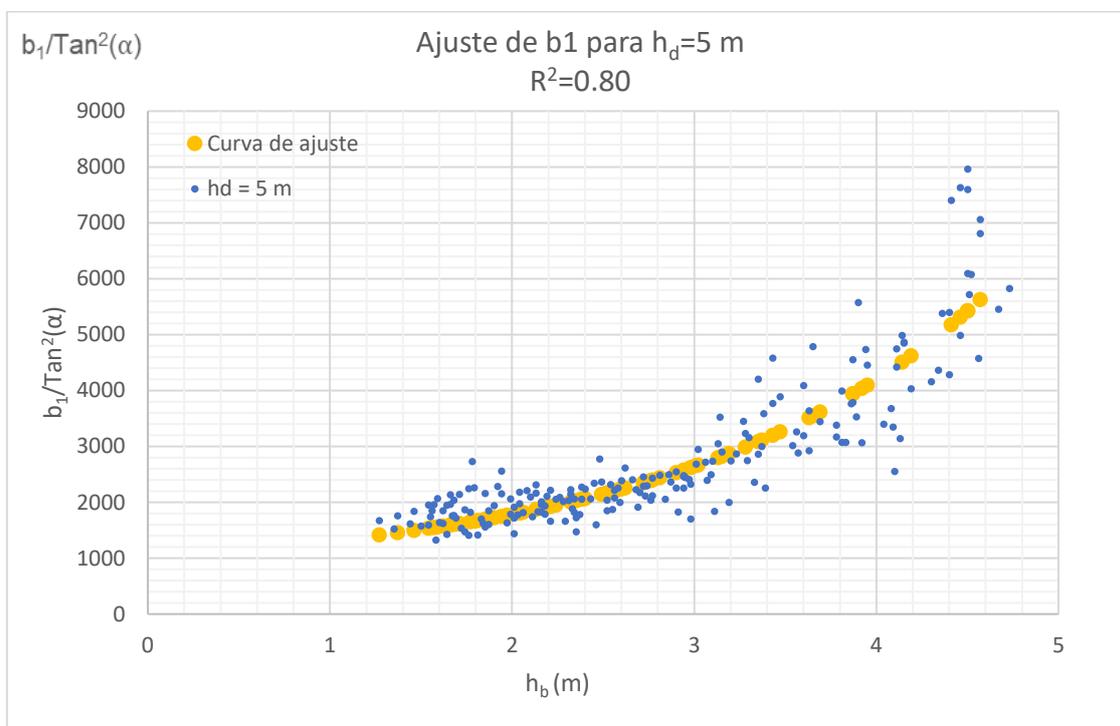


Figura 42: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 5 m.

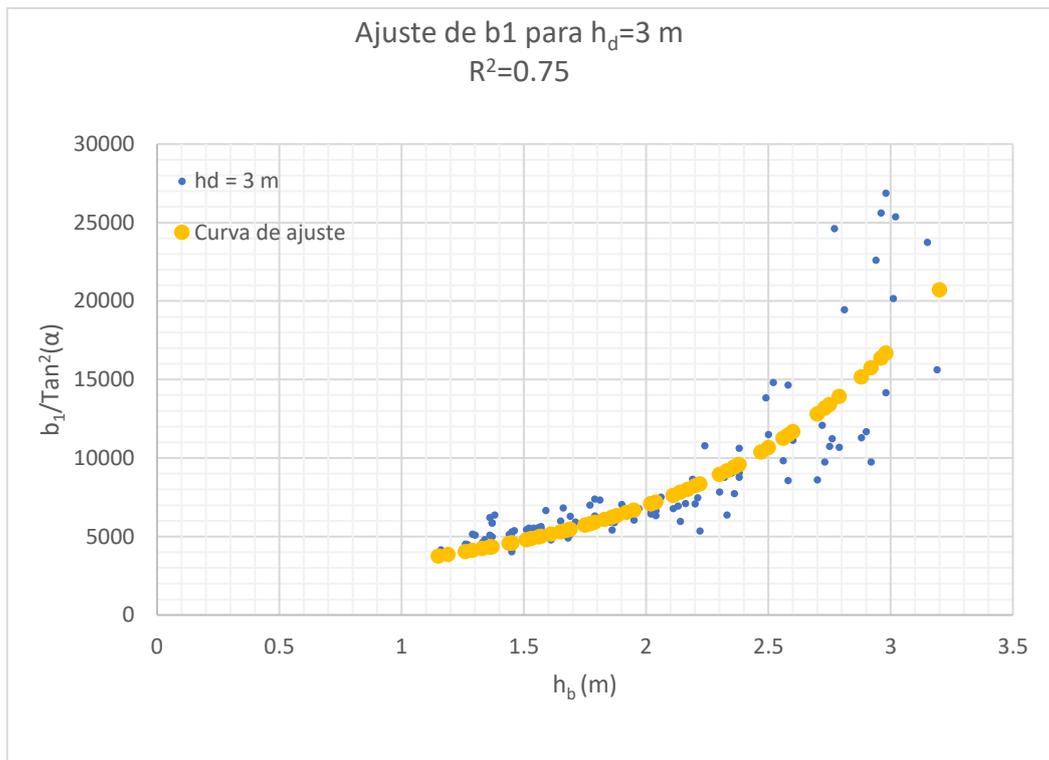


Figura 43: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 3 m.

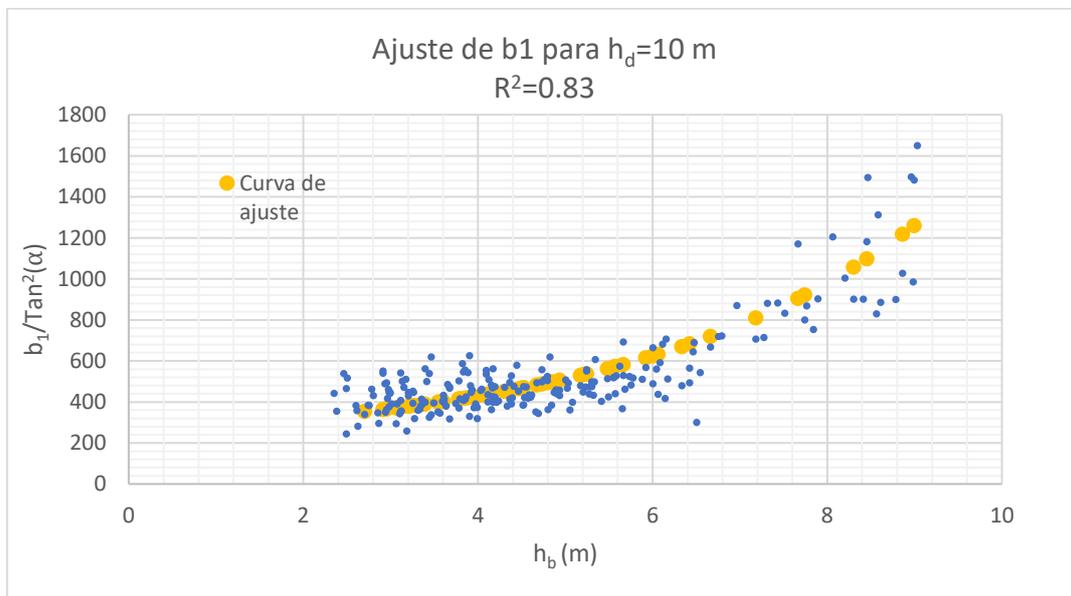


Figura 44: Ajuste del parámetro b_1 para una profundidad de morro de 10 m.

Los ajustes obtenidos a funciones exponenciales se consideran satisfactorios, dado que el coeficiente de correlación R^2 es de 0.75 en el peor de los casos.



3.1.4.2. Parámetro b_2

De la distribución de sedimento del bypass descrita en el numeral 2.3.2.4 ajustada a la formulación propuesta, ecuación (29), se obtienen los parámetros b_2 para cada caso. Siguiendo la metodología descrita, la misma que para los parámetros anteriores ajustados, se pudo establecer la dependencia de la variable con los parámetros, h_b y la pendiente media $Tan(\alpha)$.

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 el parámetro b_2 :

$$\frac{b_2}{(\tan \alpha)^2} = \frac{6}{h_d^2} \exp \left[\frac{1.2h_b^{2.3}}{h_d^2} \right] \quad (43)$$

Donde:

- b_2 = Variable de ajuste
- h_d = profundidad en el morro de la estructura (m).
- h_b = profundidad de rotura (m).
- $Tan(\alpha)$ = pendiente media del perfil batimétrico (m/m).

En las siguientes imágenes, se muestra el ajuste de la ecuación 42 para cada una de las 3 profundidades de morros analizados en el presente trabajo.

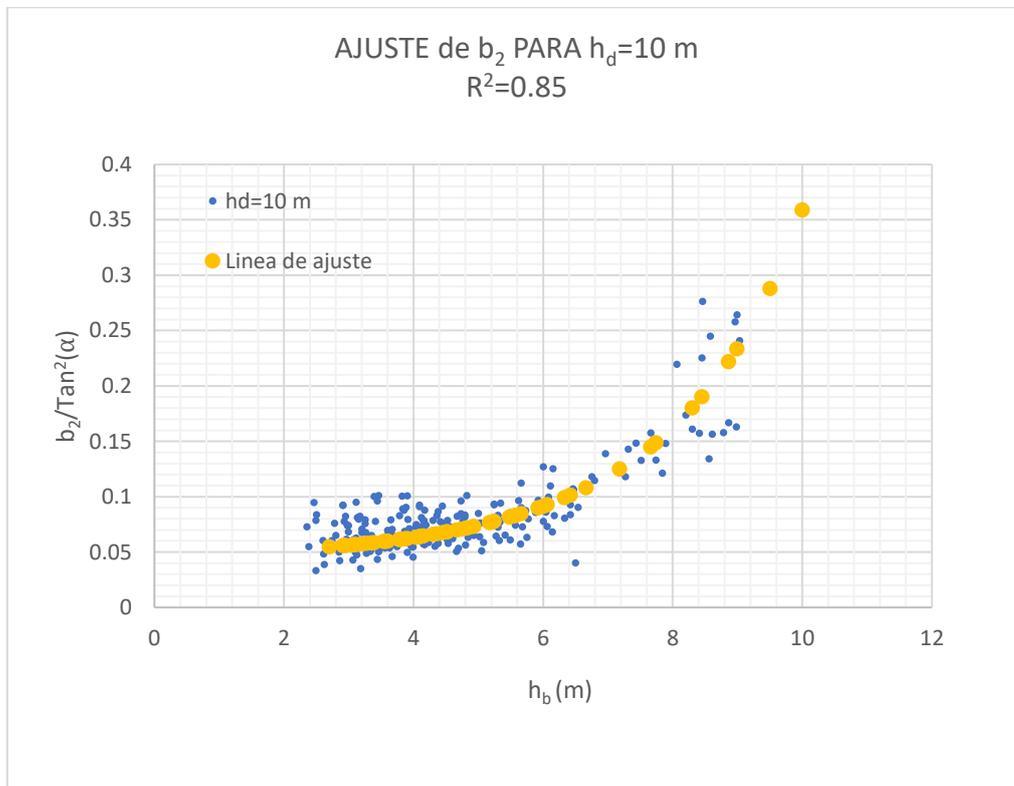


Figura 45: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 10 m.

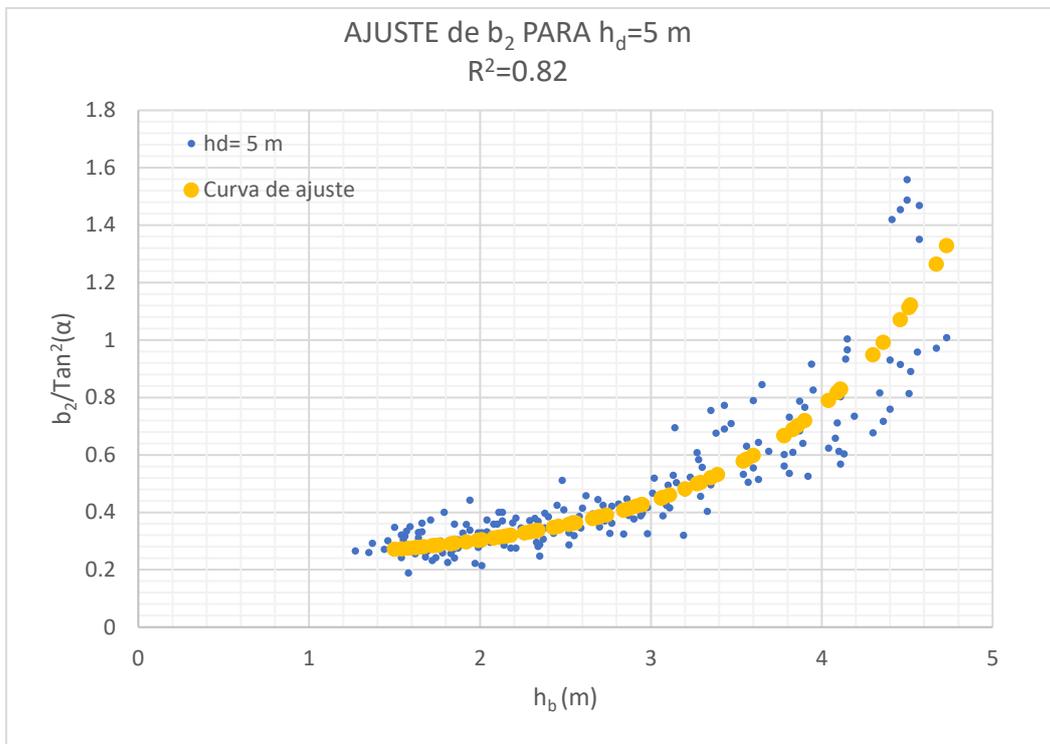


Figura 46: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 5 m.

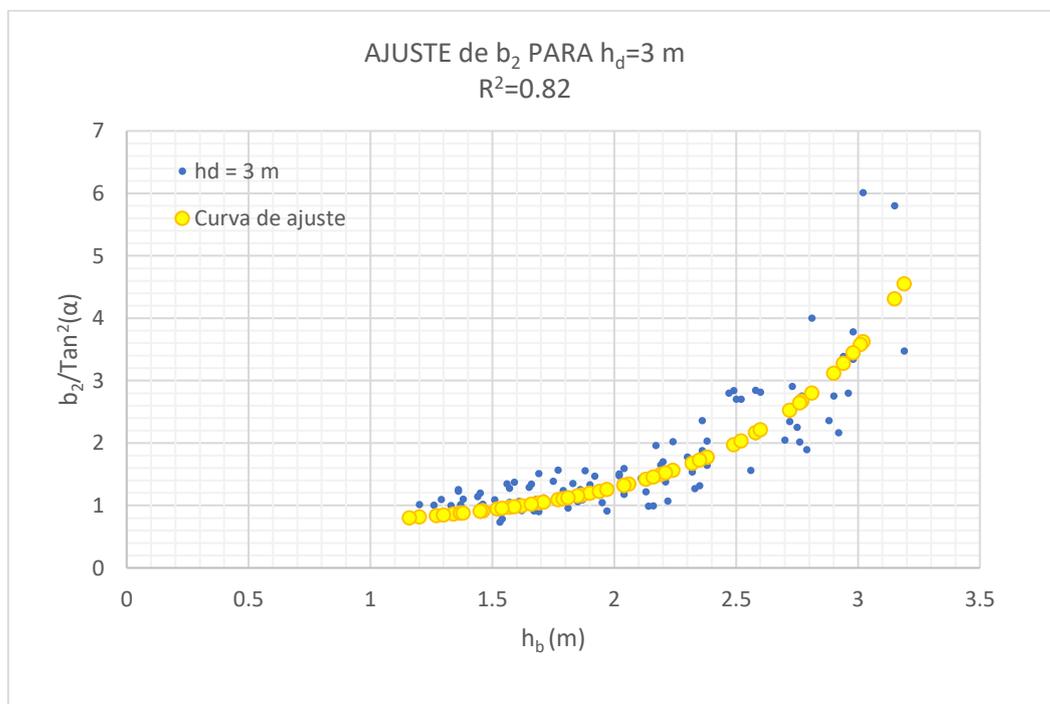


Figura 47: Ajuste del parámetro b_2 para una profundidad de morro de 3m.



Los ajustes obtenidos a funciones exponenciales se consideran satisfactorios, dado que el coeficiente de correlación R^2 es de 0.73 en el peor de los casos. Adicionalmente, es importante resaltar, que no se consigue un mejor ajuste dado que la discretización del de la batimetría a través de la malla del modelo, genera varios calores b_1 para el mismo valor de h_b . Esta situación se presenta, dado que el criterio de obtención de la profundidad de rotura es el de máxima velocidad, la cual solo varía cada 32 m que es el ancho de la celda.

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 puede establecer que la **tasa de bypass, P_b** , solo guarda dependencia con el cociente entre profundidad en rotura y profundidad en el morro de la estructura. Este parámetro, es independiente de variables como Período y Dirección del oleaje, pendiente de playa, diámetro del sedimento y ancho de la estructura. La ecuación obtenida se presenta a continuación:

$$P_b = 90 \left(\frac{h_b}{h_d} \right)^3$$

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)

Esta expresión presenta altos valores latos de correlación con los resultados obtenidos en las 20 geometrías analizadas. El valor del coeficiente general de correlación R^2 es de 0.967.

- No se obtuvo un ajuste satisfactorio para la parametrización de la **distancia inicial de afección del bypass (D_i)**, lo anterior debido a que la proximidad de la estructura genera ruido numérico en los resultados arrojados por el modelo corrientes MOPLA. Por tal razón, se promediaron los resultados obtenidos para cada geometría analizada y graficarlos contra la pendiente media de la playa ($\tan(\alpha)$). De esta manera se pudo obtener un ajuste exponencial de los valores medios de D_i y $\tan(\alpha)$, con una correlación de 0.87. Este parámetro, es independiente de variables como diámetro del sedimento y ancho de la estructura. La expresión obtenida se presenta a continuación:

$$D_i = 46.038(\tan \alpha)^{-0.354}$$



Donde,

D_i = Distancia promedio de Afección Inicial (m)

$Tan(\alpha) = \frac{h_d}{L}$ = Pendiente media del lecho (m/m)

- Se logró obtener una expresión matemática que representara adecuadamente el comportamiento de la variable **distancia final de afección del bypass (Df)**. Esta expresión matemática establece que el parámetro D_f guarda correlación directa con las variables profundidad de rotura h_b , profundidad del morro h_d y la pendiente media del perfil batimétrico $Tan(\alpha)$. Así mismo es importante resaltar que se obtuvieron ajustes satisfactorios para este parámetro, ya que se obtuvieron coeficientes de correlación por encima de 0.78. Este parámetro, es independiente de variables como Período y Dirección del oleaje, pendiente de playa, diámetro del sedimento y ancho de la estructura. A continuación, se presenta la expresión obtenida.

$$D_f \tan(\alpha) = -0.9h_b + 2h_d$$

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).

$\tan \alpha$ = Tangente media (m/m)

h_d = Profundidad del morro (m)

L = Longitud de la Estructura (m)

- Se ha ajustado la **distribución del bypass, Q_e** , con dos parámetros independientes en función de la profundidad de rotura, la pendiente media del perfil batimétrico y la profundidad en el morro de la estructura. Del cálculo de los estadísticos de ajuste se obtiene que los errores son bajos y la correlación alta. Estos parámetros, son independiente de variables como Período y Dirección del oleaje, diámetro del sedimento y ancho de la estructura. Las expresiones para estas variables de ajustes son las siguientes:

$$\frac{b_1}{(\tan \alpha)^2} = \frac{(28000)}{h_d^2} \exp \left[5 \frac{h_b^{1.5}}{h_d^2} \right]$$

$$\frac{b_2}{(\tan \alpha)^2} = \frac{6}{h_d^2} \exp \left[\frac{1.2h_b^{2.3}}{h_d^2} \right]$$

Donde:



b_1 y b_2 = Variables de ajuste

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

h_b = profundidad de rotura (m).

$Tan(\alpha)$ = pendiente media del perfil batimétrico (m/m).

- Es importante resaltar que si bien todas las expresiones matemáticas obtenidas durante este análisis, no incluyen directamente la variable D_{50} , estas si guardan relación indirecta con dicha variable, toda vez que los perfiles de Dean empleados en las geometrías, dependen directamente del tamaño de la partícula. De igual manera, las pendientes medias de estos perfiles, fueron empleadas para estimar la profundidad de rotura según el criterio de Goda (1975).

Las expresiones matemáticas a las que se llegó durante el desarrollo de esta investigación, corroboraron que las expresiones obtenidas por Costas, 2017 representaban adecuadamente el fenómeno de bypass de arena hacia aguas abajo de una estructura, sin embargo, requerían de mayores datos para poder ser ajustadas a un mayor universo de resultados y parámetros. En este sentido, las ecuaciones obtenidas en esta investigación, se consideran más robustas y podrían ser incluidas en el Modelo CHRONOS, para dotarlo de una herramienta capaz de estimar el caudal de sedimentos que pasan aguas abajo de una estructura y la manera como este se distribuirá.

4.2. Futuras líneas de investigación

Dado que la presencia de estructuras tipo espigón propicia un proceso de acreción aguas arriba de la esta y uno de erosión en la parte aguas abajo, se considera importante a futuro incluir en el análisis geometrías con línea de costa discontinua, en las que ésta se encuentre avanzada en el sector aguas arriba de la estructura.



Bibliografía

- Costas, R. (2017)- Análisis de bypass de sedimentos en estructuras.
- 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: Departament 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