



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

PROYECTO TÉCNICO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE  
DIFERENTES METODOLOGÍAS PARA EL  
CÁLCULO DE CORRIENTES LITORALES  
GENERADAS POR EL OLEAJE

AUTOR:

MANUEL JOSÉ GARCÍA PIMENTEL

TUTOR:

LUIS CEA GÓMEZ

E.T.S DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DICIEMBRE DE 2013



# Índice general

<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado del conocimiento</b>	<b>5</b>
2.1. Modelos de propagación de oleaje . . . . .	5
2.1.1. Modelos promediados en fase . . . . .	5
2.1.2. Modelos que resuelven la fase . . . . .	8
2.2. Modelos de circulación costera . . . . .	11
2.2.1. Modelos que resuelven las ecuaciones 3D RANS . . . . .	11
2.2.2. Modelos de aguas someras 3D (3D-SWE) . . . . .	11
2.2.3. Modelos de aguas someras 2D (2D-SWE) . . . . .	12
2.3. SWAN . . . . .	13
2.4. SWASH . . . . .	15
2.5. Iber . . . . .	15
2.6. FreeFlow 3D . . . . .	16
2.7. Formulaciones de interacción oleaje-corriente . . . . .	17
2.7.1. Formulación de Phillips (1977) . . . . .	17
2.7.2. Formulación de Mellor (2003) . . . . .	18
2.7.3. Formulación de Mellor (2008) . . . . .	19
<b>3. Corrientes generadas por el oleaje en un canal de batimetría variable</b>	<b>21</b>
3.1. Descripción del caso de análisis . . . . .	21
3.2. Resultados con SWAN e Iber . . . . .	23
3.2.1. Procedimiento y malla . . . . .	23
3.2.2. Resultados . . . . .	23
<b>4. Corrientes generadas por el oleaje tras un dique exento</b>	<b>29</b>
4.1. Descripción del caso de análisis . . . . .	29

4.2.	Resultados con SWAN . . . . .	30
4.2.1.	Caso C1 . . . . .	31
4.2.2.	Caso C2 . . . . .	32
4.2.3.	Caso C3 . . . . .	32
4.3.	Comparación de las fuerzas inducidas por el oleaje, calculadas con diferentes formulaciones interacción oleaje-corriente . . . . .	34
4.3.1.	Procedimiento de análisis . . . . .	34
4.3.2.	Caso C1 . . . . .	35
4.3.3.	Caso C2 . . . . .	37
4.3.4.	Caso C3 . . . . .	39
4.3.5.	Conclusiones . . . . .	42
4.4.	Resultados con Iber . . . . .	43
4.4.1.	Resultados . . . . .	43
4.4.2.	Conclusiones . . . . .	50
4.5.	Resultados con Freeflow . . . . .	51
4.5.1.	Procedimiento de cálculo . . . . .	51
4.5.2.	Resultados . . . . .	51
4.5.3.	Conclusiones . . . . .	57
4.6.	Resultados con SWASH . . . . .	57
4.6.1.	Procedimiento de cálculo . . . . .	57
4.6.2.	Resultados . . . . .	59
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>

# Índice de figuras

1.1.	<i>Esquema del planteamiento del proyecto técnico . . . . .</i>	3
2.1.	<i>Descomposición de un registro de elevación de la lámina de agua en ondas con diferentes frecuencias y amplitudes, Holthuijsen (2007) . . . . .</i>	6
2.2.	<i>Obtención del espectro del oleaje a partir de los pares de valores <math>(a_i, f_i)</math>, Holthuijsen (2007) . . . . .</i>	6
2.3.	<i>Representación del oleaje como serie temporal de altura de lámina de agua, en los modelos que resuelven la fase . . . . .</i>	8
2.4.	<i>Ejemplo de malla con capas sigma en la Ría de Arousa (izquierda) y flujo estratificado sobre un fondo con forma de duna (derecha) en FreeFlow 3D . . . . .</i>	16
3.1.	<i>Batimetría del fondo en el caso test 1D de Roseau (1976) . . . . .</i>	21
3.2.	<i>Tabla de validez de las teorías de oleaje (izquierda) (Holthuijsen (2007)) y espectros de oleaje irregular tipo Jonswap correspondientes a los tres casos estudiados (derecha) . . . . .</i>	22
3.3.	<i>Malla 2D utilizada en el caso test Roseau en el modelo Iber . . . . .</i>	23
3.4.	<i>Batimetría correspondiente al test Roseau modelizada en Iber . . . . .</i>	23
3.5.	<i>Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C1 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	24
3.6.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección <math>x</math> calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C1 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	24
3.7.	<i>Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C2 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	25
3.8.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección <math>x</math> calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C2 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	26

3.9.	<i>Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C3 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	26
3.10.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C3 considerando oleaje monocromático y espectral . . . . .</i>	27
4.1.	<i>Batimetría en el caso de corrientes generadas tras un dique exento . . .</i>	29
4.2.	<i>Malla no estructurada utilizada en el cálculo en SWAN . . . . .</i>	30
4.3.	<i>Localización de las secciones S1 y S2 . . . . .</i>	31
4.4.	<i>Altura de ola significativa en las secciones S1 (izquierda) y S2 (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C1 . . . . .</i>	31
4.5.	<i>Distribución de altura de ola significativa en el Caso C1 con oleaje monocromático regular . . . . .</i>	32
4.6.	<i>Altura de ola significativa en las secciones S1 (izquierda) y S2 (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C2 . . . . .</i>	33
4.7.	<i>Distribución de altura de ola significativa en el Caso C2 con oleaje monocromático regular . . . . .</i>	33
4.9.	<i>Distribución de altura de ola significativa en el Caso C3 con oleaje monocromático regular . . . . .</i>	33
4.8.	<i>Altura de ola significativa en las secciones S1 (izquierda) y S2 (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C3 . . . . .</i>	34
4.10.	<i>Localización de los puntos de análisis . . . . .</i>	35
4.11.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P1 para el caso C1 . . . . .</i>	35
4.12.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P2 para el caso C1 . . . . .</i>	36
4.13.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P3 para el caso C1 . . . . .</i>	36
4.14.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P4 para el caso C1 . . . . .</i>	37
4.15.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P1 para el caso C2 . . . . .</i>	38
4.16.	<i>Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P2 para el caso C2 . . . . .</i>	38

4.17. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P3$ para el caso $C2$ . . . . .	38
4.18. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P4$ para el caso $C2$ . . . . .	39
4.19. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P5$ para el caso $C2$ . . . . .	39
4.20. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P1$ para el caso $C3$ . . . . .	40
4.21. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P2$ para el caso $C3$ . . . . .	40
4.22. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P3$ para el caso $C3$ . . . . .	41
4.23. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P4$ para el caso $C3$ . . . . .	41
4.24. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ (izquierda) y en dirección $y$ (derecha), en el punto $P5$ para el caso $C3$ . . . . .	42
4.25. Malla no estructurada utilizada en el cálculo en Iber . . . . .	43
4.26. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C1$ . . . . .	44
4.27. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C1$ . . . . .	44
4.28. Velocidad promediada en profundidad en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C1$ . . . . .	44
4.29. Velocidad promediada en profundidad en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C1$ . . . . .	45
4.30. Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en Caso $C1$ con oleaje regular monocromático . . . . .	45
4.31. Variación de la lámina de agua en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C1$ . . . . .	45
4.32. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C2$ . . . . .	46
4.33. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C2$ . . . . .	46
4.34. Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en Caso $C2$ con oleaje regular monocromático . . . . .	47

4.35. Velocidad promediada en profundidad en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C2$ . . . . .	47
4.36. Velocidad promediada en profundidad en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C2$ . . . . .	48
4.37. Variación de la lámina de agua en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C2$ . . . . .	48
4.38. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C3$ . . . . .	49
4.39. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C3$ . . . . .	49
4.42. Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en el Caso $C3$ con oleaje regular monocromático	49
4.40. Velocidad promediada en profundidad en dirección $x$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C3$ . . . . .	50
4.41. Velocidad promediada en profundidad en dirección $y$ en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C3$ . . . . .	50
4.43. Variación de la lámina de agua en la sección $S1$ (izquierda) y sección $S2$ (derecha) para el caso $C3$ . . . . .	50
4.44. Malla utilizada en el cálculo con <i>Freeflow 3D</i> . . . . .	52
4.45. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Phillips (1977) . . . . .	52
4.46. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $y$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Phillips (1977) . . . . .	53
4.47. Presión de la columna de agua (izquierda) y velocidad en dirección $x$ en el caso $C3$ , obtenidas en <i>Freeflow</i> con la formulación de Phillips (1977)	53
4.48. Velocidad en dirección $x$ obtenida con <i>Freeflow</i> (izquierda) y velocidad promediada en profundidad dirección $x$ obtenida con <i>Iber</i> (derecha), para el caso $C3$ con oleaje irregular. . . . .	54
4.49. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2003) . . . . .	55

4.50. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $y$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2003) . . . . .	55
4.51. Presión de la columna de agua (izquierda) y velocidad en dirección $x$ en el caso C3, obtenidas en Freeflow 3D con la formulación de Mellor (2003)	56
4.52. Fuerza inducida por el oleaje en dirección $x$ . En la superficie (izquierda) y en un plano a 2 metros de profundidad (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2008) . . . . .	56
4.53. Presión de la columna de agua(izquierda) y velocidad en dirección $x$ en el caso C3, calculadas en Freeflow 3D con la formulación de Mellor (2008)	56
4.54. Altura de ola significativa con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C1) . . . .	60
4.55. Velocidad media integrada en profundidad en dirección $x$ con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C1) . . . . .	60
4.56. Altura de ola significativa con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C2) . . . .	61
4.57. Velocidad media integrada en profundidad en dirección $x$ con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C2) . . . . .	61
4.58. Altura de ola significativa (izquierda) y velocidad media integrada en profundidad en dirección $x$ (derecha) con condiciones de oleaje regular en el cálculo realizado con SWASH (Caso C3) . . . . .	62



# Índice de tablas

2.1. Modelos numéricos promediados en fase . . . . .	7
2.2. Modelos numéricos que resuelven la ecuación de la Pendiente Suave . .	9
2.3. Principales características del modelo SWAN . . . . .	14
3.1. Parámetros utilizados en cada uno de los casos de estudio . . . . .	22
4.1. Parámetros utilizados en cada uno de los casos de estudio . . . . .	34



# 1

## Introducción y objetivos

La propagación del oleaje en las regiones costeras genera corrientes relevantes que es necesario considerar en el análisis de los procesos costeros tales como el transporte de sedimentos o dispersión de solutos y/o contaminantes. El procedimiento más general para calcular las corrientes generadas por el oleaje consiste en el cálculo mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones 3D promediadas de Reynolds (3D-RANS), en el cual se resuelven la propagación del oleaje y las corrientes generadas por dicho oleaje al mismo tiempo. El problema de este enfoque es que para resolver adecuadamente la propagación del oleaje se necesitan tamaños de malla de por lo menos un orden de magnitud menor que la longitud de onda; siendo este requisito no asumible en grandes regiones costeras, que implican escalas espaciales y temporales mucho más grandes que la longitud de onda y el período.

Alternativamente a este procedimiento las fuerzas que genera el oleaje pueden incluirse en un modelo hidrodinámico de corrientes. De esta forma, los efectos que produce el oleaje en la circulación se calculan a partir de una formulación de interacción entre oleaje y corriente que depende del campo de oleaje (altura, longitud de onda y dirección de propagación). Con este procedimiento, la propagación del oleaje no se resuelve en el modelo hidrodinámico, lo cual permite utilizar una discretización espacial y temporal mayor. Este enfoque requiere una evaluación previa del campo de oleaje con un modelo de propagación de oleaje, pero al mismo tiempo se reduce de manera significativa el tiempo de cálculo del modelo hidrodinámico, ya que el tamaño de los elementos de la malla no está limitado por la longitud de onda. Los modelos hidrodinámicos, tanto 2D como 3D, necesitan como parámetro de entrada las fuerzas inducidas por el oleaje sobre la masa de agua, de tal forma que se incluya el elemento forzador del oleaje sobre

esta. Por otro lado, se requiere una formulación que defina estas fuerzas generadas con el fin de ser introducidas en el modelo hidrodinámico.

Existe un consenso general en la derivación de las fuerzas promediadas en profundidad que se deben utilizar en los modelos 2D integrados verticalmente (Phillips (1977)). Sin embargo, en lo que se refiere a la distribución de dichas fuerzas en la vertical, en los últimos años se han propuesto y utilizado diversas formulaciones para modelar la dependencia con la profundidad de las fuerzas inducidas por el oleaje en modelos hidrodinámicos costeros 3D. Las limitaciones teóricas y prácticas de algunas de estas teorías han sido recientemente reconocidas por Ardhuin et al. (2008a), Mellor (2008) y Bennis y Ardhuin (2011). En la formulación de Mellor (2003), se ha probado en Ardhuin et al. (2008a) que la distribución vertical de las fuerzas inducidas por el oleaje no son válidas en el caso de oleaje con asomeramiento y sin rotura; mientras que en Bennis y Ardhuin (2011), se argumenta que el hecho de que la integral en profundidad de las tensiones de radiación propuestas por Mellor (2008) sean iguales a las propuestas por Phillips (1977) no implica que las fuerzas promediadas en profundidad sean necesariamente iguales.

El objetivo de este proyecto técnico es comparar los resultados obtenidos con diferentes formulaciones de interacción ola-corriente (Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008)) que se han implementado en un modelo hidrodinámico basado en las ecuaciones 3D-RANS (Cea et al. (2009)). Se estudian también las corrientes generadas mediante el modelo hidrodinámico 2D, Iber (Bladé et al. (2013)), a partir de las fuerzas inducidas por el oleaje y calculadas mediante SWAN (Ziljema (2010)). Los resultados obtenidos con las formulaciones anteriores también se han comparado con los obtenidos con un modelo 3D no hidrostático que resuelve la propagación de oleaje y las corrientes al mismo tiempo (SWASH, Ziljema (2011)). Se estudiarán dos casos:

1. La propagación de oleaje y corrientes generadas en un canal rectilíneo con fondo variable siguiendo la batimetría definida en Roseau (1976).
2. La propagación de oleaje y corrientes generadas detrás de un dique exento definido en Nicholson et al. (1997).

Para cada uno de los dos casos anteriores se analizarán condiciones de oleaje monocromático y de oleaje irregular, con diferentes periodos y alturas de ola, con el fin de estudiar la influencia en los resultados de los efectos no lineales del oleaje.

La Figura 1.1 muestra un esquema de las tareas realizadas en el presente proyecto técnico.

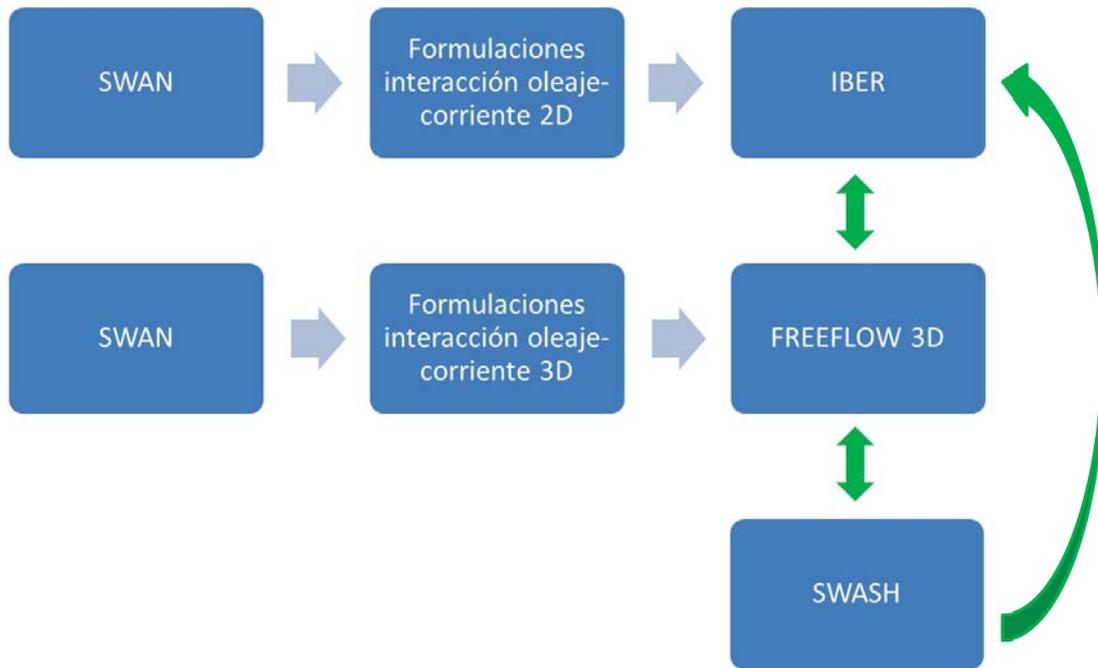


Figura 1.1: *Esquema del planteamiento del proyecto técnico*



## 2

# Estado del conocimiento

El presente capítulo presenta los diversos tipos de modelos numéricos que existen en la actualidad, tanto para la propagación de oleaje como para el cálculo de corrientes en zonas costeras, así como las diferentes formulaciones de interacción oleaje-corriente analizadas en este trabajo.

### 2.1. Modelos de propagación de oleaje

La correcta elección de un modelo de propagación de oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras es un aspecto importante que conviene decidir en función del caso a estudiar. Actualmente existen una gran variedad de modelos numéricos de propagación de oleaje. Estos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. Modelos que promedian la fase.
2. Modelos que resuelven la fase.

#### 2.1.1. Modelos promediados en fase

Los modelos promediados en fase se basan en la teoría espectral del oleaje. Esta teoría caracteriza al oleaje como una suma de ondas de diferentes amplitudes y frecuencias (Figuras 2.1 y 2.2), que definen la función de densidad espectral del oleaje.

Los modelos que promedian la fase se basan en la ecuación de conservación de la

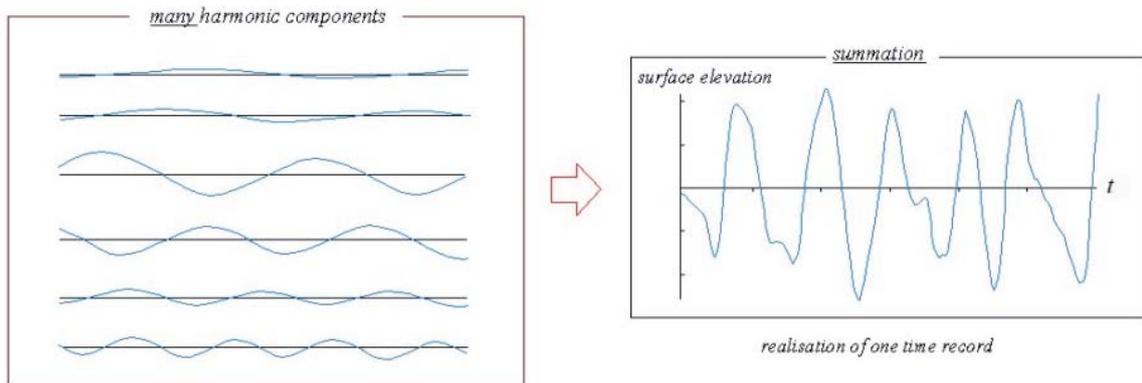


Figura 2.1: Descomposición de un registro de elevación de la lámina de agua en ondas con diferentes frecuencias y amplitudes, Holthuijsen (2007)

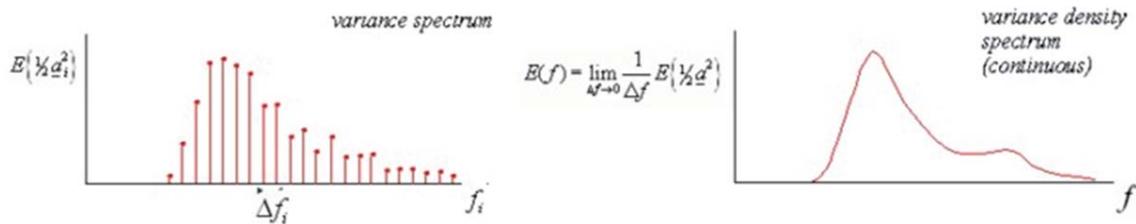


Figura 2.2: Obtención del espectro del oleaje a partir de los pares de valores  $(a_i, f_i)$ , Holthuijsen (2007)

energía espectral:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta; x, y, t) \quad (2.1)$$

dónde  $E(f, \theta; x, y, t)$  es el espectro de densidad de energía,  $C_{g,x}$  y  $C_{g,y}$  son las celeridades de grupo en dirección x e y respectivamente,  $C_{\theta}$  representa la refracción a causa de la variación de fondo y corrientes, y  $S(f, \theta; x, y, t)$  es el termino fuente en términos de densidad de energía. Los modelos que resuelven la ecuación anterior realizan la propagación del espectro del oleaje directamente, calculando a partir de este la energía del oleaje o la altura de ola, pero produciéndose con ello la pérdida de información de la fase.

Con este tipo de modelos, una vez propagado el espectro del oleaje no es posible determinar de forma determinista cuál es la variación del nivel de la lámina de agua con respecto al tiempo, ya que como se ha mencionado anteriormente no se dispone la información de la fase de las distintas componentes espectrales. Su principal ventaja

es el tiempo y el coste computacional, obteniéndose buenos resultados con tamaños de malla del orden de la longitud de onda.

A partir del espectro es posible la obtención de parámetros representativos del oleaje tales como la altura de ola significativa o el periodo medio del oleaje. Ello se realiza mediante el cálculo de momentos, estando definido el momento de orden  $n$  como:  $m_n = \int_0^{+\infty} f^n S(f) df$ . La altura de ola significativa  $H_s$ , se aproxima como  $H_s \approx H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$  y el periodo medio de paso por cero como  $T_z \approx \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ .

Dentro de este tipo de modelos se pueden distinguir dos subgrupos diferenciados en función de su adecuación para aguas costeras o aguas oceánicas. En la Tabla 2.1, se exponen algunos modelos numéricos de oleaje espectral en función de la clasificación anterior.

<b>Aguas costeras</b>	<b>Aguas oceánicas</b>
SWAN	WAM
Mike21 NSW	WAVEWATCH III
	Mike21 SW

Tabla 2.1: Modelos numéricos promediados en fase

Todos los modelos citados en la Tabla 2.1 realizan la propagación del espectro de oleaje en 2D. La diferencia principal entre unos modelos y otros se basa en los fenómenos que consideran, por lo que en función del caso de estudio se optará por uno u otro tipo de modelo. Así, en aguas costeras es necesaria una correcta modelización de procesos tales como refracción, difracción, asomeramiento, disipación por rotura y/o fondo/vegetación. Estos fenómenos son menos relevantes en aguas profundas, y los modelos numéricos para escalas oceánicas no los resuelven de una forma adecuada o bien alguno de ellos no se tiene en cuenta. Para los objetivos del presente proyecto resulta más adecuado utilizar un modelo de propagación en zonas costeras, por lo que se ha optado por el modelo SWAN (Ziljema (2010)) desarrollado por Delft University of Technology. Este modelo es adecuado para la modelización de los casos test estudiados en este proyecto, ya que modeliza los procesos relevantes en aguas someras y además es un código abierto.

### 2.1.2. Modelos que resuelven la fase

Los modelos que resuelven la fase se basan en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. En lo que se refiere a la caracterización del oleaje estos modelos, a diferencia de los modelos espectrales, no trabajan con el espectro del oleaje sino con la evolución temporal de la elevación de la lámina de agua (Figura 2.3). Se obtiene de esta forma en cada punto del dominio un registro temporal de elevación de la lámina de agua. A partir de este registro se puede obtener el espectro del oleaje mediante la transformada de Fourier de la lámina de agua, y a partir del espectro las magnitudes características del oleaje en cada punto.

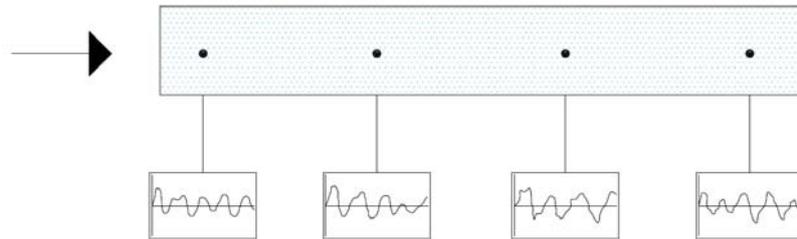


Figura 2.3: Representación del oleaje como serie temporal de altura de lámina de agua, en los modelos que resuelven la fase

Los modelos que resuelven la fase presentan la ventaja respecto a los modelos espectrales de que no se produce la pérdida de información de la fase, ya que se obtiene de forma determinista la altura de la lámina de agua en cada instante y en cada punto. Sin embargo, el principal inconveniente que presentan este tipo de modelos es el coste computacional requerido, ya que los tamaños de malla deben de ser del orden de  $\frac{L}{50}$  ó  $\frac{L}{20}$ ; siendo L la longitud de onda característica del oleaje; y el paso de tiempo para la integración temporal uno o dos órdenes de magnitud inferior al periodo característico del oleaje.

Los modelos que resuelven la fase se pueden clasificar en tres subgrupos:

- Régimen de Stokes (Ecuación de la Mild Slope o pendiente suave)
- Régimen de onda larga (Ecuaciones de Boussinesq)
- Ecuaciones de Navier Stokes

### Régimen de Stokes (Ecuación de la Pendiente Suave o Mild Slope Equation)

La ecuación de la Pendiente Suave (MSE) fue desarrollada inicialmente por Eckart en 1952, obteniéndola Juri Berkhoff en 1972 independientemente. Actualmente existen diversas modificaciones de las ecuaciones originales con el fin de aproximar de forma conveniente los distintos fenómenos del oleaje.

Esta ecuación se basa en la teoría lineal de ondas y considera fenómenos tales como refracción, difracción, asomeramiento, reflexión, interacción ola-corriente y fricción con el fondo. No considera efectos no-lineales por basarse en la teoría lineal de oleaje.

Una limitación de la ecuación de la Pendiente Suave es que solamente es válida cuando la pendiente del fondo es pequeña. Se suele tomar como límite 1:3, lo cual limita la aplicación de los modelos que la resuelven.

La ecuación de la Pendiente Suave se puede expresar como:

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y) \frac{\cosh k(h + z)}{\cosh kh} \exp(i\sigma t) \quad (2.2)$$

$$\nabla(CC_g \nabla \phi) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (2.3)$$

dónde  $\phi(x, y, z, t)$  es un potencial complejo que surge de la consideración de la propagación de ondas progresivas,  $k$  es el número de onda,  $C$  es la celeridad de onda y  $C_g$  la celeridad de grupo.

La ecuación (2.3) es una ecuación de tipo elíptico, lo que implica la necesidad de aplicar condiciones de contorno en todos los límites del dominio espacial de cálculo. Con el fin de poder aplicar condiciones de contorno únicamente en los contornos de incidencia del oleaje, se ha desarrollado la aproximación parabólica de esta ecuación, asumiendo que la onda se propaga en una dirección predominante. En la Tabla 2.2, se muestran algunos modelos de cálculo y la ecuación que resuelven.

<b>ED.Elíptica</b>	<b>Aproximación parabólica</b>
MSP (IH Cantabria)	OLUCA (IH Cantabria)
Mike21 EMS (DHI)	Mike21 PMS (DHI)
CG WAVE (CHL)	REFDIF (CACR)

Tabla 2.2: Modelos numéricos que resuelven la ecuación de la Pendiente Suave

## Ecuaciones de Boussinesq

Las ecuaciones de Boussinesq se emplean en profundidades intermedias y reducidas, teniendo en cuenta fenómenos tales como la no linealidad del oleaje, interacción entre componentes frecuenciales y efectos dispersivos, además de asomeramiento, refracción, reflexión, y difracción. Las ecuaciones estándar de Boussinesq han sido modificadas por diversos autores con el fin de aplicarlas en profundidades muy reducidas, donde la no linealidad es más importante que la dispersión, y en profundidades indefinidas.

Las principales aplicaciones de los modelos del oleaje basados en estas ecuaciones son la agitación y resonancia portuaria, y la interacción ola-estructura. Algunos de los modelos numéricos basados en las ecuaciones de Boussinesq son:

- MANOLO (IH Cantabria)
- Mike21 BW (DHI)

## Ecuaciones 3D-RANS

Las ecuaciones RANS se basan en la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. Se trata de ecuaciones 3D no lineales y transitorias con condiciones de contorno no lineales. Asumiendo la hipótesis de Boussinesq para modelar los términos turbulentos, se pueden expresar como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \mu_t \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

Las ecuaciones 3D RANS trabajan con el promedio de las velocidades instantáneas y añaden unos términos turbulentos para modelar el efecto de la turbulencia. El principal inconveniente de los modelos RANS es la correcta modelización de los términos turbulentos, ya que en flujos complejos pueden producir resultados incorrectos.

La ventaja de este tipo de modelos reside en que no se realiza ninguna hipótesis acerca de la distribución de presiones (supone presión no hidrostática) o de velocidades en el fluido. Estos modelos también se utilizan en el cálculo de corrientes, diferenciándose los modelos de circulación y oleaje en la modelización de procesos específicos de oleaje o corrientes según corresponda, y en la implementación numérica de dichos procesos.

## 2.2. Modelos de circulación costera

Los modelos de circulación costera permiten calcular las corrientes generadas por la marea y por el oleaje en zonas costeras. Existen diversos tipos de modelos que se pueden agrupar en tres grupos:

1. Modelos que resuelven las ecuaciones 3D RANS
2. Modelos de aguas someras 3D (3D-SWE)
3. Modelos de aguas someras 2D (2D-SWE)

### 2.2.1. Modelos que resuelven las ecuaciones 3D RANS

Las características de estos modelos se han explicado en el apartado 2.1.2. Los modelos de circulación que resuelven las ecuaciones 3D-RANS proporcionan las tres componentes de la velocidad media, la presión dinámica y la altura de la lámina de agua. Estos modelos están especialmente indicados para modelar la circulación en zonas en las cuales pueda existir estratificación y en flujos en los que la presión es no hidrostática.

Un modelo numérico de este tipo es Freeflow 3D (Cea et al. (2009)) que será utilizado en el presente proyecto técnico para la modelización de las corrientes generadas por el oleaje.

### 2.2.2. Modelos de aguas someras 3D (3D-SWE)

Estos modelos resuelven las ecuaciones de Reynolds 3D asumiendo una distribución de presiones hidrostática. En el caso de flujos con densidad constante, las ecuaciones de aguas someras 3D se pueden expresar como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -g \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_t \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -g \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\nu_t \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_t \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (2.10)$$

Mediante estos modelos se obtienen las 3 componentes de la velocidad media y la altura de la lámina de agua, quedando la presión en cualquier punto definida mediante la superficie libre, la cota del punto y la densidad del fluido:  $P_h = \rho g(z_s - z)$ .

### 2.2.3. Modelos de aguas someras 2D (2D-SWE)

Estos modelos resuelven las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad (2D Shallow Water Equations), consistiendo estas en tres ecuaciones diferenciales (conservación de masa y conservación de momento en las dos direcciones horizontales).

Las principales hipótesis en estas ecuaciones son una distribución de presiones hidrostática y un perfil de velocidades homogéneo en profundidad. Estas hipótesis se cumplen razonadamente en el flujo en ríos y en aguas costeras aunque presentan ciertas limitaciones en cuanto la distribución uniforme de velocidad en profundidad, ya que esta puede resultar inadecuada en zonas de flujos tridimensionales o en cuñas salinas. Las ecuaciones 2D-SWE se pueden escribir como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y})}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y})}{\partial y} \quad (2.13)$$

siendo  $U_x = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} u dz$  y  $U_y = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} v dz$ .

Un modelo numérico de este tipo es el programa Iber (Bladé et al. (2013)) que se empleará en el presente proyecto técnico. Es un software libre desarrollado por el grupo

GEAMA de la UDC, el grupo Flumen de la UPC y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) que se puede descargar de la web [www.iberaula.es](http://www.iberaula.es).

## 2.3. SWAN

El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) (Zijlma (2010)) es un modelo de propagación espectral de oleaje. Este modelo se basa en la resolución de la ecuación de conservación de la energía espectral, la cual se puede expresar como:

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta; x, y, t)}{\sigma}$$

dónde  $N = \frac{E(f, \theta; x, y, t)}{f}$  es el espectro de densidad de energía,  $C_{g,x}$  y  $C_{g,y}$  son las celeridades de grupo en dirección x e y respectivamente,  $C_{\theta}$  representa la refracción a causa de la variación de fondo y corrientes, y  $S(f, \theta; x, y, t)$  es el termino fuente en términos de densidad de energía. El modelo tiene en cuenta procesos de propagación tales como: refracción debida a variaciones del fondo y corrientes, difracción, asomamiento y transmisión o reflexión contra obstáculos. También tiene en cuenta fenómenos de generación y disipación como: generación por viento, disipación por whitecapping, disipación por rotura, disipación por fricción del fondo e interacciones ola-ola.

La variedad de fenómenos que es capaz de modelizar hace de este modelo una herramienta de especial aplicación en la zona de aguas someras, en la cual estos fenómenos adquieren una gran relevancia. Los cálculos en este modelo pueden ser realizados en mallas regulares o irregulares, pudiendo generarse las mallas de cálculo directamente a través del código o mediante programas externos como por ejemplo ADCIRC. En la Tabla 2.3 se muestran las principales características de este modelo.

Características	Inputs	Outputs	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelo de tercera generación</li> <li>▪ Modelo promediado en la fase</li> <li>▪ Se basa en la conservación de la energía espectral</li> <li>▪ Fenómenos incluidos <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asomeramiento</li> <li>• Difracción</li> <li>• Refracción</li> <li>• Whitecapping</li> <li>• Fricción de fondo</li> <li>• Interacción ola - ola en aguas profundas y someras</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Batimetría</li> <li>▪ Nivel medio del mar</li> <li>▪ Fricción de fondo y/o vegetación</li> <li>▪ Corrientes</li> <li>▪ Viento</li> <li>▪ Condiciones de Contorno <ul style="list-style-type: none"> <li>• Espectro Jonswap</li> <li>• Espectro Pierson- Moskowitz</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altura de ola significativa</li> <li>▪ Dirección media y pico del oleaje</li> <li>▪ Periodo del oleaje</li> <li>▪ Disipación de energía</li> <li>▪ Otros parámetros del oleaje</li> <li>▪ Fuerzas de radiación promediadas en profundidad según Phillips (1977)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propagación y transformación del espectro desde aguas profundas a someras</li> <li>▪ Obtención de los parámetros principales del oleaje en profundidades reducidas</li> <li>▪ Obtención de las fuerzas de radiación en cada punto con el objetivo de utilizarlo como archivos de entrada en el modelo de corrientes</li> </ul>

Tabla 2.3: Principales características del modelo SWAN

## 2.4. SWASH

SWASH (Simulating WAVes till SHore) (Ziljema (2011)) es un modelo numérico de flujo no hidrostático, desarrollado por Delft University of Technology. Este modelo es utilizado para predecir la transformación del oleaje desde aguas oceánicas a someras, así como la agitación en el interior de puertos y diversos flujos en aguas costeras.

Las ecuaciones que resuelve el modelo son las 3D Reynolds Average Navier Stokes Equations (3D-RANS). Estas ecuaciones proporcionan una base general para describir cambios complejos en flujos que varían rápidamente, como los que se desarrollan en la costa, aquellos debidos a interacciones no lineales del oleaje o en la interacción entre el oleaje y las corrientes.

Este modelo numérico tiene en cuenta fenómenos tales como: propagación y dispersión en frecuencia, asomeramiento, refracción y difracción, rotura, run-up y run-down, fricción del fondo, reflexión y transmisión a través de estructuras porosas, corrientes inducidas por el oleaje e interacción oleaje-corriente. La última característica es de especial importancia en el presente proyecto técnico, ya que los resultados proporcionados por SWASH se compararán con el resto de simulaciones realizadas.

Mediante SWASH es posible obtener un registro temporal de elevación de lámina de agua. Esta es una característica que lo diferencia de modelos espectrales como SWAN, en los que no es posible la obtención de esta serie temporal de forma determinista.

A partir de las series temporales de elevación de la lámina de agua se obtienen magnitudes como la altura de ola significativa  $H_s$ , el periodo pico del oleaje  $T_p$  o el espectro del oleaje. También se obtienen las velocidades del flujo tanto promediada en el tiempo, como instantánea en el plano horizontal y vertical. Otras magnitudes que es posible obtener son: set-up inducido por el oleaje, presión no hidrostática, distribución vertical de la presión, run-up y turbulencia ( $\kappa$ ,  $\varepsilon$  y  $\nu_t$ ).

En el presente proyecto técnico el modelo SWASH se ha utilizado para realizar la propagación del oleaje y el cálculo de corrientes en los casos test estudiados.

## 2.5. Iber

Iber (Bladé et al. (2013)) es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

El modelo Iber trabaja sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). En el presente proyecto técnico se ha acoplado a este módulo el cálculo de las fuerzas inducidas por el oleaje mediante la formulación de Phillips (1977). Para ello es necesario realizar previamente

el cálculo del campo de oleaje por medio de un modelo numérico de oleaje, en este caso SWAN. Con este módulo de cálculo de las fuerzas generadas por el oleaje y acoplado al módulo hidrodinámico de Iber se obtienen las corrientes generadas por el oleaje mediante las fuerzas calculadas en Iber o las obtenidas por medio del modelo de oleaje (SWAN).

Las ecuaciones de St. Venant 2D asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Estas ecuaciones se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos es uno de los más extendidos y utilizados en dinámica de fluidos computacional.

## 2.6. FreeFlow 3D

FreeFlow3D (Cea et al. (2009)) es un modelo numérico para el cálculo de flujo no hidrostático en lámina libre, orientado fundamentalmente al cálculo de flujo tridimensional en ríos, estuarios y embalses. Resuelve las ecuaciones RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) tridimensionales mediante el método de volúmenes finitos en una malla no estructurada. El cálculo de las tensiones turbulentas se realiza mediante el modelo  $k - \epsilon$ . Posee tres módulos: hidrodinámico, de temperatura y salinidad; estos dos últimos permiten calcular las corrientes generadas por diferencias de densidad provocadas por gradientes de temperatura y salinidad.

En el presente proyecto técnico se ha implementado en este modelo un módulo que permite calcular las corrientes generadas por el oleaje a partir de las fuerzas obtenidas por medio de tres formulaciones (Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008)). Para ello se realiza el cálculo de las fuerzas inducidas por el oleaje mediante un script externo, introduciéndose éstas como parámetro de entrada en el modelo Freeflow 3D.

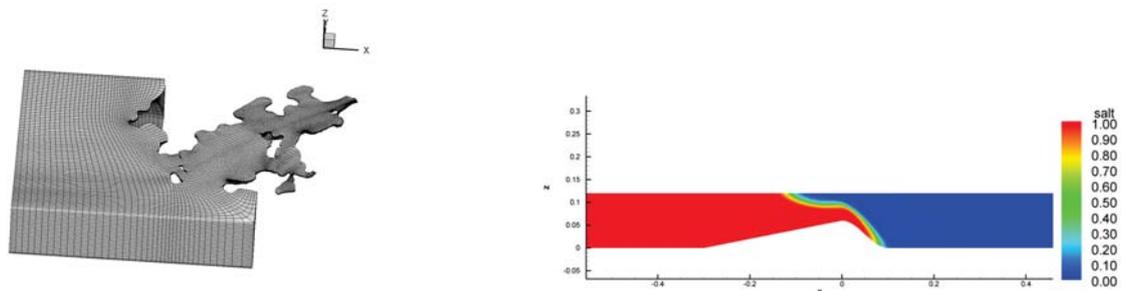


Figura 2.4: *Ejemplo de malla con capas sigma en la Ría de Arousa (izquierda) y flujo estratificado sobre un fondo con forma de duna (derecha) en FreeFlow 3D*

## 2.7. Formulaciones de interacción oleaje-corriente

Como se ha mencionado en la introducción, un posible procedimiento para calcular las corrientes generadas por el oleaje consiste en la utilización de un modelo 3D no hidrostático. Este procedimiento posee el inconveniente de que se deben de resolver las ecuaciones hidrodinámicas 3D en escalas espacio-temporales muy inferiores a la longitud de onda y el periodo del oleaje, por lo que su aplicación a escalas oceanográficas no es factible.

Un procedimiento alternativo al anterior consiste en la modelización de las fuerzas generadas por el oleaje mediante una formulación de interacción oleaje-corriente. En los últimos años se han desarrollado diversas formulaciones de este tipo. El objetivo de esta sección es la descripción de este tipo de formulaciones.

### 2.7.1. Formulación de Phillips (1977)

En esta teoría las tensiones de radiación integradas en profundidad vienen definidas, en caso de oleaje monocromático, por las siguientes expresiones:

$$S_{xx} = [n(1 + \cos^2\theta) - 0,5]E \quad (2.14)$$

$$S_{yy} = [n(1 + \sin^2\theta) - 0,5]E \quad (2.15)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = 0,5n\sin(2\theta)E \quad (2.16)$$

dónde  $h$  es la profundidad,  $n = 0,5(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)})$  es la relación entre la celeridad de grupo y de onda,  $k = \frac{2\pi}{L}$  es el número de onda,  $E = \frac{\rho g H_s^2}{16}$  es la energía del oleaje y  $H_s$  es la altura de ola significante.

En caso de disponer de una representación espectral del oleaje, las tensiones de radiación se calculan con las expresiones anteriores, sustituyendo la energía por la función de densidad espectral e integrando la expresión resultante en frecuencia y dirección:

$$S_{xx} = \int_{\theta} \int_f [n_{(f)}(1 + \cos^2\theta) - 0,5]E_{(f,\theta)} df d\theta \quad (2.17)$$

$$S_{yy} = \int_{\theta} \int_f [n_{(f)}(1 + \sin^2\theta) - 0,5]E_{(f,\theta)} df d\theta \quad (2.18)$$

$$S_{xy} = \int_{\theta} \int_f 0,5n_{(f)}\sin(2\theta)E_{(f,\theta)} df d\theta \quad (2.19)$$

Las fuerzas inducidas por unidad de superficie en  $N/m^2$  integradas en profundidad

vienen definidas por las siguientes expresiones:

$$F_x = -\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \quad (2.20)$$

$$F_y = -\left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) \quad (2.21)$$

Para la utilización de esta formulación en un modelo 3D de corrientes es necesario hacer la hipótesis de que esta distribución es uniforme en profundidad. Por tanto el valor obtenido en las ecuaciones 2.20 y 2.21 debe dividirse por el calado al introducirlas en las ecuaciones 3D de conservación del momento.

### 2.7.2. Formulación de Mellor (2003)

Esta formulación plantea un promedio en coordenadas tipo sigma para obtener la distribución vertical de las fuerzas generadas por el oleaje. Las ecuaciones de momento 3D resultantes están expresadas en coordenadas tipo sigma y para la velocidad Lagrangiana (Euleriana + Stokes drift). La transformación de las ecuaciones a coordenadas cartesianas se presenta en Mellor (2005). Esta formulación fue utilizada por Warner et al. (2008) y por Bruneau et al. (2011).

Las fuerzas inducidas por el oleaje en dirección horizontal se calculan según la siguiente ecuación:

$$F_i = -\frac{1}{h} \frac{\partial h S_{ij}}{\partial x_j} - \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_j} + \frac{z - z_s}{h} \frac{\partial h}{\partial x_j}\right) \frac{\partial S_{ij}}{\partial z} + \frac{\partial S_{ip}}{\partial z} \quad (2.22)$$

dónde  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, 2$  y las funciones  $S_{ij}$  y  $S_{ip}$  están definidas como:

$$S_{ij} = k g m_0 \left( \frac{k_i k_j}{k^2} F_{cs} F_{cc} + \delta_{ij} F_{cs} (F_{cc} - F_{ss}) \right) \quad (2.23)$$

$$S_{ip} = g (F_{cc} - F_{ss}) \sqrt{m_0} \frac{\partial \sqrt{m_0} F_{ss}}{\partial x_i} \quad (2.24)$$

$$F_{ss} = \frac{Sh[k(z+h)]}{Sh(kh)} \quad F_{cs} = \frac{Ch[k(z+h)]}{Sh(kh)} \quad (2.25)$$

$$F_{sc} = \frac{Sh[k(z+h)]}{Ch(kh)} \quad F_{cc} = \frac{Ch[k(z+h)]}{Ch(kh)} \quad (2.26)$$

dónde  $m_0$  es el momento de orden cero del espectro. Las fuerzas debidas al oleaje según las expresiones anteriores integradas en profundidad, resultan ser las ecuaciones propuestas por Phillips (1977). Sin embargo, se ha probado en Ardhuin et al. (2008a) que la distribución vertical de las fuerzas inducidas por el oleaje no son válidas en el caso de oleaje con asomeramiento y sin rotura. Esto es debido a una aproximación

inapropiada en la ecuación (2.24) cuando el fondo no es plano. Una consecuencia directa es que esta formulación puede producir corrientes en el caso de oleaje no forzado con fondo variable incluso en aguas profundas, lo que no es aceptable físicamente, como se ha reconocido en Mellor (2008).

### 2.7.3. Formulación de Mellor (2008)

La formulación presentada en Mellor (2008a) y aplicada en Mellor (2008b) y Mellor et al. (2008), se basa en el promedio Lagrangiano Generalizado (GLM) de las ecuaciones RANS. Plantea las ecuaciones de conservación en términos de velocidades Lagrangianas en coordenadas cartesianas.

La distribución vertical de las tensiones de radiación se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S_{ij} = gkm_0 \left( \frac{k_i k_j}{k^2} F_{cs} F_{cc} - \delta_{ij} F_{sc} F_{ss} \right) + \delta_{ij} E_D \quad (2.27)$$

$i = 1, 2$  y  $j = 1, 2$  dónde  $E_D = 0$  si  $z \neq z_s$ ,  $\int_{-h}^0 E_D dz = g \frac{m_0}{2}$  y las funciones  $F_{ss}$ ,  $F_{sc}$ ,  $F_{cs}$  y  $F_{cc}$  están definidas por las ecuaciones (2.25) y (2.26) respectivamente.

El término  $E_D$  se aplica únicamente en la superficie y que integrada verticalmente representa la mitad de la energía asociada a la onda. En un modelo 3D este término se distribuye sobre los elementos que están en contacto con la superficie libre.

La distribución vertical de fuerzas generadas por el oleaje se determina mediante las derivadas de las tensiones de radiación como:

$$F_i = -\frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} \quad i = 1, 2 \quad j = 1, 2 \quad (2.28)$$

La integración en profundidad de las tensiones de radiación dadas por la ecuación (2.27) es igual a las expresiones propuestas por Phillips (1977) para las tensiones de radiación integradas en profundidad. Sin embargo, como se demuestra en Bennis y Arduin (2011), el hecho de que el promedio en profundidad de las tensiones de radiación según Mellor (2008) sea igual a las propuestas por Phillips (1977), no implica que las fuerzas promediadas en profundidad sean necesariamente iguales, por calcularse las fuerzas a partir de las derivadas de las tensiones de radiación.

Un problema que surge en la implementación numérica de esta teoría es la discontinuidad en la distribución vertical de la fuerza originada por el oleaje, debido al término  $E_D$ . Esto puede generar oscilaciones en el modelo de corrientes. Bennis y Arduin (2011) necesitan introducir una viscosidad constante al aplicar esta formulación a un caso simple de asomeramiento para reducir las oscilaciones numéricas generadas por la discretización de  $E_D$ .



# 3

## Corrientes generadas por el oleaje en un canal de batimetría variable

### 3.1. Descripción del caso de análisis

El caso analizado consiste en la propagación del oleaje y generación de corrientes en un canal cuyo fondo varía siguiendo la batimetría definida en Roseau (1976) (Figura 3.1). Las coordenadas  $(x, z)$  que definen el fondo del canal vienen definidas por las partes real e imaginaria de la ecuación compleja:

$$Z(x') = \frac{h_1(x' - i\alpha) + (h_2 - h_1)\ln(1 + e^{x' - i\alpha})}{\alpha} \quad (3.1)$$

con  $\alpha = \frac{15\pi}{180}$ ,  $h_1 = 6m$  y  $h_2 = 4m$ . La lámina de agua está situada en  $z = 0$ .

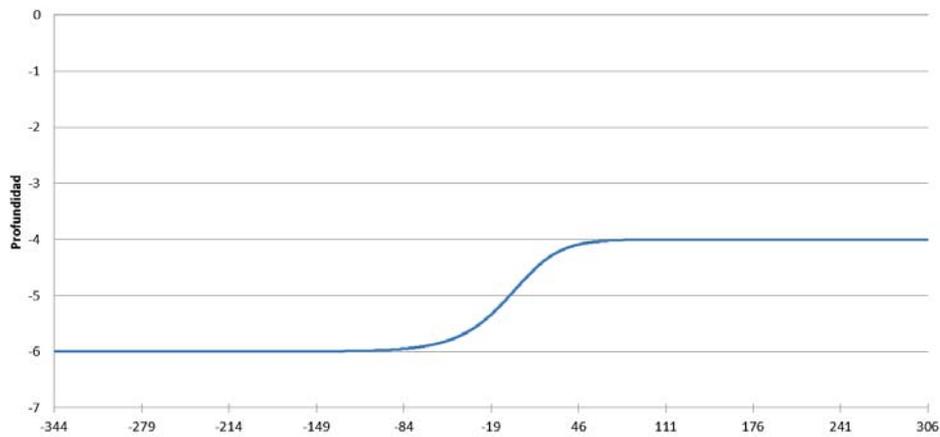


Figura 3.1: Batimetría del fondo en el caso test 1D de Roseau (1976)

Se han estudiado seis condiciones de oleaje que permitan analizar los diferentes resultados en función de la regularidad (dispersión en frecuencia) y de la no linealidad del oleaje. Para ello se han seleccionado tres pares de valores altura de ola - longitud de onda, variando el parámetro de no linealidad del oleaje. A su vez se estudiará cada caso como oleaje regular monocromático y como un espectro tipo Jonswap (oleaje irregular) (Figura 3.2).

A partir de la Figura 3.2, en la que se definen los rangos de aplicación de las teorías lineales y no lineales de oleaje (LeMéhauté (1976), Kamphuis (2000) y SPM (1973)), se seleccionan los casos de estudio. Para una profundidad de 6 metros se utilizan los parámetros definidos en la Tabla 3.1, que a su vez se representan en la Figura 3.2.

Caso	$d(m)$	$T(s)$	$H(m)$	$d/gT^2$	$H/gT^2$	$d/L$	$H/L$
C1	6	8	0.12	0.0095	0.0002	0.1044	0.00208
C2	6	8	0.95	0.0095	0.0015	0.1044	0.01653
C3	6	8	2.50	0.0095	0.0040	0.1044	0.04350

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en cada uno de los casos de estudio

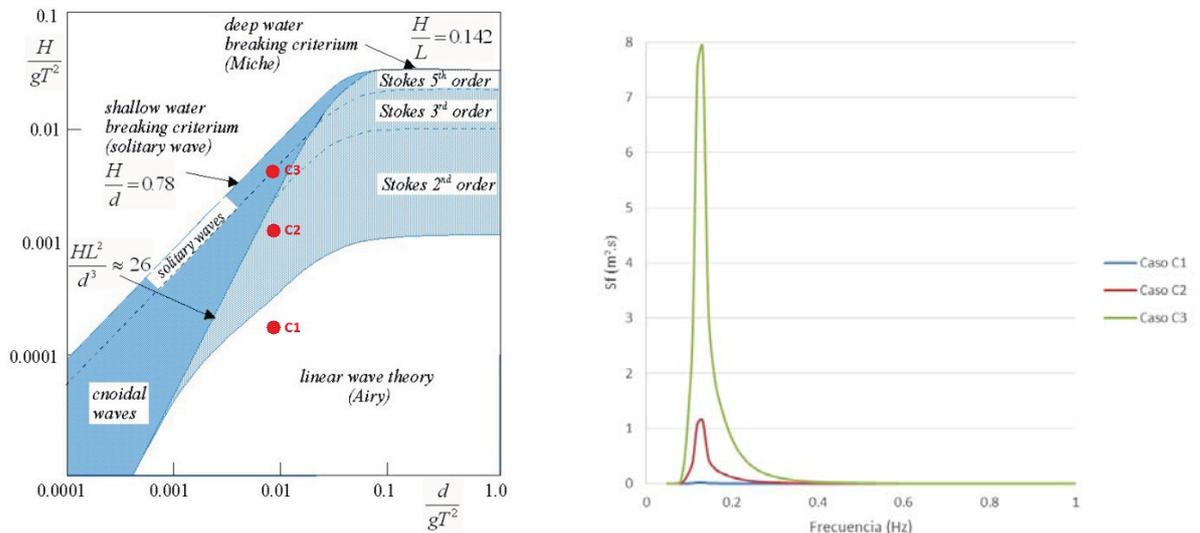


Figura 3.2: Tabla de validez de las teorías de oleaje (izquierda) (Holthuijsen (2007)) y espectros de oleaje irregular tipo Jonswap correspondientes a los tres casos estudiados (derecha)

## 3.2. Resultados con SWAN e Iber

### 3.2.1. Procedimiento y malla

Se realiza la propagación de oleaje en SWAN, para los seis casos estudiados. En este caso se realiza una modelización 1D mediante SWAN sobre una malla regular con distancia entre nodos de 0,1857 metros, resultando una malla de 3500 nodos. Las condiciones de contorno se aplican en la entrada, siendo estas la altura de ola significativa, el periodo pico del oleaje, selección de oleaje monocromático u oleaje irregular espectral (Jonswap) y la condición de altura de lámina de agua constante e igual a  $z = 0$ . Una vez calculados los parámetros del oleaje y las fuerzas inducidas mediante SWAN se introducen como input en el modelo de corrientes Iber, utilizando en este caso una malla regular de 260 elementos (Figuras 3.3 y 3.4).

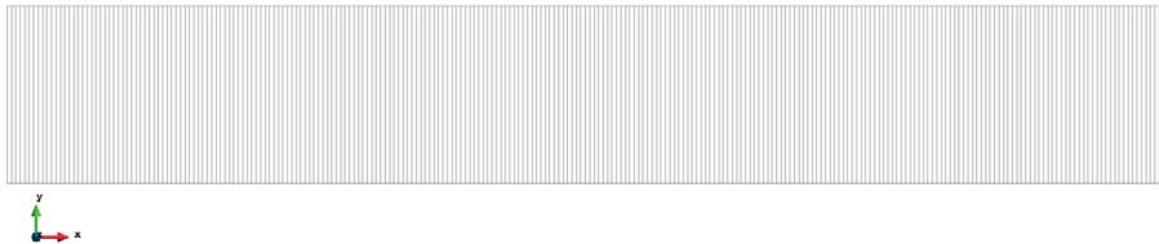


Figura 3.3: Malla 2D utilizada en el caso test Roseau en el modelo Iber

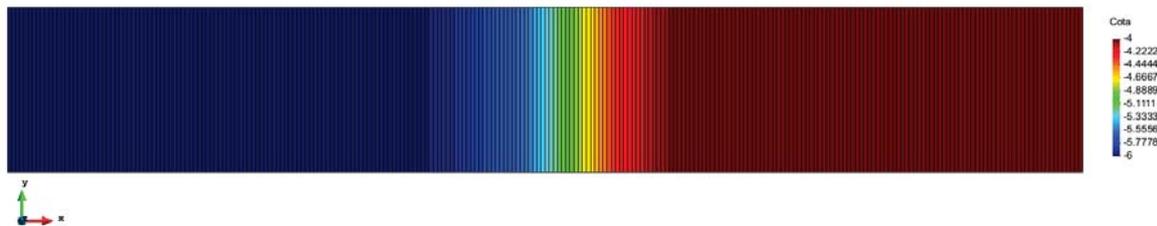


Figura 3.4: Batimetría correspondiente al test Roseau modelizada en Iber

### 3.2.2. Resultados

#### Caso C1

La altura de ola significativa (Figura 3.5) decrece a lo largo del canal debido al rozamiento del fondo. En el punto donde se produce la variación de la cota del fondo la altura de ola aumenta debido al fenómeno de someración del oleaje, para volver a decrecer una vez el fondo vuelve a ser plano debido al mismo fenómeno de rozamiento

con el fondo. Se observan diferencias en la someración entre el caso de oleaje monocromático y el espectral. En los primeros metros del canal ambos oleajes se comportan de la misma forma. Una vez se produce la variación del fondo, se produce el aumento de la altura de ola, siendo este aumento mayor en el caso monocromático que en el caso espectral. Al superar esta variación ambos casos experimentan un decrecimiento similar de la altura de ola debido al rozamiento con el fondo.

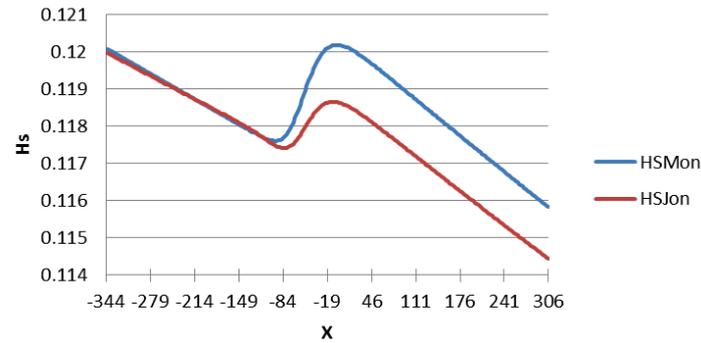


Figura 3.5: *Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C1 considerando oleaje monocromático y espectral*

En el caso de la fuerza inducida por el oleaje (Figura 3.6), no se observan diferencias significativas entre oleaje regular e irregular. Los valores son prácticamente idénticos salvo una mínima diferencia en el pico que se produce en la zona donde varía el fondo.

Respecto a la variación de la lámina de agua calculada con Iber (Figura 3.6) no existen diferencias apreciables entre ambos casos. Esto es debido a que las tensiones de radiación son prácticamente idénticas. El modelo predice un ligero set-up en el primer tramo del canal, y un set-down en la zona donde se produce la variación del fondo.

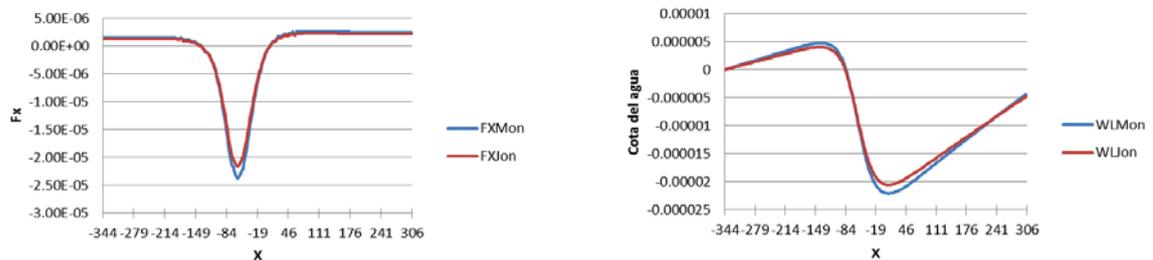


Figura 3.6: *Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C1 considerando oleaje monocromático y espectral*

### Caso C2

En este caso la altura de ola significativa (Figura 3.7) presenta importantes diferencias entre el cálculo considerando oleaje monocromático y el cálculo considerando oleaje irregular.

En el caso de oleaje irregular se observa un decrecimiento de la altura de ola debido a la fricción de fondo, hasta el punto en el cual se produce la variación del fondo a partir del cual asciende para volver a decrecer. En el caso de oleaje monocromático antes de la variación del fondo se comporta de forma similar al caso de oleaje espectral. Una vez se produce la variación de fondo la altura de ola aumenta hasta 0.98 metros para posteriormente decrecer de una forma muy gradual. Las diferencias en el punto final del canal son del orden del 6,5 %, mientras que en los puntos situados antes de la variación del fondo son del orden del 1 %.

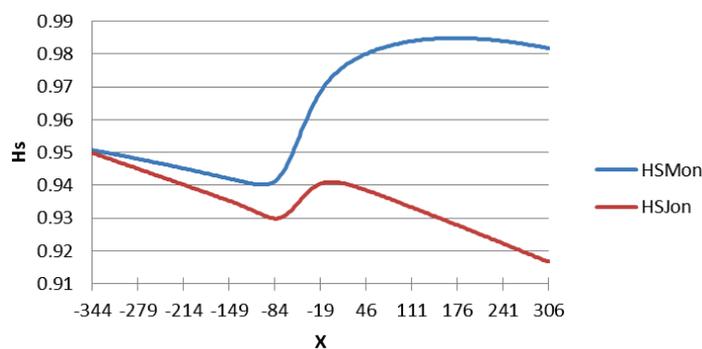


Figura 3.7: *Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C2 considerando oleaje monocromático y espectral*

En cuanto a la fuerza inducida por el oleaje (Figura 3.8), no se observan grandes diferencias entre los dos casos estudiados. Los valores se solapan en los puntos anteriores a la variación del fondo, observándose las mayores diferencias la fuerza máxima que se produce en el inicio de la variación del fondo. Después de esta variación los valores se vuelven a solapar. Las diferencias en la fuerza máxima son del orden del 14 %.

Por último la variación de la lámina de agua (Figura 3.8), presenta diferencias entre los dos casos a partir del punto en el cual varía el fondo. Así al comienzo la variación es similar en ambos casos, comenzando a existir diferencias a partir de ese punto, haciéndose estas más evidentes conforme se avanza en dirección x. Las diferencias en el punto de variación del fondo son del orden del 20 % mientras que en el punto final del canal estas diferencias aumentan y pasan a ser del orden del 100 %.

### Caso C3

Analizando en primer lugar la altura de ola significativa (Figura 3.9), se observa que en ambos casos estudiados los valores obtenidos son muy similares. Se produce una disminución de la altura de ola conforme se avanza en el canal debido a la fricción de

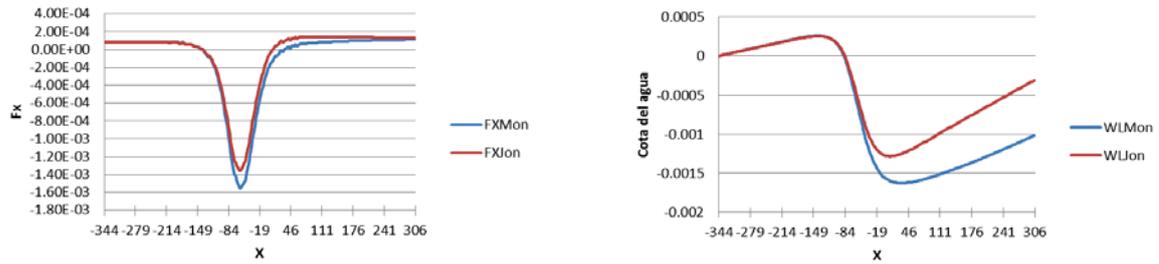


Figura 3.8: *Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C2 considerando oleaje monocromático y espectral*

fondo y a la rotura del oleaje, siendo este descenso más acusado en la zona donde se produce la variación del fondo.

La fuerza inducida por el oleaje (Figura 3.10), presenta semejanzas entre ambos casos, obteniéndose valores mayores en valor absoluto en el caso de oleaje monocromático. Las mayores diferencias se observan en los picos cóncavo y convexo. Por último, analizando la variación de la lámina de agua (Figura 3.10), se observa que el decrecimiento de la lámina de agua se reduce a una pequeña zona donde se produce la variación del fondo, produciéndose un aumento a partir de este punto. El crecimiento es mayor en el caso de oleaje monocromático, siguiendo una tendencia similar en el caso de oleaje espectral. La mayor diferencia se obtiene en el punto final del canal, siendo esta del orden del 20 %.

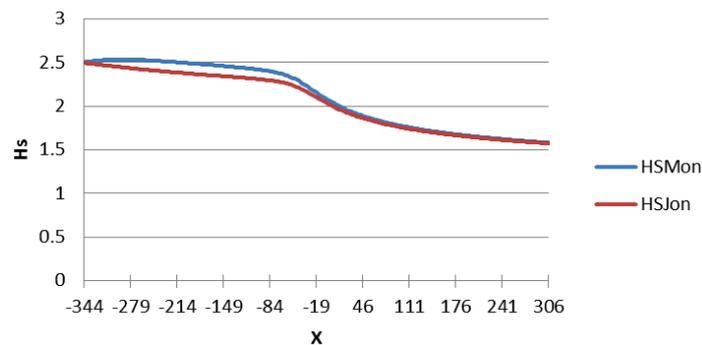


Figura 3.9: *Altura de ola significativa calculada con SWAN en el caso C3 considerando oleaje monocromático y espectral*

De los resultados anteriores se observa el distinto comportamiento que presenta el test a medida que se aumenta la no linealidad del oleaje. Estas diferencias son más acusadas en el caso con una mayor no linealidad del oleaje (C3), donde la altura de ola significativa ( $H_s$ ) decrece a lo largo del canal debido a la rotura del oleaje. La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  posee un comportamiento totalmente diferente en el caso con mayor no linealidad en comparación con los otros dos casos estudiados.

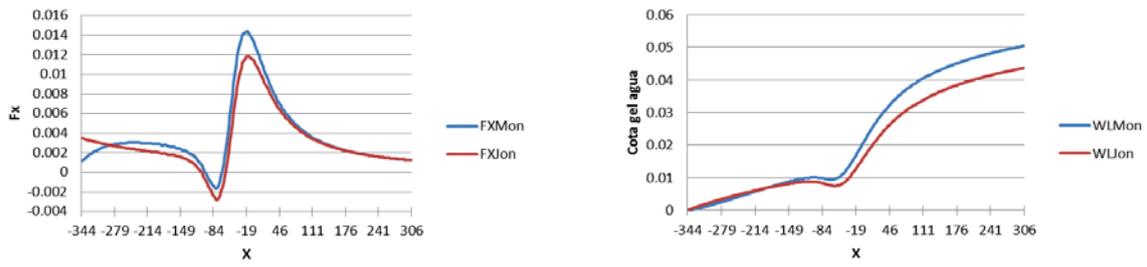


Figura 3.10: *Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  calculada mediante SWAN (izquierda) y altura de lámina de agua calculada mediante Iber (derecha) en el caso C3 considerando oleaje monocromático y espectral*



# 4

## Corrientes generadas por el oleaje tras un dique exento

### 4.1. Descripción del caso de análisis

El caso analizado consiste en la propagación del oleaje y generación de corrientes en una zona costera en la que existe un dique exento de 40 metros de ancho y 300 metros de longitud, cuyo eje se sitúa a 220 metros de la línea de costa. Las batimétricas son paralelas a la línea de costa y el fondo tiene una pendiente constante de 1:50. Este caso fue estudiado en Nicholson et al. (1997). Con el fin de reducir el tiempo de cálculo se ha modelizado un dominio espacial de 700 metros en dirección x y 350 metros en dirección y, desde la línea de costa hasta la profundidad de 7 metros.

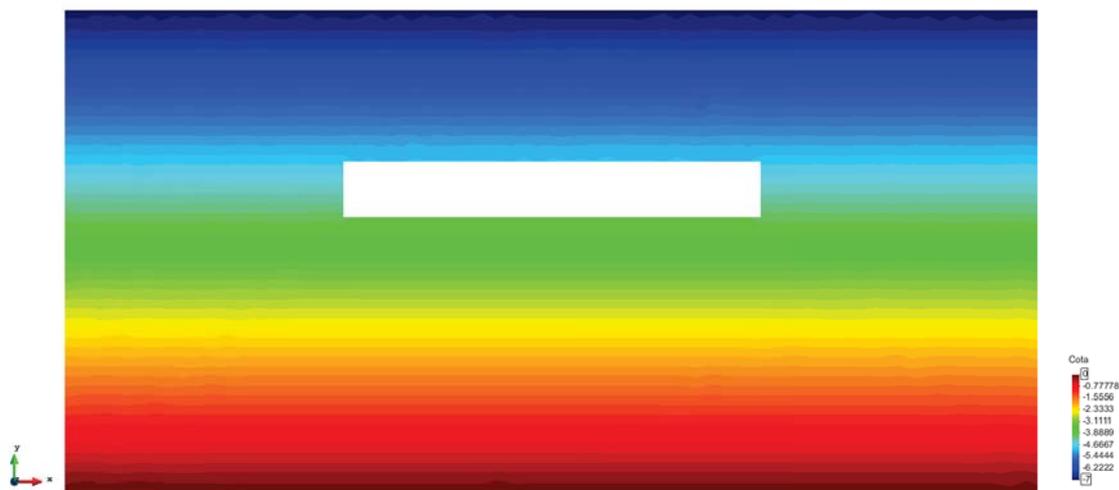


Figura 4.1: Batimetría en el caso de corrientes generadas tras un dique exento

Los casos de oleaje estudiados son los mismos que en el capítulo 3 (Tabla 3.1) realizando en cada uno de ellos la distinción entre oleaje regular monocromático y oleaje irregular espectral definido mediante una función Jonswap.

## 4.2. Resultados con SWAN

Para realizar la propagación del oleaje mediante SWAN se ha realizado una malla no estructurada (Figura 4.2). Esta malla se compone de 11746 elementos y 6059 vértices siendo el tamaño de los elementos menor en aquellas zonas que se necesita una mayor resolución debido a la variación espacial de la altura de ola, como son las zonas posteriores al dique.

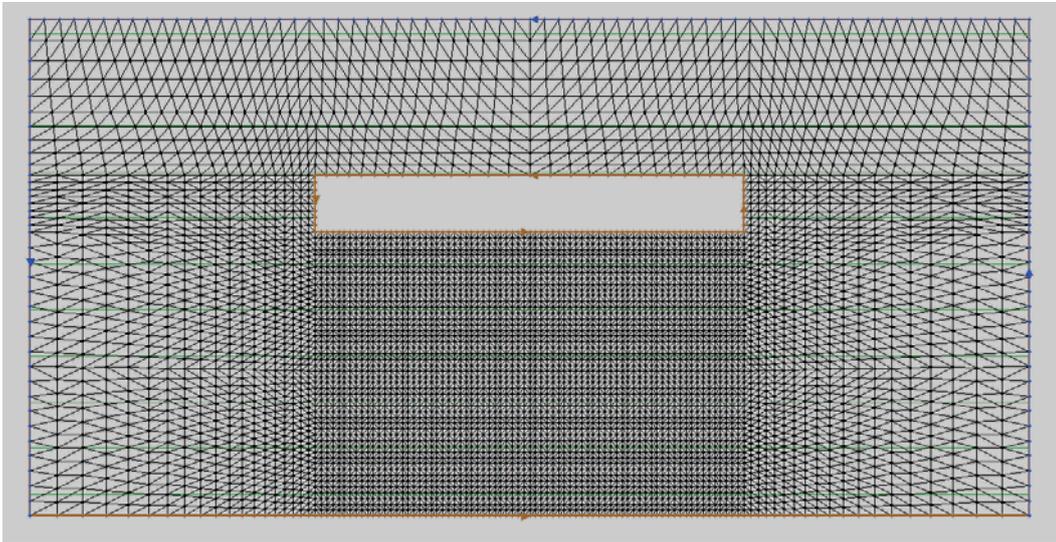


Figura 4.2: *Malla no estructurada utilizada en el cálculo en SWAN*

Con el fin de analizar los resultados se han definido dos secciones representativas en la Figura 4.3. Con la primera sección (S1) se analiza la variación de los parámetros de oleaje en dirección  $y$ , con una coordenada  $x = -250$  m constante. Los puntos vienen definidos por tanto como  $x = -250$  e  $y = [350, 0]$ . Con la segunda sección (S2) se analizan los cambios que se producen en dirección  $x$ , manteniendo la coordenada  $y$  constante e igual a 120 metros. Los puntos analizados con esta última sección son:  $x = [-350, 350]$  e  $y = 120$ .

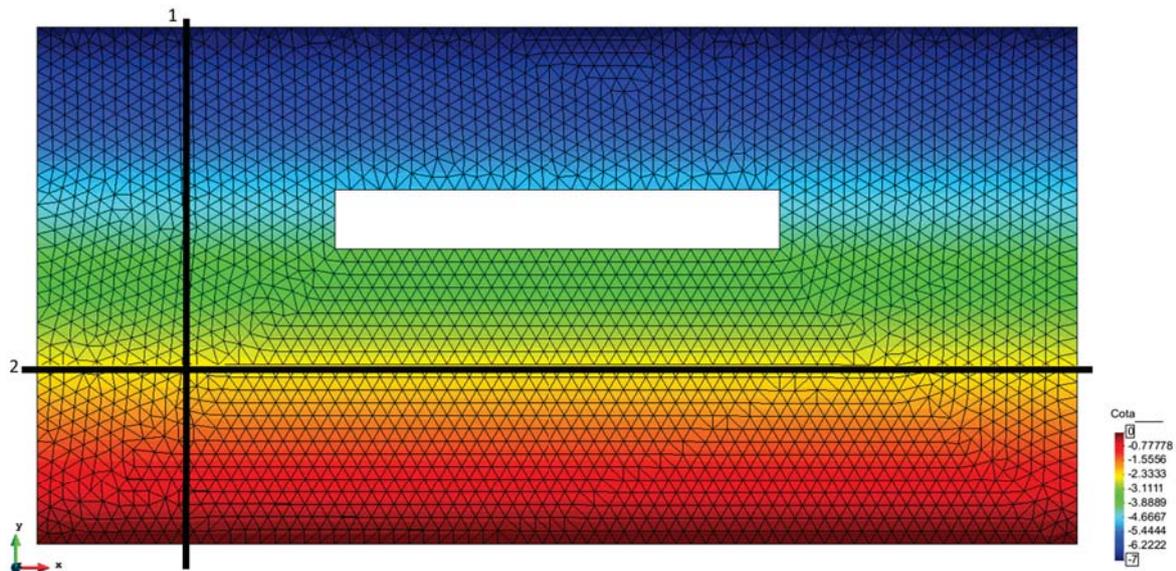


Figura 4.3: Localización de las secciones  $S1$  y  $S2$

#### 4.2.1. Caso C1

En la figura 4.5 se observa la disposición en planta de la altura de ola significativa, siendo esta menor en las zonas protegidas ante la acción del oleaje. Se observa un incremento de la altura de ola a una distancia de 25 metros de la línea de costa, debido a la someración del oleaje a causa de la reducción del calado. La altura de ola significativa no presenta grandes diferencias en ninguna de las secciones analizadas entre los casos realizados con oleaje regular e irregular espectral (Figura 4.4). La mayor diferencia entre los cálculos monocromático y espectral en la sección 1 se produce en una zona en la que la fuerza de radiación en dirección  $y$  experimenta un cambio de sentido (Figura 4.27). En la sección 2 no se aprecian diferencias significativas, siendo estas mayores en las zonas que no quedan resguardadas de la acción del oleaje (fuera de la protección del dique exento).

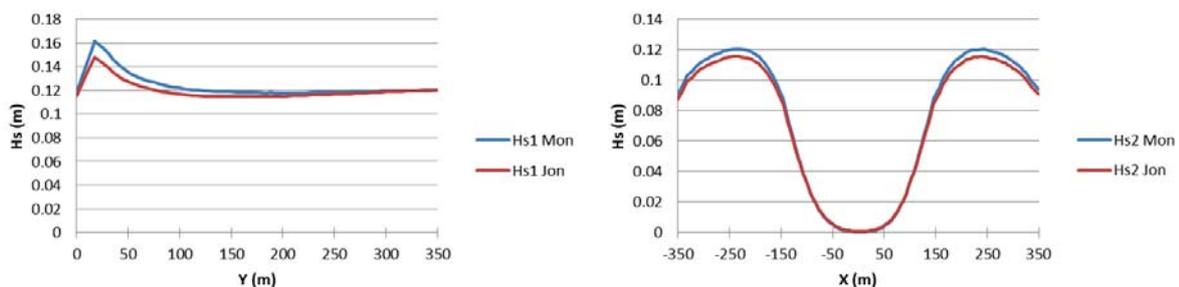


Figura 4.4: Altura de ola significativa en las secciones  $S1$  (izquierda) y  $S2$  (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C1

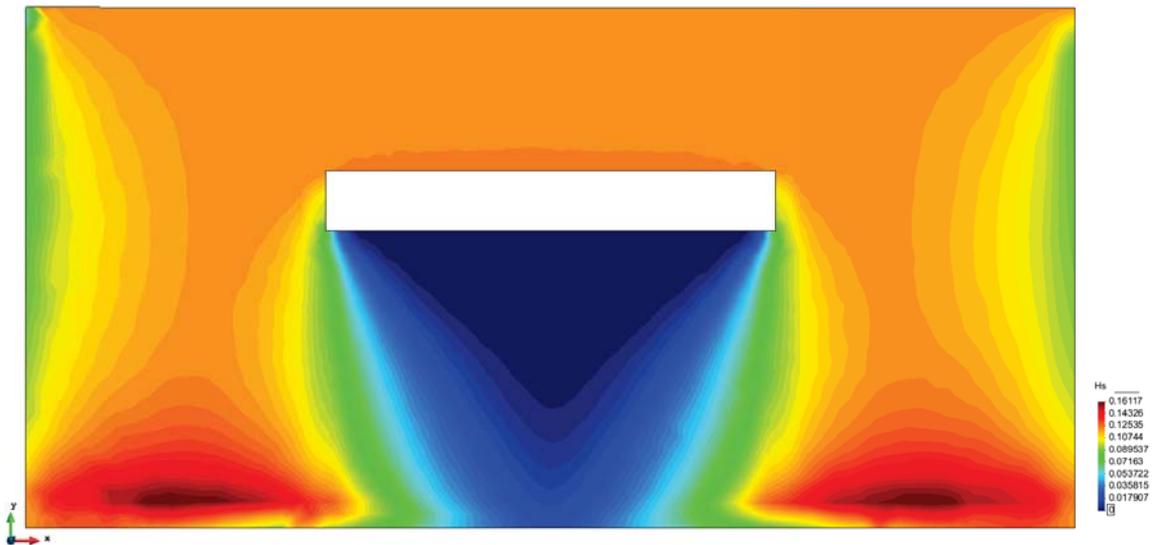


Figura 4.5: *Distribución de altura de ola significativa en el Caso C1 con oleaje monocromático regular*

#### 4.2.2. Caso C2

La altura de ola significativa presenta un comportamiento similar al caso C1. La altura de ola aumenta ligeramente, hasta que se produce la rotura del oleaje, momento en el cual decrece. En este caso la rotura del oleaje se produce a una mayor profundidad que en el caso C1 debido a la mayor altura de ola. Las zonas situadas detrás del dique poseen unas alturas de ola menores que las zonas expuestas al oleaje.

Las principales diferencias en cuanto a la altura de ola significativa corresponden a la sección 1 (Figura 4.6). En el caso de oleaje monocromático, la altura de ola aumenta muy ligeramente conforme se aproxima a las zonas de menor profundidad, mientras que en el caso de oleaje irregular, esta decrece durante todo el recorrido. En la sección 2 se observa que los resultados entre ambos casos difieren a partir de los puntos que no están protegidos de la acción del oleaje por el dique. La distribución de los valores en planta (Figura 4.7) no presenta grandes cambios en función del caso estudiado, difiriendo los valores máximos de altura de ola en un 5%.

#### 4.2.3. Caso C3

La altura de ola significativa (Figura 4.9) decrece a medida que se reduce el calado, debido a que las condiciones de oleaje implican el comienzo de rotura en profundidades de 3.5 metros. La altura de ola significativa (Figura 4.8) no presenta diferencias apreciables entre oleaje regular e irregular en ninguna de las secciones.

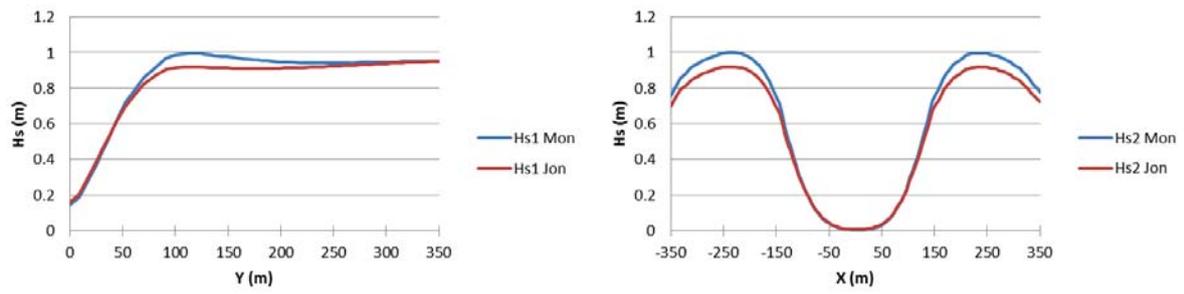


Figura 4.6: *Altura de ola significativa en las secciones S1 (izquierda) y S2 (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C2*

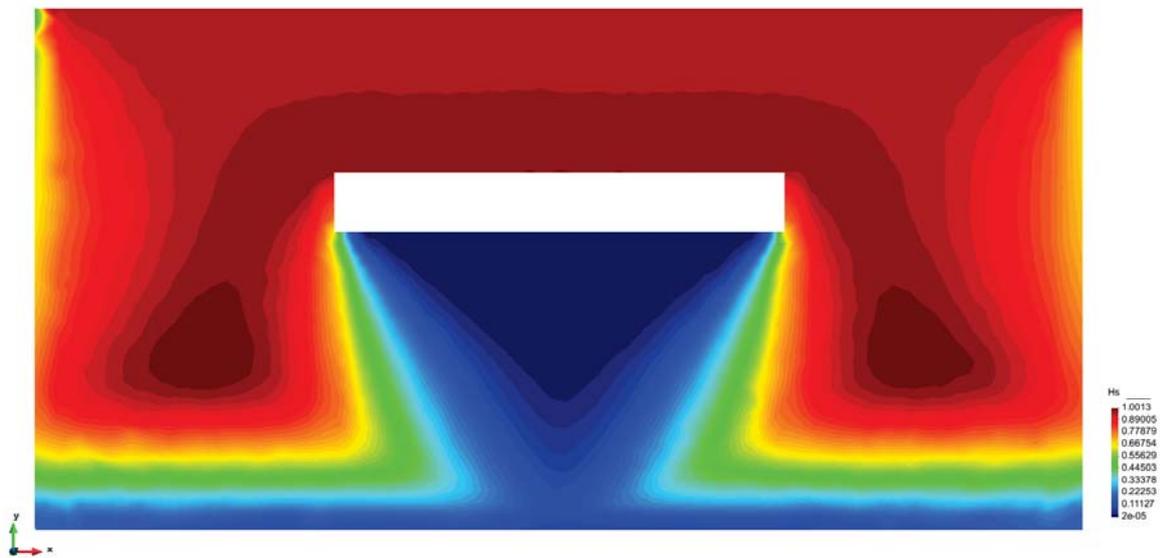


Figura 4.7: *Distribución de altura de ola significativa en el Caso C2 con oleaje monocromático regular*

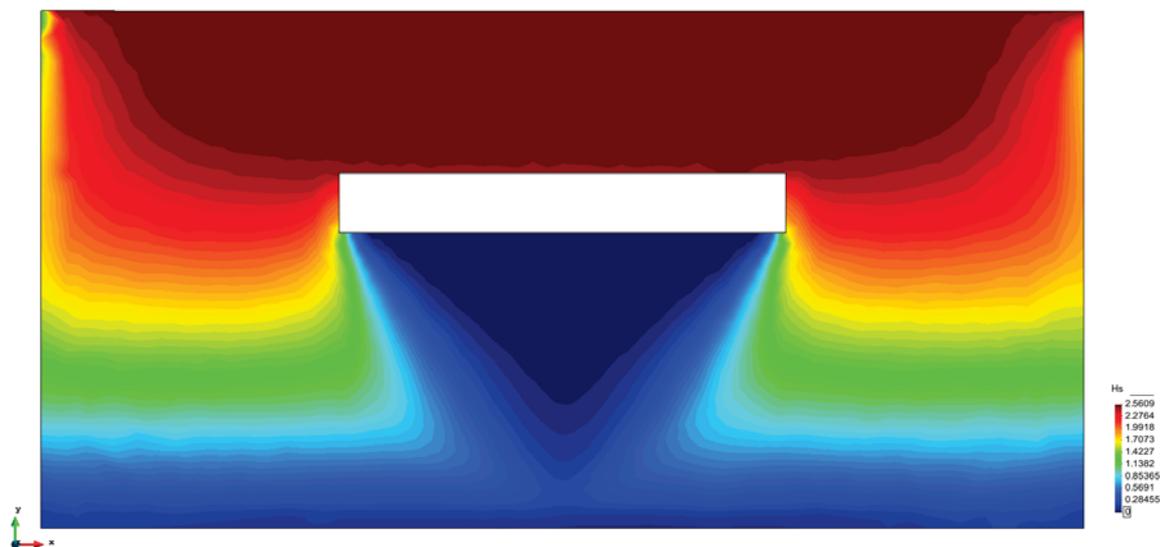


Figura 4.9: *Distribución de altura de ola significativa en el Caso C3 con oleaje monocromático regular*

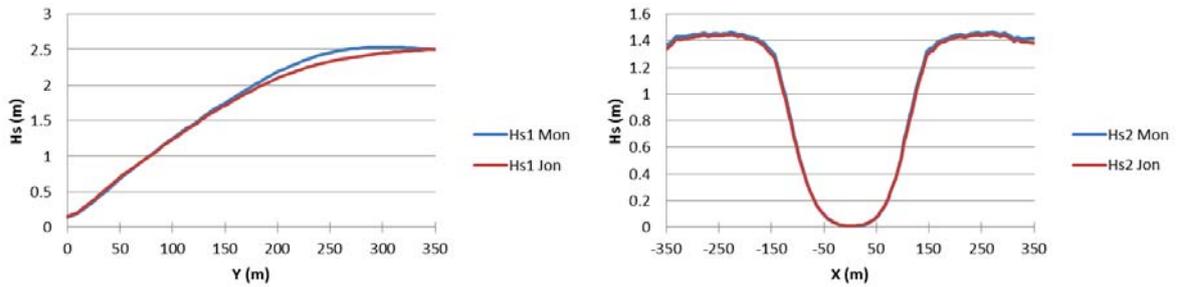


Figura 4.8: Altura de ola significativa en las secciones S1 (izquierda) y S2 (derecha) en el cálculo con SWAN para el Caso C3

### 4.3. Comparación de las fuerzas inducidas por el oleaje, calculadas con diferentes formulaciones interacción oleaje-corriente

#### 4.3.1. Procedimiento de análisis

En este apartado se realiza la comparación entre las diferentes formulaciones de interacción oleaje-corriente presentadas en el apartado 2.7: Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008). Para ello se han seleccionado una serie de puntos representativos en los cuales se realiza el cálculo de las fuerzas inducidas por el oleaje mediante un script de Matlab, en el cual están implementadas estas teorías. El cálculo se realiza tanto para la onda característica como para el espectro de energía, obteniéndose resultados muy similares. Se obtienen los perfiles en profundidad de dichas fuerzas, así como también imágenes en planta de la distribución de estas. La posición de los puntos definidos para el análisis se muestra en la Figura 4.10, y sus coordenadas y profundidades en la Tabla 4.1.

Punto	Coordenada x	Coordenada y	Profundidad (m)
P1	-150	300	6
P2	-250	120	2.4
P3	-150	120	2.4
P4	-50	120	2.4
P5	0	100	2

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en cada uno de los casos de estudio

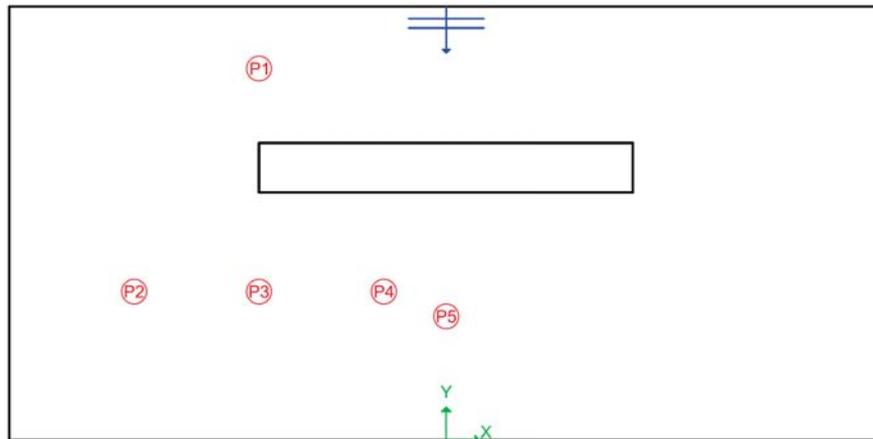


Figura 4.10: Localización de los puntos de análisis

### 4.3.2. Caso C1

#### Punto P1 (-150,300)

Los valores de la fuerza inducida por el oleaje en dirección x ( $F_x$  de ahora en adelante) (Figura 4.11), coinciden en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003), mientras que en Mellor (2008) coincide hasta profundidades cercanas a la superficie. En la superficie la teoría de Mellor (2008) aplica una fuerza en sentido contrario. Los valores de  $F_x$  son bajos, del orden de  $0.0002$ - $0.0006 \text{ N/m}^3$ , debido a que la dirección principal de propagación es en el eje y. En cuanto a la fuerza de radiación en dirección y ( $F_y$  de ahora en adelante) los valores siguen una tendencia paralela en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2008). La formulación de Mellor (2003) adopta una forma curva con una gran diferencia entre los valores en el fondo y en la superficie libre.

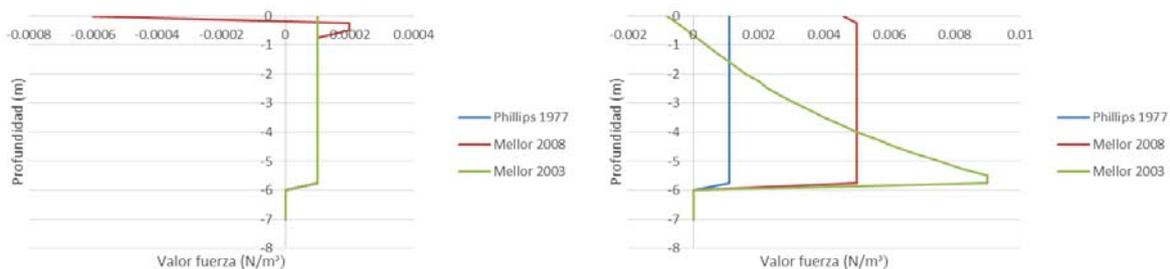


Figura 4.11: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P1 para el caso C1

### Punto P2 (-250,120)

Los valores de  $F_x$  coinciden en las teorías de Phillips (1977) y Mellor (2003) (Figura 4.12). Mellor (2008) tiene un comportamiento diferente, dando valores positivos mientras que los de las otras dos teorías son negativos. Mellor (2008) posee la fuerza en superficie que hace que la resultante tenga el mismo sentido que la obtenida con las teorías Phillips (1977) y Mellor (2003). En los valores de  $F_y$  las fuerzas obtenidas con todas las teorías tienen el mismo signo y por tanto el mismo sentido. Phillips (1977) y Mellor (2008) tienen un comportamiento similar, salvo en la superficie donde está aplicada la fuerza puntual en Mellor (2008). Mellor (2003) tiene un comportamiento totalmente diferente, adoptando una tendencia curva que varía entre los valores de Phillips (1977) y Mellor (2008).

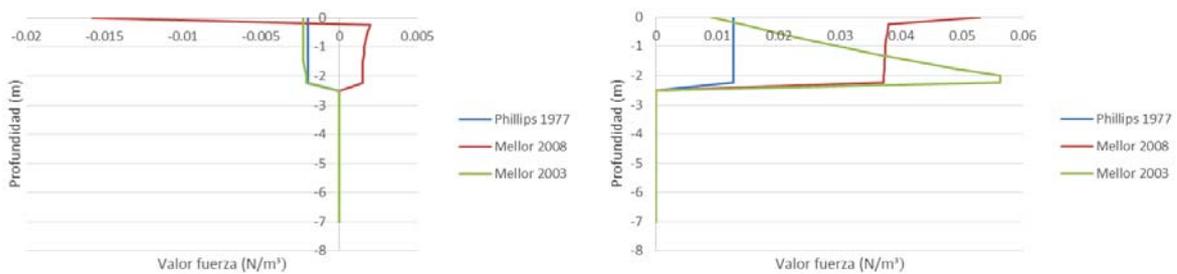


Figura 4.12: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P2 para el caso C1

### Punto P3 (-150,120)

Los resultados en el punto 3 (Figura 4.13) son similares a los obtenidos en el punto 2, difiriendo únicamente en el sentido de la fuerza en dirección  $x$ . En este punto las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2008), como en los puntos anteriores, tienen un comportamiento similar; mientras que con la formulación de Mellor (2003) se obtienen unos resultados que difieren en gran medida de las formulaciones anteriores.

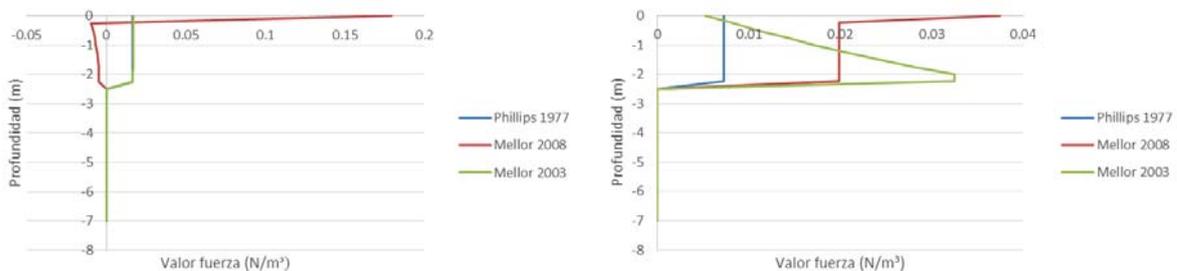


Figura 4.13: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P3 para el caso C1

### Punto P4 (-50,120)

En el punto 4 (Figura 4.14) los valores de la fuerza de radiación de dirección x e y son similares en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003). La formulación de Mellor (2008) arroja un perfil en profundidad de sentido contrario, pero la fuerza aplicada en la superficie hace que la resultante de fuerzas tenga el mismo sentido que las otras dos formulaciones.

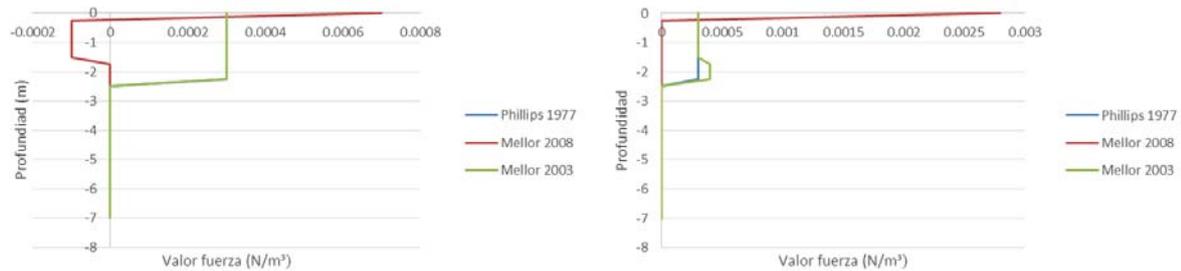


Figura 4.14: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P4 para el caso C1

El punto 5 no se analiza debido a que las formulaciones dan valores nulos de fuerza.

### 4.3.3. Caso C2

#### Punto P1 (-150,300)

Los valores de la fuerza de radiación en dirección x (Figura 4.15) en las formulaciones de Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008) siguen la misma tendencia y tienen el mismo sentido. Difiere Mellor (2008) en el valor de la fuerza en superficie, del orden de  $-0.035 \text{ N/m}^3$ ; mientras que en Phillips (1977) y Mellor (2003) es menor a  $0.01 \text{ N/m}^3$ . En cuanto a  $F_y$  Phillips (1977) y Mellor (2008) siguen el mismo comportamiento en profundidad, difiriendo en magnitud (Phillips (1977) del orden de  $0.1 \text{ N/m}^3$  y Mellor (2008) del orden de  $0.3 \text{ N/m}^3$ ). Mellor (2003) tiene un comportamiento totalmente diferenciado, su tendencia es curva con un valor máximo cercano a  $0.6 \text{ N/m}^3$ .

#### Punto P2 (-250,120)

Los valores de la fuerza de radiación en dirección x (Figura 4.16) en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) siguen la misma tendencia y valores. Mellor (2008) difiere en profundidad y en este caso la fuerza aplicada en superficie no hace que la resultante tenga el mismo sentido que Mellor (2003) y Phillips (1977). En la fuerza en dirección y, Phillips (1977) y Mellor (2008) tienen similar comportamiento, pero difieren en valores (Phillips (1977) se sitúa entorno a  $1 \text{ N/m}^3$  mientras que Mellor (2008) es del orden de  $3 \text{ N/m}^3$ ). Mellor (2003) en este caso tiene un comportamiento diferente en comparación con las dos formulaciones anteriores.

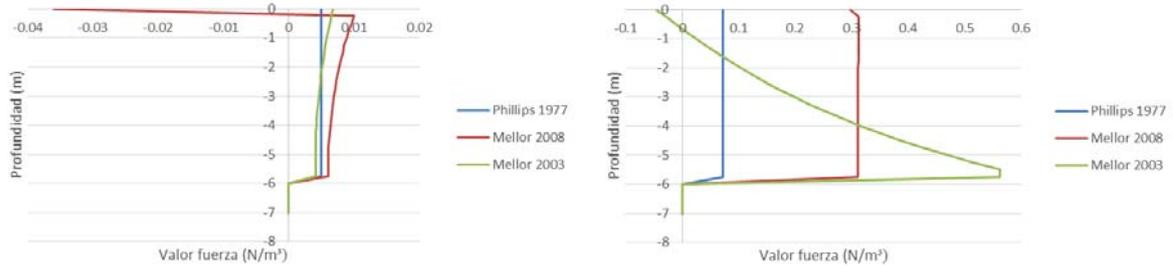


Figura 4.15: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P1 para el caso C2

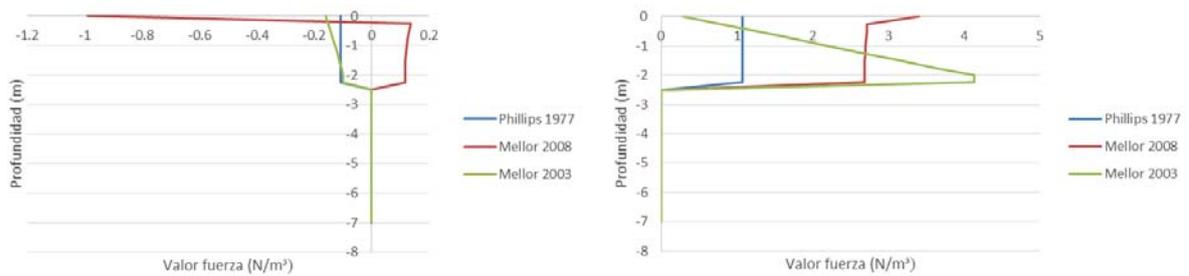


Figura 4.16: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P2 para el caso C2

### Punto P3 (-150,120)

Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en el punto 2, con la diferencia en el sentido de la fuerza de superficie en dirección  $x$  en la teoría de Mellor (2008). Tal y como se observa en la Figura 4.17, en comparación con la Figura 4.16, la principal diferencia es el cambio de sentido de la fuerza en superficie y en la magnitud de los valores obtenidos.

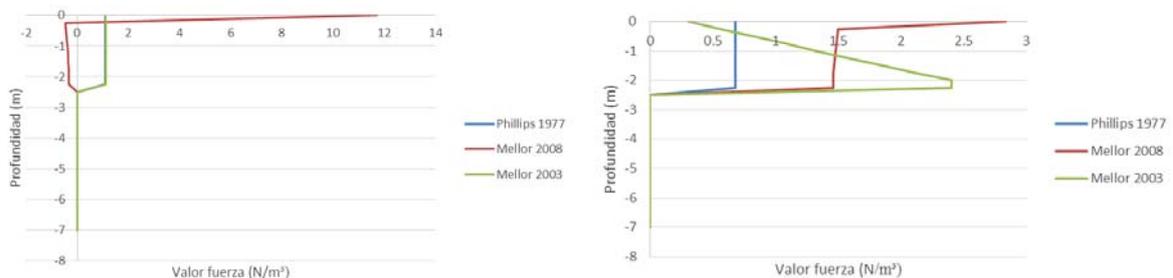


Figura 4.17: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P3 para el caso C2

**Punto P4 (-50,120)**

En los cálculos realizados en el punto 4 (Figura 4.14) Phillips (1977) y Mellor (2003) tiene igual comportamiento en la fuerza inducida por el oleaje en dirección x y en dirección y, siendo ambos perfiles prácticamente coincidentes. Mellor (2008) posee un comportamiento totalmente diferente siendo la fuerza aplicada en la superficie del orden de 5 veces superior a las que se obtienen en profundidad con las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003).

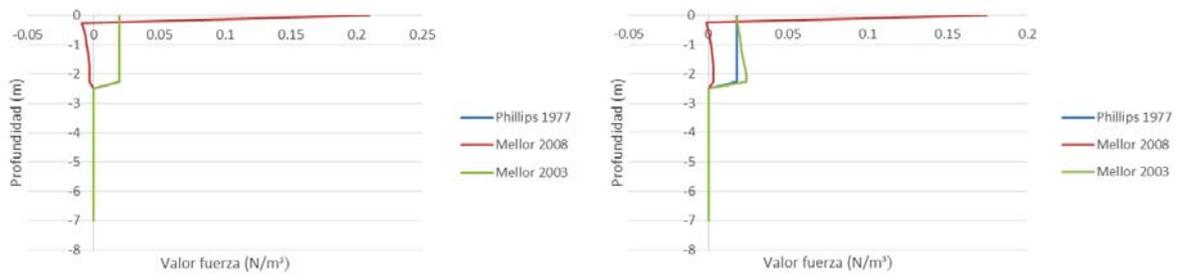


Figura 4.18: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P<sub>4</sub> para el caso C2

**Punto P5 (0,100)**

Los resultados de fuerza en dirección x e y (Figura 4.19) en las tres formulaciones tienen un comportamiento similar. La fuerza en superficie de Mellor (2008) es 4 veces mayor que los valores en profundidad de Phillips (1977) y Mellor (2003).

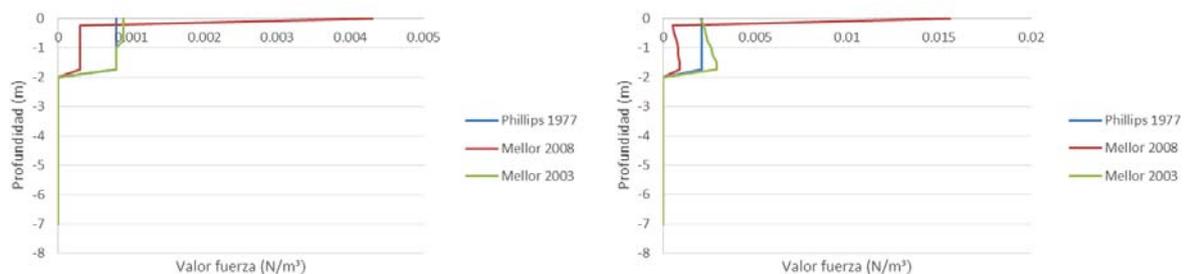


Figura 4.19: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P<sub>5</sub> para el caso C2

**4.3.4. Caso C3**

**Punto P1 (-150,300)**

Los valores de la fuerza de radiación en dirección x (Figura 4.20) en las tres formulaciones son similares tanto en valor como en tendencia. Las diferencias se presentan

en el valor de la fuerza en superficie de la formulación de Mellor (2008). En dirección y, la formulación de Phillips (1977) da valores bajos (del entorno de  $0.1 \text{ N/m}^3$ ), mientras que los valores de Mellor (2008) son del orden de  $2 \text{ N/m}^3$ . Los valores de Mellor (2003) son superiores a los obtenidos mediante Mellor (2008), y entre estas dos formulaciones existen diferencias en cuanto al comportamiento general.

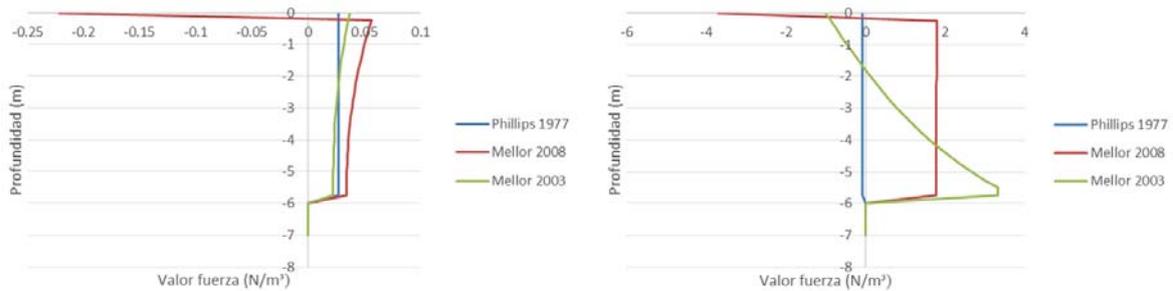


Figura 4.20: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto  $P1$  para el caso  $C3$

### Punto P2 (-250,120)

Los valores de la fuerza de radiación en dirección  $x$  (Figura 4.21) presentan similitudes en las tres formulaciones. La formulación de Mellor (2008) presenta menores valores en profundidad, mientras que que en la superficie los valores son similares a los que se obtienen mediante Phillips (1977) y Mellor (2003). En dirección  $y$  las formulaciones de Mellor (2008) y Phillips (1977) presentan unos valores similares en profundidad, mientras que difieren en gran medida en su valor en superficie. Los valores obtenidos mediante Phillips (1977) son mayores en profundidad que en las dos formulaciones anteriores.

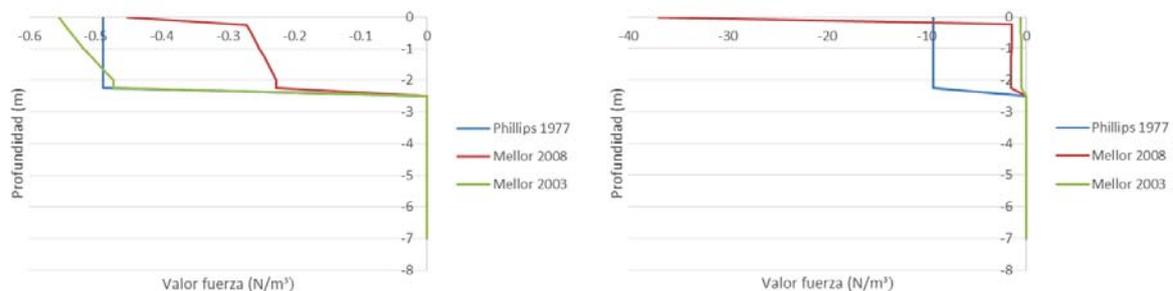


Figura 4.21: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto  $P2$  para el caso  $C3$

**Punto P3 (-150,120)**

Los valores de la fuerza de radiación en dirección x (Figura 4.22) son similares en las teorías de Phillips (1977) y Mellor (2003). Mellor (2008) presenta un comportamiento distinto, pero la fuerza aplicada en la superficie hace que lleve el sentido de Phillips (1977). En dirección y todas las formulaciones tienen un comportamiento diferente, destacando el caso de la formulación de Mellor (2003) que oscila entre los valores de las otras dos formulaciones. La fuerza en superficie de Mellor (2008) hace que esta y la formulación de Phillips (1977) adquieran el mismo sentido.

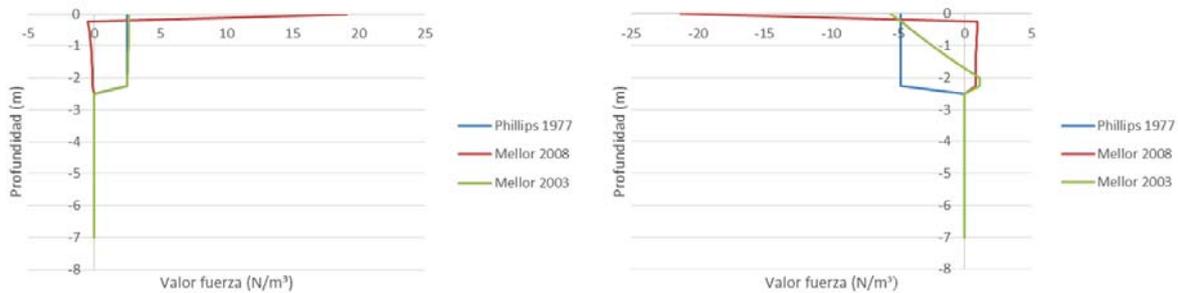


Figura 4.22: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P3 para el caso C3

**Punto P4 (-50,120)**

Los valores de la fuerza de radiación en dirección x (Figura 4.23) las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) proporcionan resultados idénticos, llegando a superponerse su perfil en profundidad. La formulación de Mellor (2008) en su perfil en profundidad tiene sentido contrario a estas dos formulaciones, sin embargo la fuerza en superficie hace que la resultante de fuerzas tenga el mismo sentido que estas dos formulaciones.

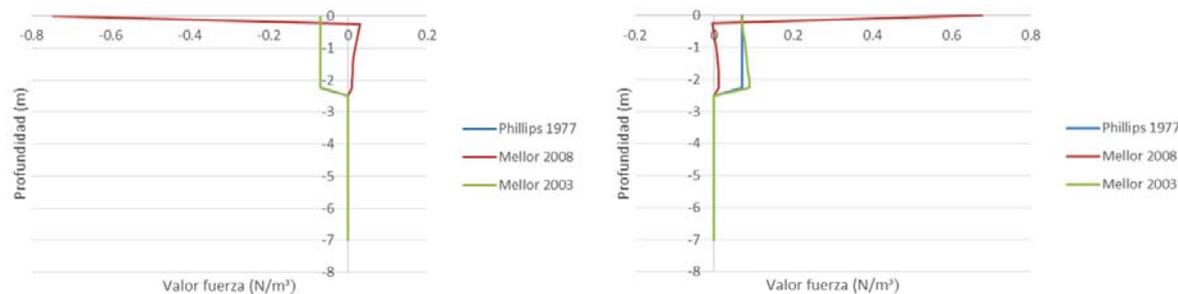


Figura 4.23: Fuerza inducida por el oleaje en dirección x (izquierda) y en dirección y (derecha), en el punto P4 para el caso C3

### Punto P5 (0,100)

En este punto las tres formulaciones proporcionan resultados similares tanto en dirección  $x$  como en  $y$  (Figura 4.24), destacando las similitudes entre las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003). La mayor diferencia es la fuerza en la superficie, donde la teoría de Mellor (2008) proporciona valores 6 veces superiores a los obtenidos por medio de las otras dos teorías.

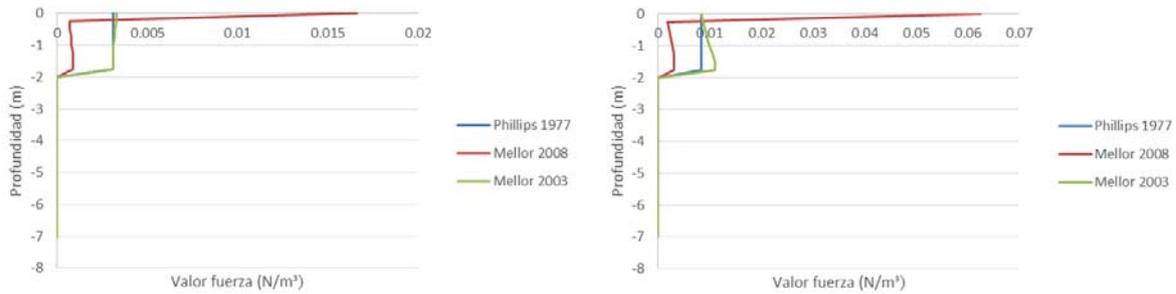


Figura 4.24: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (izquierda) y en dirección  $y$  (derecha), en el punto P5 para el caso C3

### 4.3.5. Conclusiones

Una vez realizado el análisis de los resultados en todos los puntos y con las distintas condiciones de oleaje, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) son las que más similitudes presentan, siendo en un gran número de puntos de estudio su distribución paralela y/o similar.
- Las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) poseen unos perfiles en profundidad similares en el caso de la fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$ , dirección en la cual la profundidad del fondo no varía. Sin embargo en dirección  $y$ , dirección en la que varía la profundidad, los perfiles en profundidad obtenidos con ambas formulaciones son muy diferentes.
- Mediante la formulación de Mellor (2008) se obtienen unos perfiles en profundidad muy diferentes a los obtenidos con las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003).
- La fuerza en superficie de Mellor (2008) posee unos valores muy superiores a los que se obtienen en su perfil en profundidad, siendo a su vez valores elevados en relación a los obtenidos con las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003).

## 4.4. Resultados con Iber

Mediante la propagación de oleaje realizada con SWAN se obtiene el campo de oleaje (altura de ola significativa, periodo pico y dirección) y las fuerzas inducidas por el oleaje calculadas mediante la formulación de Phillips (1977). Estos parámetros (campo de oleaje y fuerzas inducidas por el oleaje) son introducidos en el modelo Iber con el objetivo de obtener las corrientes generadas. Para el cálculo con el modelo Iber se dispone de una malla no estructurada (Figura 4.25), de 5218 elementos. Para facilitar el análisis de los resultados se analizan las secciones S1 y S2 definidas en la Figura 4.3.

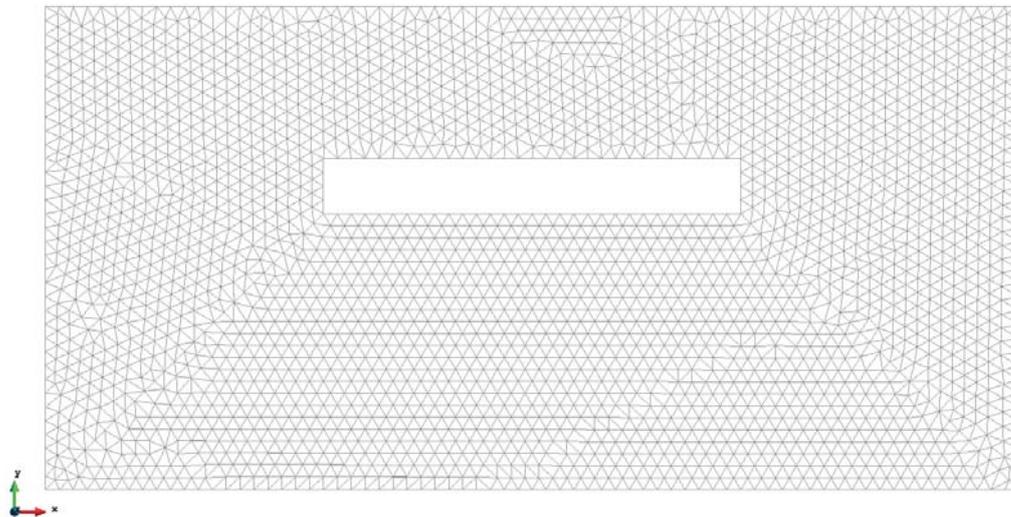


Figura 4.25: *Malla no estructurada utilizada en el cálculo en Iber*

### 4.4.1. Resultados

#### Caso C1

En la fuerza inducida por el oleaje se observan diferencias en función de la dirección estudiada. En dirección x (Figura 4.26) los valores de esta son reducidos (del orden de  $10^{-6} N/m^2$ ) debido que la dirección predominante del oleaje es perpendicular a dicho eje. No se observan diferencias significativas entre el caso de oleaje monocromático o espectral. En dirección y (Figura 4.27) tanto en el caso monocromático como en el espectral la forma que adopta es similar, existiendo las mayores diferencias en la sección 2 en la zona situada a 100 metros respecto al fin del dique y en la sección 1 en los 50 primeros metros en el eje y anteriores al dique.

Las velocidades promediadas en profundidad obtenidas con Iber en cada una de las dos secciones (Figuras 4.28 y 4.29) no difieren en gran medida entre el caso de oleaje regular monocromático y oleaje irregular. En la Figura 4.28 se observa que la velocidad

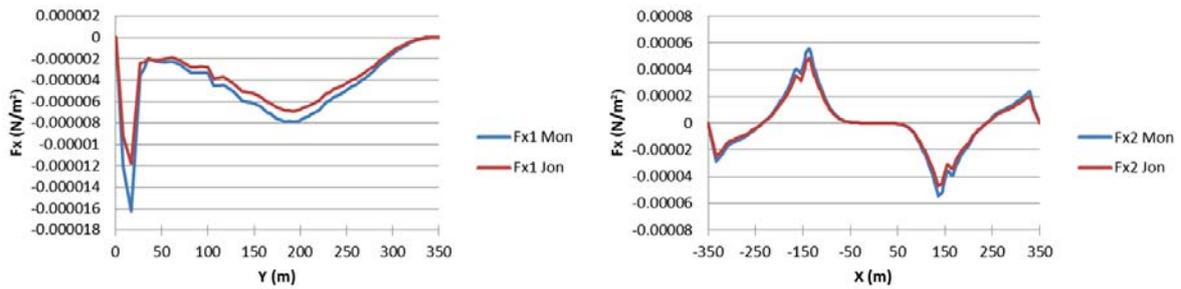


Figura 4.26: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C1$

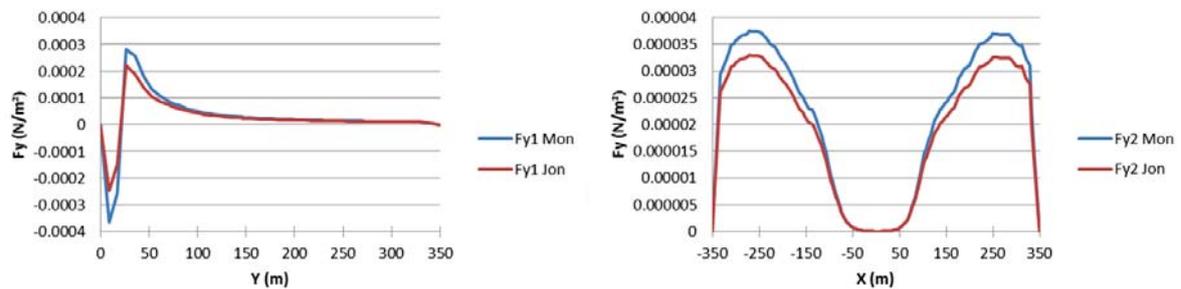


Figura 4.27: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C1$

en dirección  $x$  en la sección 2 presenta simetría en sus valores; hecho que se explica por la simetría existente en la geometría (Figura 4.30).

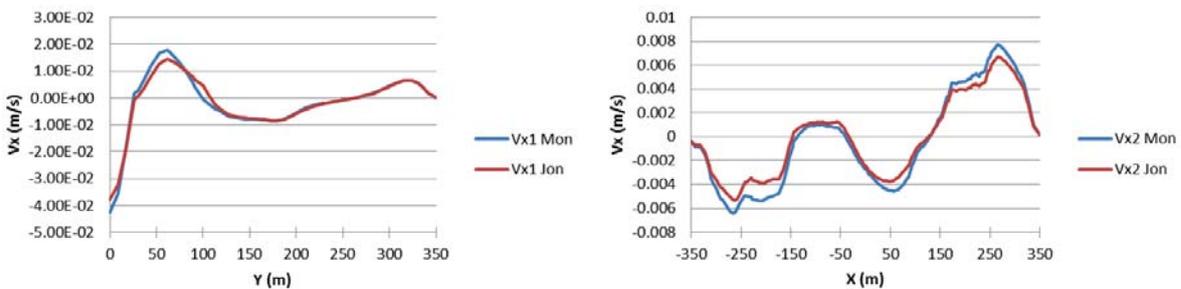


Figura 4.28: Velocidad promediada en profundidad en dirección  $x$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C1$

Por último en la lámina de agua (Figura 4.31) se produce en la sección 1 un descenso y ascenso acusado que coincide con el punto de rotura del oleaje. En la sección número 1 las mayores diferencias entre los cálculos con oleaje regular e irregular se encuentran en el comienzo de la sección ( $y = \pm 0\text{m}$ ) y en el punto dónde se produce el cambio de sentido en la fuerza de radiación en dirección  $y$  ( $y \simeq 25\text{ m}$ ), coincidente con la rotura del oleaje. En la sección número 2 las principales diferencias se sitúan en la zona protegida

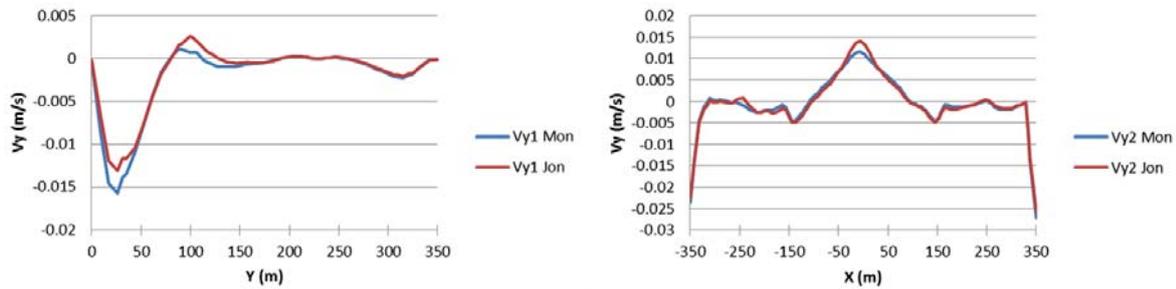


Figura 4.29: *Velocidad promediada en profundidad en dirección y en la sección S1 (izquierda) y sección S2 (derecha) para el caso C1*

de la acción del oleaje  $x \in [-150, 150]$  y en la zona de la sección  $x = \pm 250$  m.

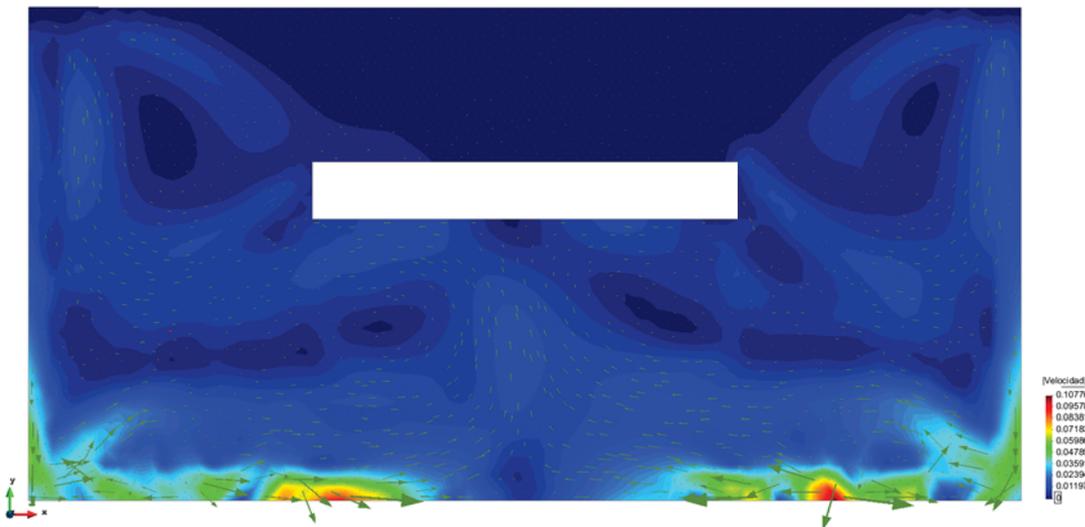


Figura 4.30: *Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en Caso C1 con oleaje regular monocromático*

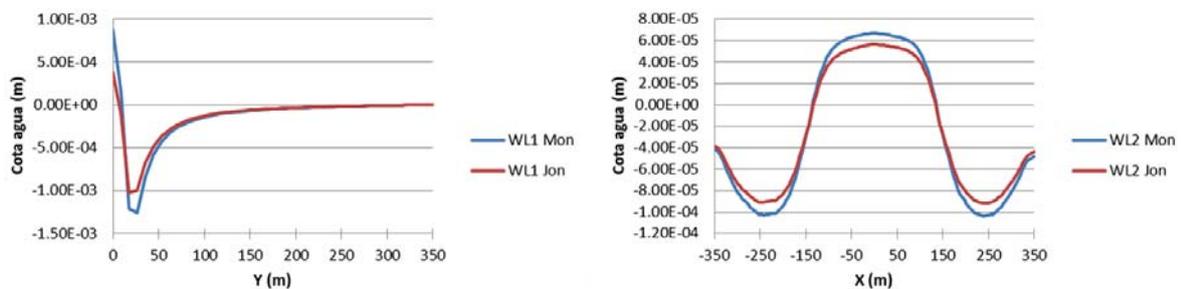


Figura 4.31: *Variación de la lámina de agua en la sección S1 (izquierda) y sección S2 (derecha) para el caso C1*

### Caso C2

Los valores de la fuerza inducida por el oleaje presentan diferente comportamiento en función de la dirección analizada. En dirección  $x$  (Figura 4.32), las mayores diferencias se producen en la sección 1, siendo en la sección 2 los valores de esta variable similares en cualquiera de los dos casos estudiados. En el caso de la fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  (Figura 4.33), los valores en la sección 1 son similares salvo en el valor mínimo (coordenada  $x = 50$  m) dónde la diferencia es del orden del 15 %. En la sección número 2, a pesar del paralelismo entre ambas curvas, se producen diferencias del orden del 33 %.

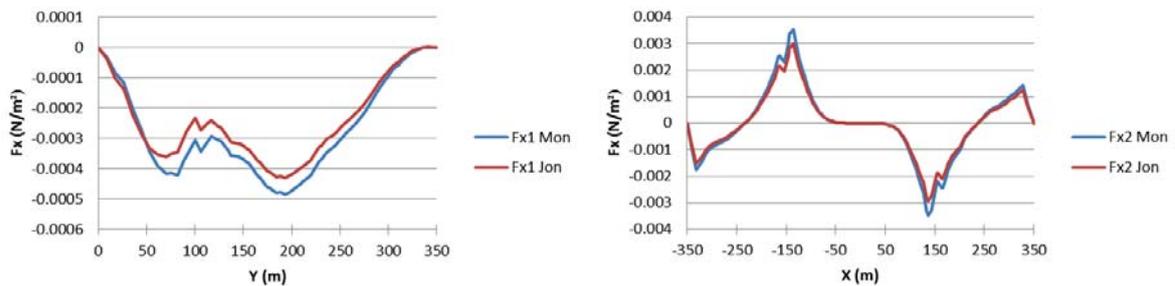


Figura 4.32: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C2$

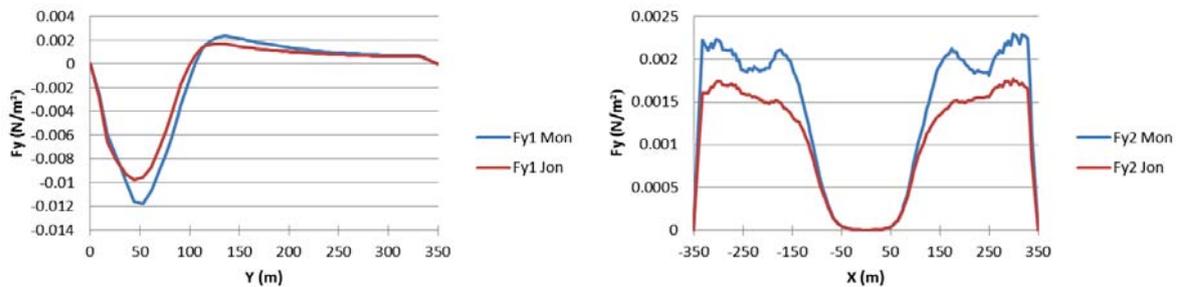


Figura 4.33: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C2$

Respecto a las velocidades promediadas en profundidad (Figura 4.34), se puede observar la formación de dos células de circulación en la zona abrigada por el dique. Este comportamiento no se podía representar con tal claridad en el caso  $C1$  ya que las fuerzas inducidas por el oleaje eran mucho menores.

La velocidad en dirección  $x$  (Figura 4.35), es coincidente en ambas secciones con pequeñas diferencias. Cabe mencionar la simetría que muestra la velocidad en dirección  $x$  en la sección número 2, debido a la simetría existente en la geometría de estudio. La velocidad en dirección  $y$ , es coincidente en ambas secciones, siendo esta más apreciable en la sección 2. Las mayores diferencias en este caso se producen en la sección 1, siendo estas del orden del 6 %.

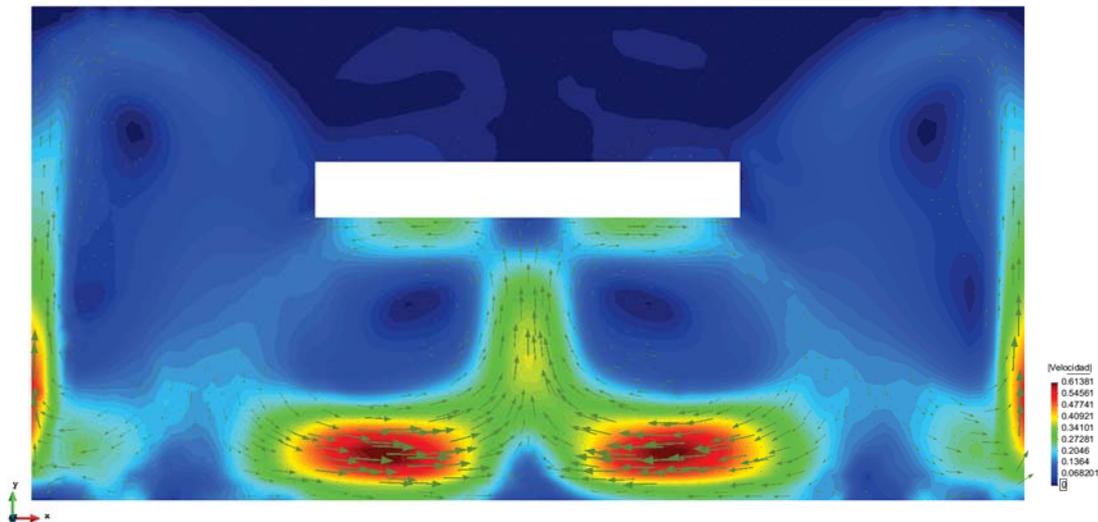


Figura 4.34: Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en Caso C2 con oleaje regular monocromático

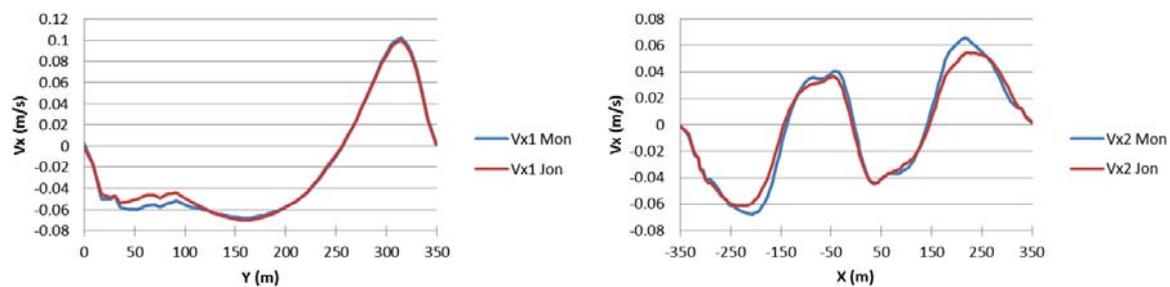


Figura 4.35: Velocidad promediada en profundidad en dirección  $x$  en la sección S1 (izquierda) y sección S2 (derecha) para el caso C2

Por último se analiza la variación de la lámina de agua (Figura 4.37). Se produce un descenso de la cota del agua de forma gradual hasta la zona de rotura, lugar en el que comienza a producirse el set-up. En la sección 1 las diferencias son prácticamente inexistentes, siendo en ambos casos coincidentes las curvas obtenidas con oleaje monocromático e irregular. Las mayores diferencias se producen en el caso de la sección 2, siendo estas más acusadas en el entorno de las abscisas  $x = 250$  m y  $x = -250$  m y del orden del 33%.

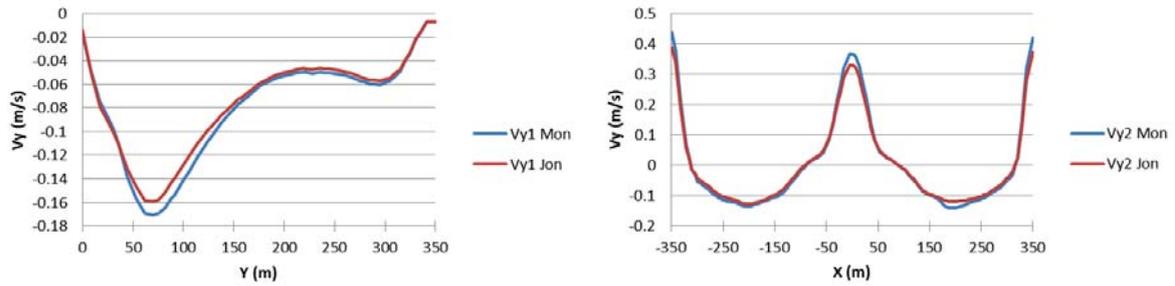


Figura 4.36: Velocidad promediada en profundidad en dirección  $y$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C2$

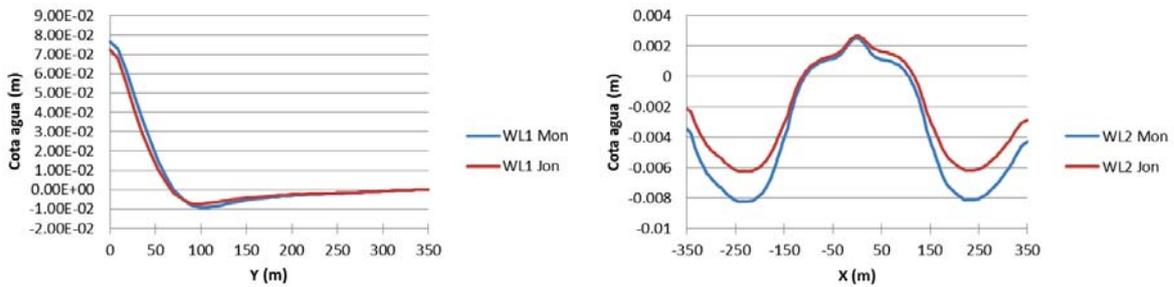


Figura 4.37: Variación de la lámina de agua en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C2$

### Caso C3

La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (Figura 4.38) presenta valores similares en ambas secciones entre los dos casos estudiados. En la sección 1 se observan algunas diferencias, aunque la tendencia de ambas curvas es similar; mientras que en la sección 2 ambas curvas son coincidentes. La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  presenta diferencias significativas en la sección 1. En esta sección estas diferencias llegan a ser del orden del 30 %, siendo las fuerzas generadas en el caso de oleaje irregular en general mayores que el caso de oleaje monocromático. Por el contrario en la sección 2 los valores de la fuerza inducida son prácticamente coincidentes.

Respecto a la velocidad promediada en profundidad en dirección  $x$  (Figura 4.40) presenta un comportamiento idéntico en el caso de oleaje monocromático e irregular, tanto en la sección 1 como en la 2. La velocidad en dirección  $y$  (Figura 4.41) presenta pequeñas diferencias en la sección 1 mientras que en la sección 2 ambas curvas son coincidentes.

En cuanto a la distribución en planta de velocidades se observan dos células de circulación cerradas en la parte posterior del dique. Estas son producidas por el gradiente de altura de ola que se observa en la Figura 4.8. Existen otras dos células de circulación que son debidas a las condiciones de contorno impuestas, y que no tienen influencia sobre las dos células principales anteriormente comentadas.

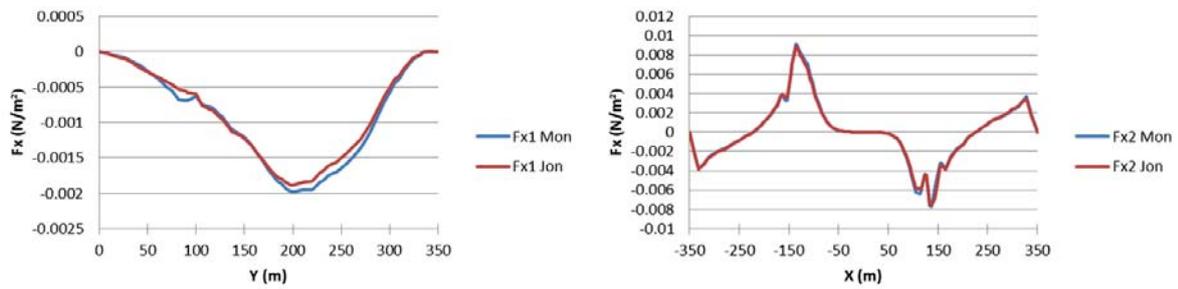


Figura 4.38: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  en la sección S1 (izquierda) y sección S2 (derecha) para el caso C3

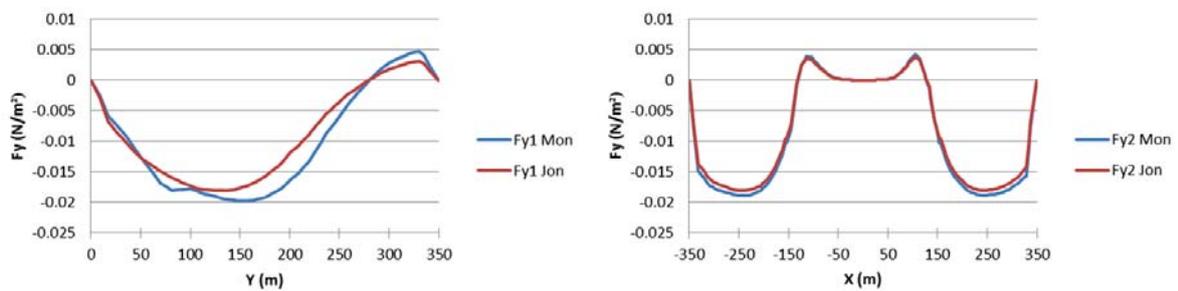


Figura 4.39: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  en la sección S1 (izquierda) y sección S2 (derecha) para el caso C3

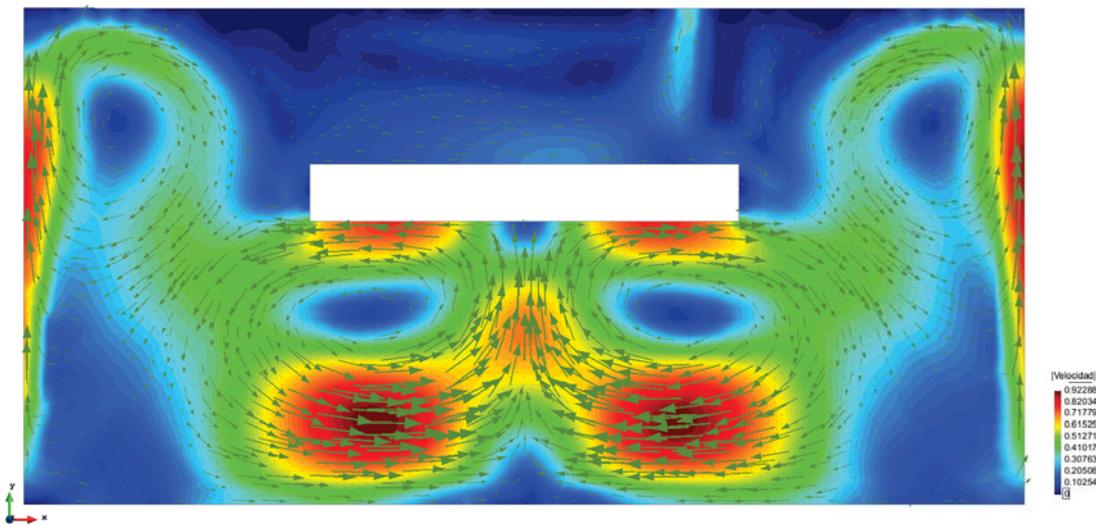


Figura 4.42: Planta con distribución de velocidades promediadas en profundidad con sus vectores de dirección en el Caso C3 con oleaje regular monocromático

Por último se analiza la variación de la lámina del agua (Figura 4.43). Se produce un muy ligero descenso de la lámina hasta la ordenada  $y=250$  m, lugar en el cual comienza el crecimiento de la cota del agua (set-up) debido a la rotura del oleaje. En la sección

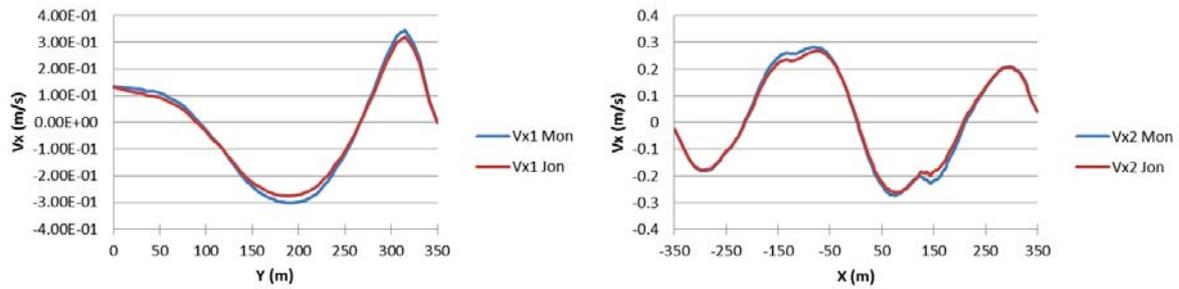


Figura 4.40: Velocidad promediada en profundidad en dirección  $x$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C3$

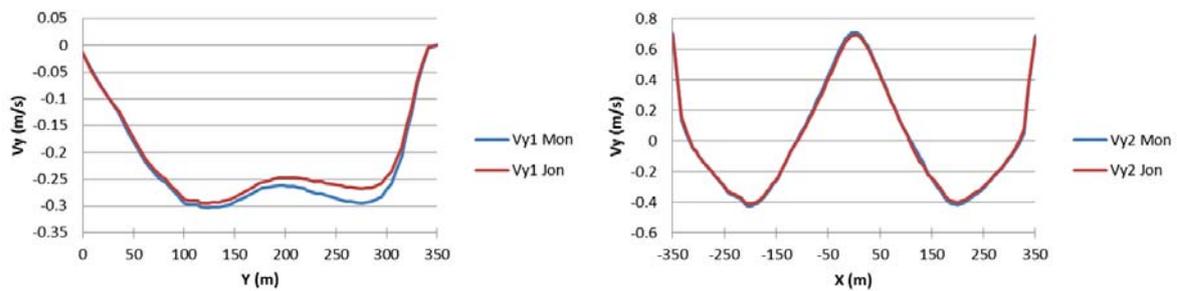


Figura 4.41: Velocidad promediada en profundidad en dirección  $y$  en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C3$

1 los valores de set-up presentan pequeñas diferencias. En la sección 2 los valores en el caso de oleaje regular son mayores que en el caso de oleaje irregular, siendo ambas curvas sensiblemente paralelas.

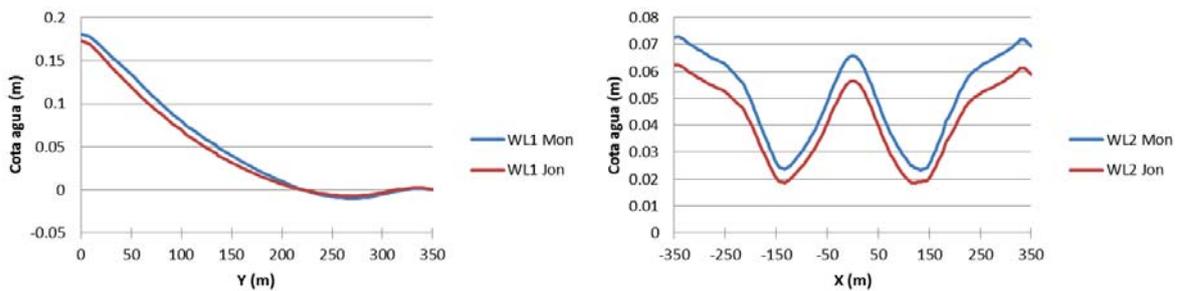


Figura 4.43: Variación de la lámina de agua en la sección  $S1$  (izquierda) y sección  $S2$  (derecha) para el caso  $C3$

#### 4.4.2. Conclusiones

Las principales diferencias observadas en las corrientes generadas en los tres casos se deben a la distribución de la altura de ola significativa en la sección 1 (Figuras 4.4,

4.6, 4.8). En el primer caso no se produce prácticamente decrecimiento, mientras que a medida que se aumenta la no linealidad del oleaje la altura de ola decrece a medida que se aproxima a la orilla. Este hecho es debido al fenómeno de rotura de oleaje conforme avanza hacia la orilla.

Respecto a la fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$ , no se observan diferencias apreciables entre los casos realizados con oleaje monocromático e irregular para unas mismas condiciones de oleaje.

La velocidad promediada en profundidad en dirección  $x$  (Figuras 4.28, 4.35, 4.40), diverge su comportamiento a medida que aumenta la no linealidad del oleaje. En el caso C1 las mayores velocidades se producen en la orilla de forma irregular. Sin embargo, a medida que aumenta la no linealidad del oleaje se forman células de circulación en la parte posterior al dique alejándose de la orilla a medida que las condiciones de oleaje son más no lineales.

Por último la variación de la lámina de agua en la sección 1 presenta un comportamiento más suavizado cuanto más no lineal es el oleaje. En el caso C1 la transición entre la zona de set-up y set-down se produce de forma brusca, mientras que esta zona de transición se amplía en el caso C2 y su comportamiento es más suavizado en el caso C3.

## 4.5. Resultados con Freeflow

### 4.5.1. Procedimiento de cálculo

Las simulaciones realizadas con Freeflow tienen como objetivo el comparar los resultados obtenidos con diferentes formulaciones de interacción oleaje-corriente 3D. Para realizar los cálculos con Freeflow es necesario realizar previamente el cálculo de las condiciones de oleaje en los casos de estudio mediante SWAN. Estos resultados son los mismos que se emplean en Iber, con la diferencia de que en este caso se toman las características del oleaje ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ ) con el objetivo de calcular las fuerzas inducidas por el oleaje con las formulaciones presentadas en el capítulo 2.7 (Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008)). La malla utilizada en el cálculo con Freeflow (Figura 4.44) está compuesta por 98380 elementos hexaédricos (9838 elementos en el plano XY y 10 planos en vertical). Se aplica la aproximación rigid lid (tapa rígida) para la obtención de las sobreelevaciones, ya que los valores esperados son muy inferiores al calado.

### 4.5.2. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con Freeflow. Se presentan únicamente los resultados correspondientes a la condición de oleaje irregular espectral C3, ya que el comportamiento cualitativo a efectos de comparaciones es similar en los tres casos estudiados (C1, C2 y C3).

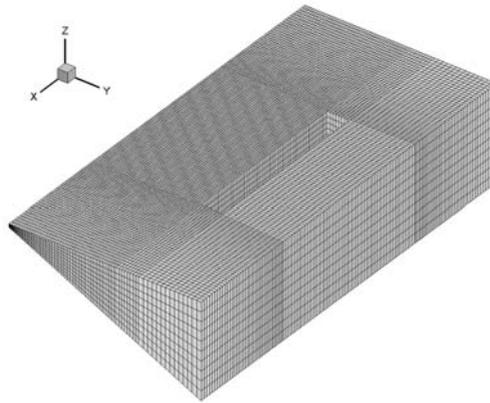


Figura 4.44: Malla utilizada en el cálculo con Freeflow 3D

### Formulación de Longuet Higgins - Phillips 1977

La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (Figura 4.45) se concentra en las esquinas del dique y en una zona de reducida extensión detrás de este. La distribución de la fuerza en profundidad es uniforme, ya que como se ha mencionado en capítulos anteriores la formulación de Phillips es una formulación 2D por lo que para utilizarla con un modelo de corrientes 3D la fuerza ha de distribuirse uniformemente en la columna de agua.

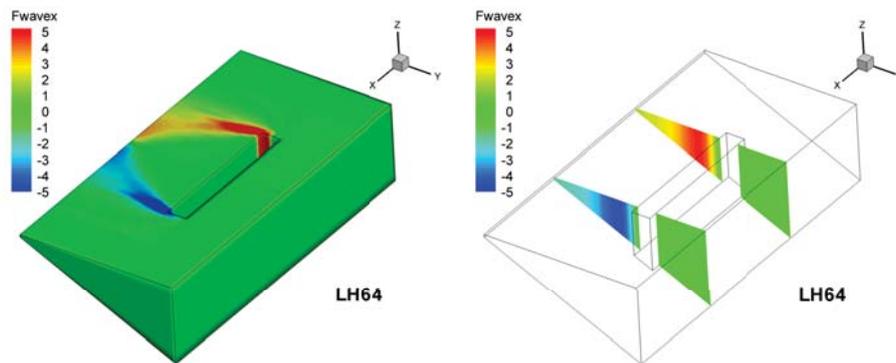


Figura 4.45: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Phillips (1977)

La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$  (Figura 4.46) presenta mayores valores. Los puntos con una mayor magnitud se localizan en las esquinas del dique (debido a la difracción) y en la zona con baja profundidad (debido a la rotura del oleaje). En los puntos situados a ambos lados del dique (en la zona no abrigada) la fuerza  $F_y$  se dirige hacia la costa, debido a la propagación del oleaje en esa dirección; mientras que en las zonas abrigadas (zona posterior del dique) la fuerza se dirige hacia

mar abierto.

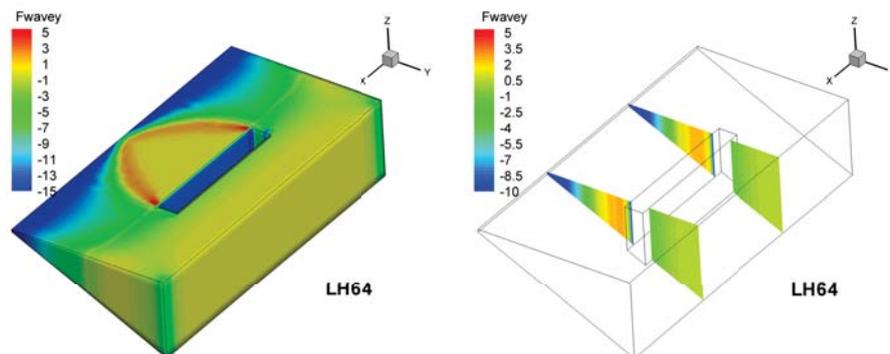


Figura 4.46: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $y$ . Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Phillips (1977)

En la Figura 4.47 se muestra la presión en la superficie libre, que nos permite obtener la sobreelevación de la lámina de agua, y la velocidad en dirección  $x$ . Las velocidades se caracterizan por concentrarse en dos zonas. La primera de ellas es el paramento posterior al dique, en donde existe una diferencia importante de altura de ola entre la zona expuesta a la acción del oleaje y la zona abrigada. La otra zona son las dos células de circulación que se producen en la zona que no está expuesta a la acción del oleaje. Las velocidades máximas son del orden de 1 a 1.35 m/s. La presión de la columna de agua nos permite calcular una sobreelevación de la lámina de agua de unos 23 cm en la zona más próxima a la orilla y de unos 15 cm en la zona no abrigada situada en la prolongación del eje del dique.

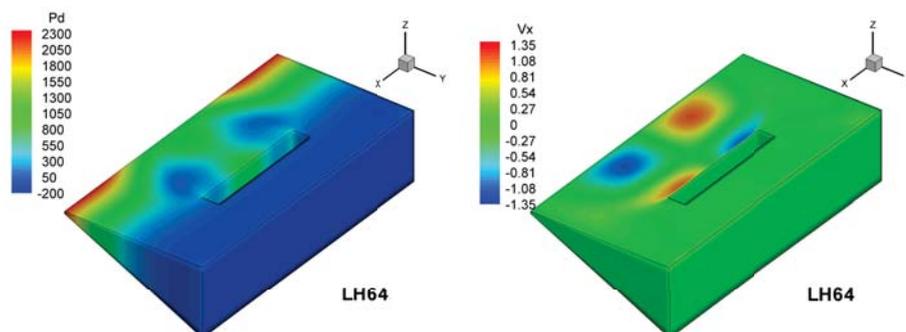


Figura 4.47: Presión de la columna de agua (izquierda) y velocidad en dirección  $x$  en el caso C3, obtenidas en Freeflow con la formulación de Phillips (1977)

Los resultados son similares a los obtenidos con Iber (Figura 4.48) localizándose las zonas con una mayor velocidad en las esquinas del dique y en las células de circulación

en la orilla. La magnitud y extensión de las zonas con mayores velocidades, así como la sobreelevación de la lámina de agua, es similar en ambos casos.

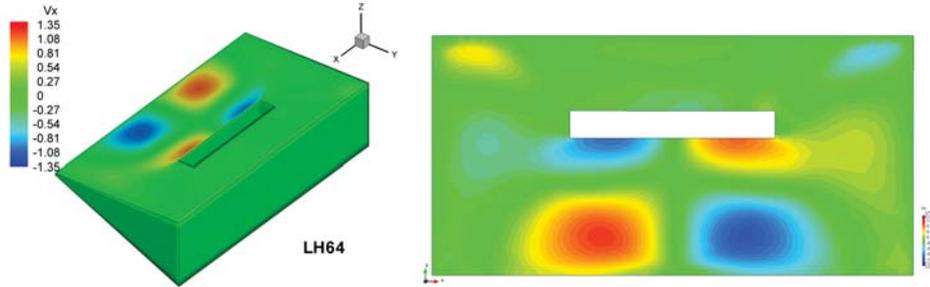


Figura 4.48: Velocidad en dirección  $x$  obtenida con *Freeflow* (izquierda) y velocidad promediada en profundidad dirección  $x$  obtenida con *Iber* (derecha), para el caso C3 con oleaje irregular.

### Formulación de Mellor (2003)

La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  (Figura 4.49) en la formulación de Mellor (2003) es prácticamente idéntica a la obtenida con la formulación de Phillips (1977) (Figura 4.45). De hecho, en Mellor (2003) se afirma que la integración en profundidad de las expresiones que propone para las fuerzas inducidas por el oleaje resultan ser las obtenidas en Phillips (1977). Sin embargo, se ha probado en Arduin et al. (2008a) que la distribución vertical de las fuerzas inducidas por el oleaje no es válida en el caso de oleaje con asomeramiento. En la Figura 4.50 se observa que en dirección  $y$  (dirección en la cual el fondo es variable) la magnitud de la fuerza inducida por el oleaje no coincide con la obtenida mediante la formulación de Phillips (1977). Ello conduce a que la sobreelevación del agua y las velocidades obtenidas mediante la formulación de Mellor (2003) (Figura 4.51) sean sensiblemente diferentes a las obtenidas con la formulación de Phillips (1977) (Figura 4.47). Con la formulación de Mellor (2003) la magnitud del set-up y la intensidad de las células de recirculación son menores que las obtenidas con Phillips (1977).

### Formulación de Mellor (2008)

La fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$  en la formulación de Mellor (2008) (Figura 4.52) posee un comportamiento diferente al que se obtiene en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003). Mediante esta formulación se obtiene una fuerza puntual en superficie mucho mayor que en profundidad, asociada a la mitad de la energía del oleaje. Existe una gran diferencia entre la fuerza en superficie (del orden de  $5 \text{ N/m}^3$ ) y a una profundidad de 2 metros, donde la fuerza inducida por el oleaje se ve reducida a las esquinas del dique.

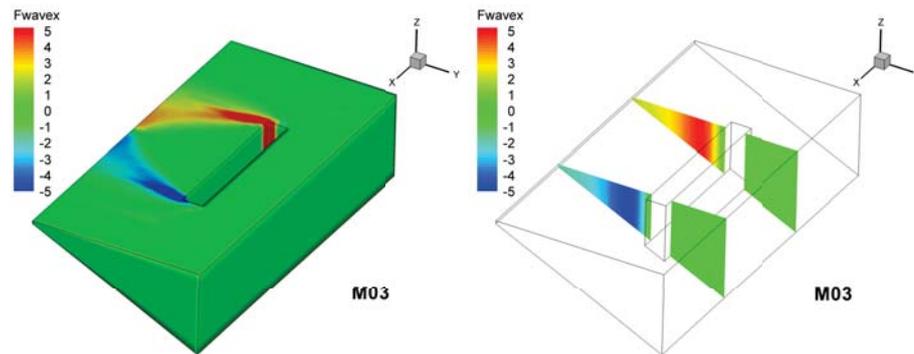


Figura 4.49: *Fuerza inducida por el oleaje en dirección x. Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2003)*

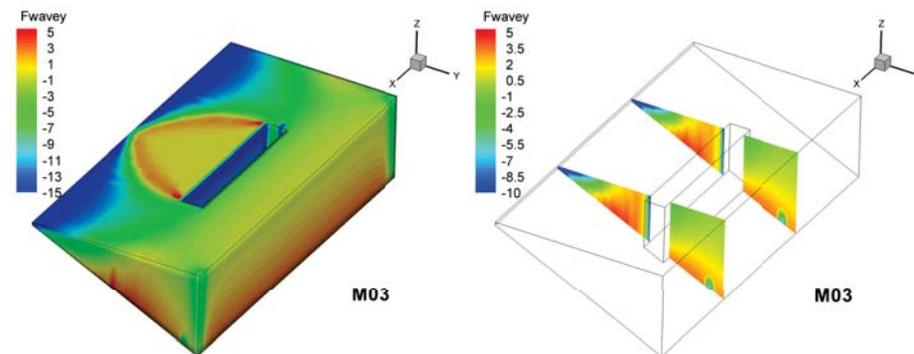


Figura 4.50: *Fuerza inducida por el oleaje en dirección y. Distribución (izquierda) y sección mediante un plano vertical (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2003)*

En la formulación de Mellor (2008) la integración de las tensiones de radiación dadas por la ecuación (2.27) resulta igual a las expresiones propuestas por Phillips (1977) para las tensiones de radiación integradas en profundidad. Sin embargo, como se demuestra en Bennis y Ardhuin (2011), el hecho de que el promedio en profundidad de las tensiones de radiación según Mellor (2008) sea igual a las propuestas por Phillips (1977), no implica que las fuerzas promediadas en profundidad sean necesariamente iguales.

Utilizando la formulación de Mellor (2008) se obtiene la presión de la columna de agua y la velocidad en dirección  $x$  mostradas en la Figura 4.53. El patrón de velocidad es similar al obtenido mediante las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003). Sin embargo la magnitud de la velocidad es menor a las obtenidas con estas dos formulaciones, debido a la mayor fuerza en la superficie y la consiguiente reducción de la fuerza inducida por el oleaje en su distribución en profundidad.

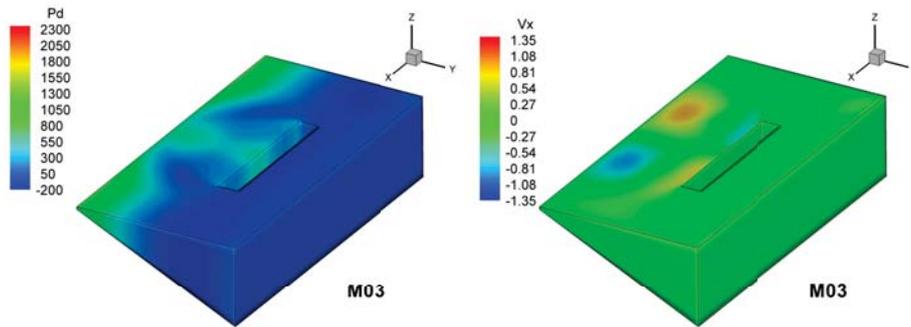


Figura 4.51: Presión de la columna de agua (izquierda) y velocidad en dirección  $x$  en el caso  $C3$ , obtenidas en Freeflow 3D con la formulación de Mellor (2003)

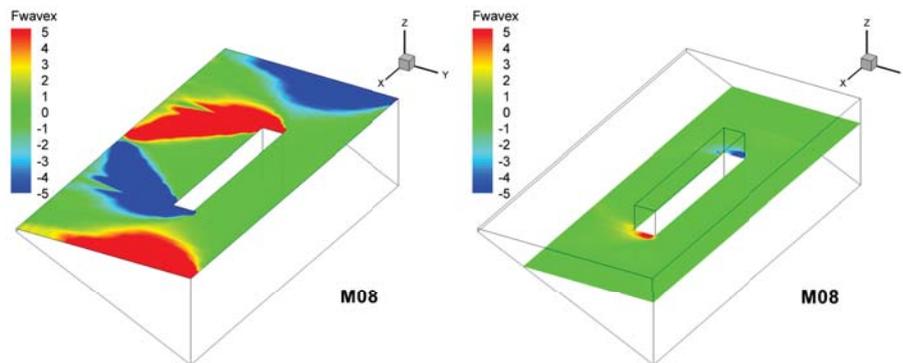


Figura 4.52: Fuerza inducida por el oleaje en dirección  $x$ . En la superficie (izquierda) y en un plano a 2 metros de profundidad (derecha) en el caso de la formulación de Mellor (2008)

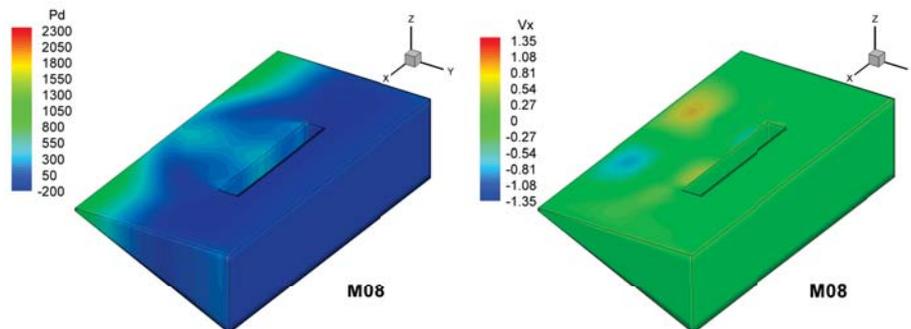


Figura 4.53: Presión de la columna de agua(izquierda) y velocidad en dirección  $x$  en el caso  $C3$ , calculadas en Freeflow 3D con la formulación de Mellor (2008)

### 4.5.3. Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos mediante Freeflow permite establecer las siguientes conclusiones:

- Mediante las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) se obtienen resultados idénticos en la fuerza inducida por el oleaje en dirección x. Esto es debido a que en esa dirección no existe variación del fondo y por tanto las expresiones propuestas por Mellor (2003) integradas en profundidad permiten obtener las propuestas en Phillips (1977).
- Las fuerzas inducidas por el oleaje en dirección y obtenidas con las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) son diferentes, ya que en esa dirección se produce variación del fondo, y tal y como se ha señalado en Ardhuin et al. (2008a) este hecho implica que la integración en profundidad de las fuerzas calculadas según Mellor (2003) no sea igual a la propuesta por Phillips (1977).
- El hecho de que la fuerza en dirección y sea diferente en las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) provoca que las velocidades de las corrientes y el set-up sean diferentes.
- Las expresiones propuestas en la formulación de Mellor (2008) integradas en profundidad permiten obtener las tensiones de radiación propuestas por Phillips (1977), sin embargo las corrientes inducidas por el oleaje son sensiblemente diferentes entre estas dos teorías.
- Los resultados obtenidos para la formulación de Phillips (1977) por medio de Iber y Freeflow son similares, no existiendo diferencias apreciables entre ellos.

## 4.6. Resultados con SWASH

### 4.6.1. Procedimiento de cálculo

En el presente apartado se describen los criterios utilizados para la definición de los parámetros de cálculo utilizados en el modelo numérico SWASH. La elección de estos parámetros es de gran importancia, ya influye en la estabilidad del modelo y en los resultados obtenidos.

Para definir los parámetros de cálculo en las simulaciones se han realizado diversos casos test, con diferentes tamaños de malla (horizontal y vertical) y variando los parámetros del modelo. Los principales parámetros que se han analizado son los siguientes:

- Tamaño de malla horizontal y vertical. Las primeras simulaciones se realizarán con unos tamaños de malla de 20 metros en horizontal y 3 planos en vertical. Estos

tamaños de malla se utilizan para lograr un menor tiempo de cálculo, ya que el objetivo de estos primeros casos es el obtener los parámetros de la simulación final. La simulación final, que es con la que se realizan las comparaciones posteriores, posee un tamaño de malla horizontal de 5 metros y 20 planos en su malla vertical.

- Background viscosity. Este parámetro proporciona el valor mínimo que toma la viscosidad turbulenta en el caso que el obtenido por el modelo de turbulencia sea excesivamente bajo. En las simulaciones realizadas se adoptan valores que varían desde los  $0.001 \text{ m}^2/s$  hasta  $1 \text{ m}^2/s$ .
- Modelo de turbulencia horizontal. Las simulaciones se han realizado con tres modelos de turbulencia (Constante, Longitud de mezcla y Smagorinski) variando en cada uno de ellos sus parámetros. Para el caso del modelo que supone la viscosidad turbulenta constante los parámetros varían desde  $0.001 \text{ m}^2/s$  hasta  $1 \text{ m}^2/s$ .

En el caso del modelo de longitud de mezcla se calcula la viscosidad turbulenta a partir de la ecuación de Prandtl:

$$\mu_t = \rho \cdot l_m^2 \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

La ecuación de Prandtl depende de los gradientes de velocidad y de la escala espacial turbulenta. El parámetro introducido en el modelo es  $l_m$  que toma valores desde 1 m hasta 10 m.

En el modelo de Smagorinski la escala espacial turbulenta viene determinada por el tamaño de malla y por una constante introducida en el modelo. Se calcula la viscosidad turbulenta mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_t = A \cdot \Delta_x \Delta_y \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 0,5 \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} \quad (4.2)$$

dónde la constante introducida en SWASH es  $A$ . Los valores de la constante introducida varían entre 0.10 y 1.

Se han realizado 85 simulaciones variando los parámetros anteriores con el fin de analizar su efecto en los resultados. En el análisis se ha tenido en cuenta la estabilidad de los resultados obtenidos, que se alcance una situación estacionaria, la simetría en los resultados obtenidos y que estos tengan sentido físico (altura de ola significativa y velocidades dentro de un rango adecuado). Con esta serie de simulaciones la simulación final se calcula con los siguientes parámetros:

- Tamaño de malla horizontal: 5 metros
- Número de planos horizontales: 20 planos
- Background viscosity:  $0.1 \text{ m}^2/s$

- Modelo de turbulencia vertical: Modelo  $k - \epsilon$
- Modelo de turbulencia horizontal: Modelo de Smagorinski con un valor de la constante de 0.75
- Tiempo de cálculo: 3 horas

### 4.6.2. Resultados

Para todas las combinaciones de parámetros numéricos considerados, los resultados con SWASH siempre presentan oscilaciones numéricas en la altura de ola (Figuras 4.54, 4.56 y 4.58), siendo estas mayores en el caso C1 y menores en el caso C3.

#### Caso C1

La altura de ola significativa  $H_s$  presenta diferente comportamiento según se realice el cálculo con oleaje regular o con oleaje irregular espectral, tal y como se observa en la figura 4.54. En ambos casos se observa la difracción en el dique que produce unas menores alturas de ola en las zonas situadas tras este. En la zona del dique expuesta al oleaje se presenta un comportamiento diferente, ya que en el caso de oleaje regular existen puntos cuya altura de ola es cero; mientras que en el caso espectral esto no sucede. Esta situación se produce por la reflexión que genera el dique. Al tratarse de oleaje regular tanto la onda original como la reflejada poseen las crestas y los senos en la misma posición, originándose una onda estacionaria en la que existen estos puntos con altura significativa nula.

En el resto de zonas los dos casos difieren su comportamiento, ya que en el caso de oleaje regular los máximos valores de altura de ola se distribuyen de forma irregular sobre la superficie; mientras que en el caso de oleaje espectral estos tienen una distribución casi simétrica, intercalándose valores máximos e intermedios.

La velocidad media integrada en profundidad en dirección  $x$  (Figura 4.55) presenta un comportamiento similar en ambos casos (oleaje regular e irregular). Se distinguen dos células de circulación en la parte posterior al dique, contando en el caso de oleaje regular con una mayor extensión. La zona de mayores velocidades se produce en el paramento interior del dique, lo cual es un resultado esperable ya que es una zona con un gran gradiente de altura de ola. La magnitud de los resultados no varía en exceso entre los casos, siendo los valores máximos del orden de 0.03 m/s.

#### Caso C2

La altura de ola significativa  $H_s$  (Figura 4.56) presenta un comportamiento diferente en los casos de oleaje regular e irregular. En el primero se destacan los puntos con altura significativa nula, como sucedía en el caso C1, mientras que en el caso de oleaje irregular esta situación no se produce. La distribución de altura de ola significativa posee irregularidades en ambos casos, siendo estas menores que las obtenidas en el

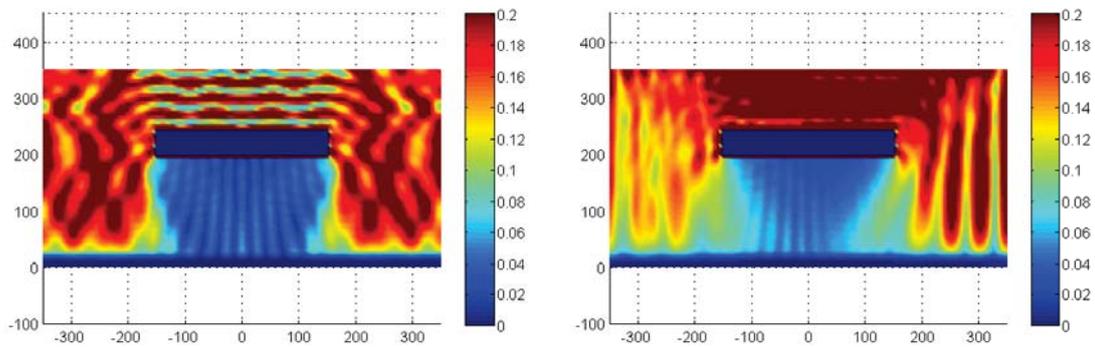


Figura 4.54: *Altura de ola significativa con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C1)*

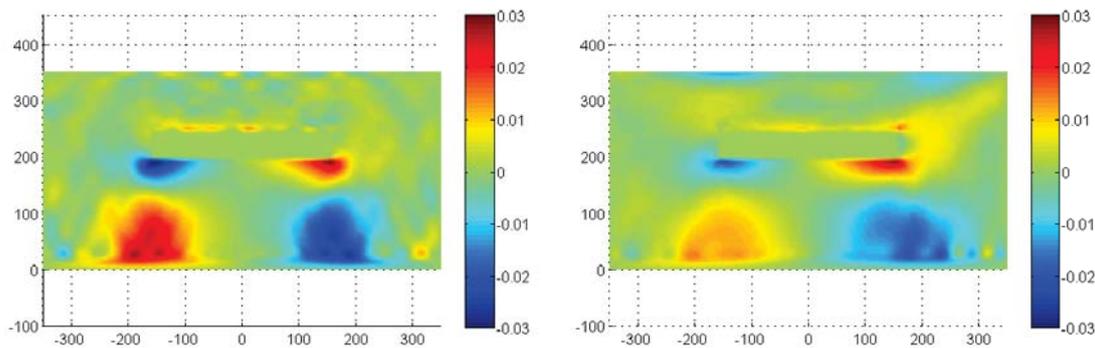


Figura 4.55: *Velocidad media integrada en profundidad en dirección x con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C1)*

caso C1. Se observa la difracción en el dique, por lo que existe una menor altura de ola tras el mismo.

La velocidad media integrada en profundidad en dirección x (Figura 4.57) posee un comportamiento similar en los casos de oleaje regular e irregular espectral. Se producen dos células de circulación en la zona abrigada por el dique, y una zona de mayores velocidades en las esquinas del dique. Las velocidades obtenidas son menores en el caso de oleaje espectral, tanto en la célula de circulación como en las esquinas del dique, sin embargo el patrón de velocidades es similar en ambos casos.

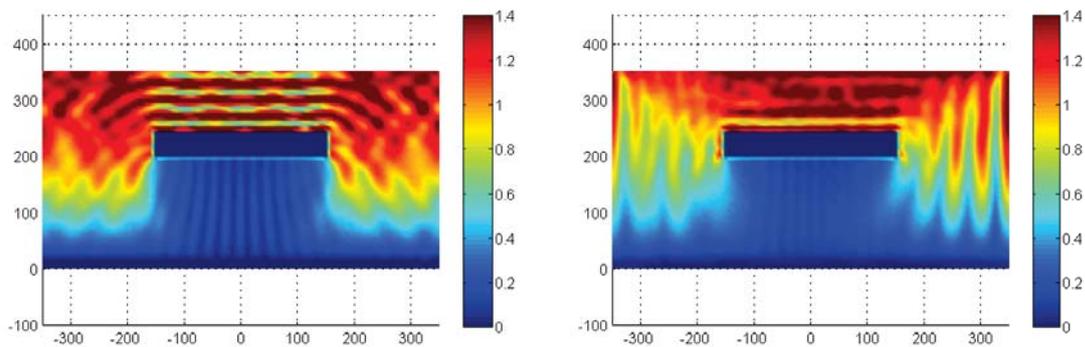


Figura 4.56: *Altura de ola significativa con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C2)*

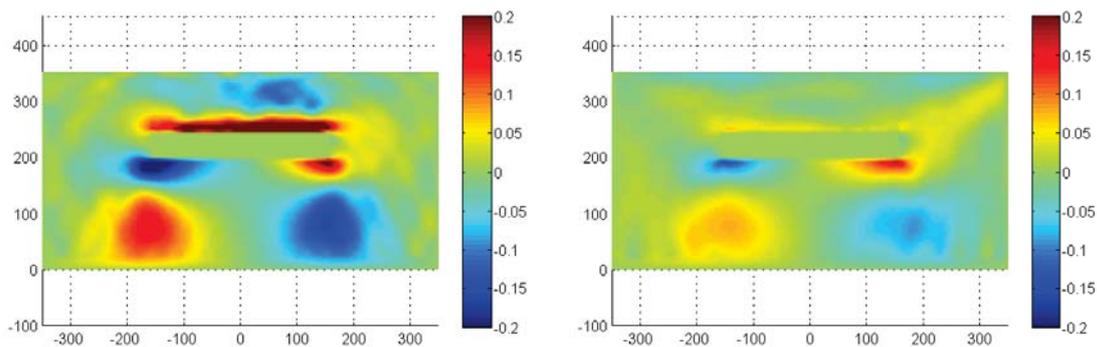


Figura 4.57: *Velocidad media integrada en profundidad en dirección  $x$  con condiciones de oleaje regular (izquierda) e irregular (derecha) en el cálculo realizado con SWASH (Caso C2)*

### Caso C3

En este caso sólo se analizan los resultados obtenidos con oleaje regular, ya que las simulaciones realizadas en condiciones de oleaje irregular no convergen a una solución válida para ninguna de las combinaciones de parámetros analizados.

La altura de ola significativa  $H_s$  (Figura 4.58) presenta un comportamiento similar al observado en los casos C1 y C2 con oleaje regular. Destacan los puntos en la zona anterior al dique con altura de ola significativa casi nula. Sin embargo, en este caso la distribución de altura de ola no presenta tantas irregularidades como presentaban los casos C1 y C2. Asimismo se observa la difracción en la parte posterior al dique.

La velocidad media integrada en profundidad en dirección  $x$  (Figura 4.58) presenta

un comportamiento similar a los estudiados en los casos C1 y C2. Las velocidades obtenidas son mayores que en los casos anteriores debido a las mayores alturas de ola que caracterizan este caso. Se observan las dos células de circulación en la parte posterior del dique, con una extensión menor que el obtenido en el caso C2.

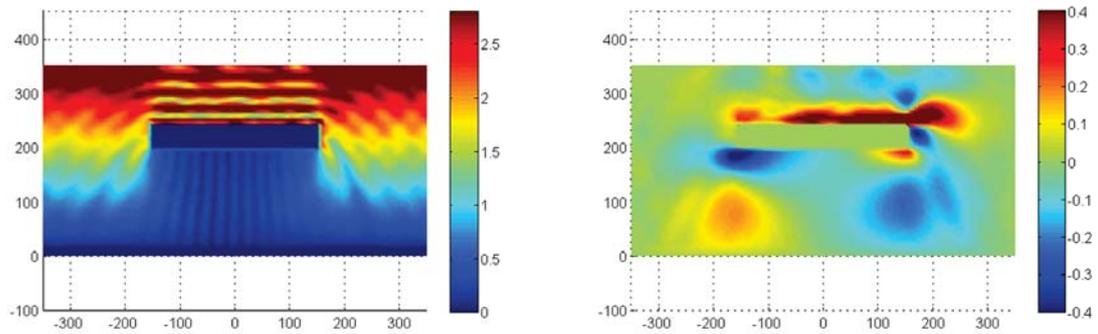


Figura 4.58: *Altura de ola significativa (izquierda) y velocidad media integrada en profundidad en dirección  $x$  (derecha) con condiciones de oleaje regular en el cálculo realizado con SWASH (Caso C3)*

# 5

## Conclusiones

En el presente proyecto técnico se han analizado las corrientes generadas por el oleaje en dos casos de estudio (canal rectilíneo con batimetría variable y un dique exento con fondo variable) con diferentes metodologías y modelos numéricos. Se han analizado diferentes formulaciones de interacción oleaje-corriente (Phillips (1977), Mellor (2003) y Mellor (2008)) mediante sus perfiles en profundidad y acoplados con modelos numéricos 2D y 3D, con el objetivo de comparar las diferentes formulaciones. Con el análisis realizado en el proyecto técnico se obtienen las siguientes conclusiones.

El modelo numérico SWASH, basado en las ecuaciones 3D-RANS, es una herramienta muy potente desde el punto de vista computacional. Sin embargo la dependencia de los parámetros numéricos introducidos en el modelo genera problemas en la obtención de resultados y la convergencia de los casos estudiados. Los principales problemas encontrados en el desarrollo del presente trabajo tienen relación con la elección de los parámetros numéricos del modelo, resultando muy laboriosa la elección de unos parámetros válidos para diferentes condiciones de oleaje.

Los modelos SWAN, Iber y Freeflow 3D están más maduros desde el punto de vista de desarrollo, pero la dificultad de su aplicación estriba en la necesidad de introducir en los modelos una formulación de interacción oleaje corriente. Como se ha analizado en el presente proyecto técnico, la elección de una formulación u otra depende del caso de estudio, siendo necesaria una revisión de las formulaciones para la obtención de una solución válida. Los resultados en Iber y Freeflow son similares para los casos estudiados, si bien en otros casos podrían no ser tan similares.

De las formulaciones de interacción oleaje-corriente analizadas destacan las similitudes entre las formulaciones de Phillips (1977) y Mellor (2003) cuando no existe variación del fondo. La formulación de Mellor (2008) parece poco adecuada debido a la implementación de la fuerza superficial, sin embargo no se han observado problemas de estabilidad con esta formulación. A pesar de las diferencias de la formulación de Mellor (2003) con la formulación de Phillips (1977) cuando el fondo no es plano, hay que tener en cuenta que la formulación de Phillips (1977) es una formulación 2D y que su extrapolación como formulación 3D puede no ser representativa del comportamiento

de la fuerza inducida por el oleaje.

Como futuras líneas de desarrollo parece adecuado llevar a cabo una validación experimental en laboratorio con datos precisos de corrientes generadas por el oleaje para los casos estudiados o similares, en los que exista variación de fondo y con diferentes campos de oleaje. También sería adecuado realizar un análisis de otras formulaciones de interacción oleaje-corriente con el objetivo de realizar una comparación con las estudiadas en este documento y realizar una discusión crítica sobre el rango de validez de cada una de ellas.

# Referencias

- [1] ARDHUIN, F., AND BENNIS, A.-C. Comments on The Depth-Dependent Current and Wave Interaction Equations: A revision. *Journal of Physical Oceanography* 41(10) (2011), 2008–2012.
- [2] ARDHUIN, F., BENNIS, A.-C., AND DUMAS, F. On the coupling of wave and three-dimensional circulation models: Choice of the theoretical framework, practical implementation and adiabatic tests. *Ocean Modelling* 40 (2011), 260–272.
- [3] ARDHUIN, F., D.JENKINS, A., AND A.BELIBASSAKIS, K. Comments on The Three-Dimensional Current and Surface Wave Equations. *Journal of Physical Oceanography* 38(6) (2008a), 1340–1350.
- [4] ARDHUIN, F., RASCLE, N., AND A.BELIBASSAKIS, K. Explicit wave-averaged primitive equations using a Generalized Lagrangian Mean. *Ocean Modelling* 20 (2008b), 35–60.
- [5] BERTIN, X., OILVEIRA, A., AND FORTUNATO ANDRÉ, B. Simulating morphodynamics with unstructured grids: Description and validation of a modeling system for coastal applications. *Ocean Modelling* 28 (2009), 75–87.
- [6] BLADÉ, E., CEA, L., CORESTEIN, G., ESCOLANO, E., PUERTAS, J., VÁZQUEZ-CENDRÓN, M., DOLZ, J., AND COLL, A. Iber-Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* (2013).
- [7] BRUNEAU, N., DODET, G., BERTIN, X., AND FORTUNATO ANDRÉ, B. Development of a three-dimensional coupled wave-current model for coastal environments. *Journal of Coastal Research* 64 (2011), 986–990.
- [8] CEA, L., STELLING, G., AND ZILJEMA, M. Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 61(4) (2009), 382–410.
- [9] HOLTHUIJSEN, L. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, United Kingdom, 2007.

- [10] LONGUET-HIGGINS, M. S. On the wave-induced difference in mean sea level between the two sides of a submerged breakwater. *J.Mar.Res* 25 (1967), 148–153.
- [11] LONGUET-HIGGINS, M. S., AND STEWART, R. W. Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications. *Deep Sea Research* 11 (1964), 529–563.
- [12] MELLOR, G. The Three-Dimensional Current and Surface Wave Equations. *Journal of Physical Oceanography* 33 (2003), 1978–1989.
- [13] MELLOR, G. Some Consequences of the The Three-Dimensional Current and Surface Wave Equations. *Journal of Physical Oceanography* 35 (2005), 2291–2298.
- [14] MELLOR, G. The Depth-Dependent Current and Wave Interaction Equations: A revision. *Journal of Physical Oceanography* 38 (2008), 2587–2596.
- [15] MELLOR, G. Wave radiation stress. *Ocean Dynamics* 61 (2011), 563–568.
- [16] MELLOR, G., DONELAN, M. A., AND OEY, L. A surface Wave Model for Coupling with Numerical Ocean Circulation Models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25 (2008), 1785–1807.
- [17] NICHOLSON, J., BROKER, I., ROELVINK, J., PRICE, D., TANGUY, J., AND MORENO, L. Intercomparison of coastal area morphodynamic models. *Coastal Engineering* 31 (1997), 97–123.
- [18] PHILLIPS, O. M. *The Dynamics off the Upper Ocean*. Cambridge University Press, United Kingdom, 1977.
- [19] ROSEAU, M. *Asymptotic Wave Theory*. Elsevier, 1976.
- [20] WALSTRA, D., ROELVINK, J., AND GROENEWEG, J. Calculation of Wave-Driven Currents in a 3D Mean Flow Model. *Coastal Engineering* 2 (2000), 1050–1063.
- [21] WARNER, J., SHERWOOD, C., SIGNELL, R., HARRIS, C., AND ARANGO, H. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences* 34 (2008), 1284–1306.
- [22] ZILJEMA, M. Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids. *Coastal Engineering* 57 (2010), 267–277.
- [23] ZILJEMA, M., STELLING, G., AND SMIT, P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave field and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering* 58 (2011), 992–1012.