



## DINÁMICA AMBIENTAL

Grupo de Investigación de Dinámica de Flujos Ambientales

# INFLUENCIA DE LAS ACCIONES HUMANAS EN LA HIDRODINÁMICA DE LA BAHÍA DE CÁDIZ

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Alumno:** Juan del Rosal Salido

**Directores de proyecto:** Miguel Ortega Sánchez - Carmen Zarzuelo Romero

**Departamento:** Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Septiembre 2013



*A mis padres y hermana: por hacerme ser quien soy.  
A mi abuela: por haber cuidado de mí, cada día, los últimos 6 años.  
A mis mejores amigos: por qué sin vosotros, no creo que lo hubiese logrado, ¡Menudos años!.  
A Patri: por hacerme sentir la persona más feliz cada día.  
A Miguel y Carmen por su grandísima ayuda con este proyecto.*

**A TODOS VOSOTROS ... !!! MUCHAS GRACIAS !!!**

---

---

# Resumen

En la Bahía de Cádiz conviven espacios naturales protegidos de gran riqueza junto con actividades industriales de elevado impacto económico, entre ellas las portuarias. Dichas actividades han podido producir alteraciones en el esquema circulatorio de las masas de agua entre el saco interior y la Bahía exterior alterando el funcionamiento original del entorno.

En la actualidad se están realizando dos nuevas actuaciones portuarias dentro de la Bahía de Cádiz: (1) la construcción de una nueva terminal de contenedores y, una vez finalizada, (2) el dragado para el nuevo canal de navegación que permita la entrada de buques de mayor calado.

El objetivo que se ha pretendido alcanzar con este informe técnico es el análisis del efecto que estas nuevas actuaciones pueden tener en la hidrodinámica de la Bahía de Cádiz, así como la verificación de algunos aspectos del diseño de la alternativa elegida para la terminal. Para ello en primer lugar se ha analizado la situación actual de la zona de estudio (dimensiones, espacios protegidos, actuaciones portuarias realizadas, clima marítimo, etc.). Posteriormente se ha diseñado y realizado una campaña de campo de 4 meses de duración consistente en la medida insitu de parámetros hidrodinámicos (niveles y velocidades) y de calidad de aguas para profundizar en el conocimiento de la Bahía y calibrar y validar el modelo numérico hidrodinámico. Dicho modelo ha sido el Delft3D (software gratuito) que cuenta con dos módulos (WAVE y FLOW) que trabajan de forma conjunta y sincronizada y permiten estimar las características tanto del oleaje como del sistema circulatorio en zonas costeras. Dicho modelo ha sido calibrado con los datos de la campaña de campo obteniendo unos coeficientes de correlación media  $R=0.9$  y  $skill=0.70$ .

Con el modelo calibrado se han definido tres escenarios batimétricos para representar las actuaciones que se están llevando a cabo: (1) escenario 1: situación actual; (2) escenario 2: incluye la nueva terminal y (3) escenario 3: además de la nueva terminal se incluye el dragado de la Bahía. Sobre dichos escenarios se han simulado las condiciones de forzamiento tanto del régimen medio como de los principales temporales que inciden sobre la Bahía de Cádiz (procedentes del SW y W).

El análisis de los resultados de las simulaciones permite concluir que la resultante media anual del oleaje, magnitud indicativa de la energía del oleaje, se mantiene prácticamente inalterada en todo el sector de Valdelagrana (no alterando así su dinámica litoral) tras la realización de las nuevas actuaciones. Asimismo, la hidrodinámica general de la Bahía no se ve alterada por efecto de las actuaciones proyectadas, ni bajo condiciones medias ni bajo condiciones extremas. Finalmente, se ha verificado que la altura de ola se reduce en el entorno de la nueva terminal de contenedores una vez que estén concluidas las actuaciones, mejorando así su operatividad respecto a la situación actual.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Índice general</b>	<b>V</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Espacios naturales protegidos . . . . .	3
1.3. Situación actual de la Bahía: influencia del Puerto de Cádiz . . . . .	4
1.3.0.1. Puerto de Cádiz - Ciudad . . . . .	6
1.3.0.2. Zona Franca . . . . .	7
1.3.0.3. Puerto de Santa María . . . . .	8
1.3.0.4. Puerto de Sherry . . . . .	9
1.3.0.5. La Cabezucla . . . . .	10
1.4. Actuaciones futuras. . . . .	11
1.5. Objetivos . . . . .	12
1.5.1. Objetivo general . . . . .	12
1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	12
<b>2. Zona de estudio</b>	<b>13</b>
2.1. Características de la Bahía de Cádiz . . . . .	13
2.2. Actuaciones futuras . . . . .	18
2.2.1. Nueva terminal de contenedores . . . . .	18
2.2.2. Dragado . . . . .	18
2.2.3. Planos . . . . .	19
2.2.4. Proceso Constructivo . . . . .	26
2.2.5. Resumen de características de las actuaciones propuestas . . . . .	27
<b>3. Metodología</b>	<b>29</b>
3.1. Clima marítimo . . . . .	29
3.1.1. Datos de partida . . . . .	29
3.1.2. Descripción general en profundidades indefinidas . . . . .	29
3.1.3. Régimen medio . . . . .	30
3.1.4. Régimen extremal . . . . .	30
3.2. Escenarios . . . . .	31

3.2.1. Escenario 1: Situación actual . . . . .	31
3.2.2. Escenario 2: Nueva terminal . . . . .	31
3.2.3. Escenario 3: Nueva terminal más dragado . . . . .	31
3.3. Campaña de campo . . . . .	32
3.4. Modelo Numérico . . . . .	34
3.4.1. Calibración del modelo . . . . .	34
3.4.2. Validación del modelo . . . . .	36
3.4.3. Simulación de las condiciones de forzamiento en los escenarios . . . . .	36
3.4.4. Análisis del régimen medio . . . . .	36
3.4.5. Análisis de los temporales . . . . .	39
3.5. Análisis de resultados . . . . .	39
<b>4. Clima Marítimo</b>	<b>41</b>
4.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio . . . . .	41
4.2. Oleaje . . . . .	42
4.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas . . . . .	42
4.2.1.1. Resumen de resultados parciales . . . . .	49
4.2.2. Régimen medio anual de $H_s$ en profundidades indefinidas . . . . .	50
4.2.2.1. Régimen medio escalar . . . . .	51
4.2.2.2. Régimen medio direccional W . . . . .	52
4.2.2.3. Régimen medio direccional SE . . . . .	53
4.2.2.4. Resumen de resultados parciales . . . . .	53
4.2.3. Régimen extremal de $H_s$ en profundidades indefinidas . . . . .	54
4.2.3.1. Regimen extremal escalar . . . . .	55
4.2.3.2. Resumen de resultados parciales . . . . .	56
4.2.3.3. Regimen extremal direccional: W . . . . .	57
4.2.3.4. Resumen de resultados parciales . . . . .	58
4.2.3.5. Regimen extremal direccional: SE . . . . .	59
4.2.3.6. Resumen de resultados parciales . . . . .	60
4.3. Viento . . . . .	61
4.3.1. Descripción general del viento en profundidades indefinidas . . . . .	61
4.3.1.1. Resumen de resultados parciales . . . . .	64
4.3.2. Régimen medio anual de $V_v$ en profundidades indefinidas. . . . .	65
4.3.2.1. Régimen medio escalar . . . . .	66
4.3.2.2. Régimen medio direccional W . . . . .	66
4.3.2.3. Régimen medio direccional E . . . . .	67
4.3.2.4. Resumen de resultados parciales . . . . .	67
4.3.3. Régimen extremal de $V_v$ en profundidades indefinidas . . . . .	68
4.3.3.1. Regimen extremal escalar . . . . .	69
4.3.3.2. Regimen extremal direccional: W . . . . .	70
4.3.3.3. Regimen extremal direccional: E . . . . .	71
<b>5. Campaña de campo de larga duración</b>	<b>73</b>
5.1. Diseño de la campaña de campo . . . . .	73
5.1.1. Fechas y duración de la campaña . . . . .	73
5.1.2. Instrumentación . . . . .	73
5.1.3. Ubicación . . . . .	74
5.1.4. Sistema de instalación y/o fondeo . . . . .	75

5.1.5.	Descripción de equipo . . . . .	75
5.1.6.	Resultados de la campaña de campo. . . . .	77
<b>6.</b>	<b>Modelo numérico I: Aplicación, calibración y validación</b>	<b>79</b>
6.1.	Características del modelo . . . . .	79
6.1.1.	Módulo WAVE . . . . .	79
6.1.2.	Módulo FLOW . . . . .	80
6.2.	Datos de entrada . . . . .	81
6.2.1.	Línea de costa . . . . .	81
6.2.2.	Malla . . . . .	81
6.2.3.	Batimetría . . . . .	82
6.2.4.	Archivo Wavecon . . . . .	84
6.2.5.	Parámetros del modelo . . . . .	84
6.3.	Calibración del modelo . . . . .	85
6.4.	Resultados de la calibración del modelo . . . . .	87
6.4.1.	Mareas vivas . . . . .	87
6.4.1.1.	Periodo 1 . . . . .	87
6.4.1.2.	Periodo 3.2 . . . . .	88
6.4.2.	Mareas muertas . . . . .	94
6.4.2.1.	Periodo 2 . . . . .	94
6.4.2.2.	Periodo 4 . . . . .	95
6.5.	Parámetros Calibrados . . . . .	100
6.5.1.	Mareas Vivas . . . . .	100
6.5.2.	Mareas Muertas . . . . .	101
6.6.	Validación del modelo . . . . .	103
6.6.0.1.	Periodo 3.1 . . . . .	103
<b>7.</b>	<b>Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.</b>	<b>105</b>
7.1.	Análisis del régimen medio . . . . .	105
7.1.1.	Escenario 1: Situación actual . . . . .	105
7.1.1.1.	Sector Valdelagrana . . . . .	105
7.1.1.2.	Sector canal de navegación . . . . .	111
7.1.2.	Escenario 2: Nueva terminal . . . . .	119
7.1.2.1.	Sector Valdelagrana . . . . .	119
7.1.2.2.	Sector canal de navegación . . . . .	124
7.1.3.	Escenario 3: Nueva terminal + dragado . . . . .	131
7.1.3.1.	Sector Valdelagrana . . . . .	131
7.1.3.2.	Sector canal de navegación . . . . .	136
7.1.4.	Escenario 2 vs Escenario 1 . . . . .	142
7.1.4.1.	Sector Valdelagrana . . . . .	142
7.1.4.2.	Sector canal de navegación . . . . .	146
7.1.5.	Escenario 3 vs Escenario 1 . . . . .	151
7.1.5.1.	Sector Valdelagrana . . . . .	151
7.1.5.2.	Sector canal de navegación . . . . .	155
7.2.	Análisis de los temporales . . . . .	160
7.2.1.	Periodos de tiempo . . . . .	160
7.2.1.1.	Temporal SW: 17-03-2006 a 21-03-2006 . . . . .	160
7.2.1.2.	Temporal WNW: 17-02-2006 a 21-02-2006 . . . . .	160

7.2.2.	Escenario 2 vs Escenario 1 . . . . .	161
7.2.2.1.	Variación del coeficiente de propagación . . . . .	161
7.2.3.	Escenario 3 vs Escenario 1 . . . . .	163
7.2.3.1.	Variación del coeficiente de propagación . . . . .	163
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>165</b>
8.1.	Introducción . . . . .	165
8.2.	Clima marítimo . . . . .	166
8.3.	Campaña de campo . . . . .	166
8.4.	Modelo numérico . . . . .	167
8.5.	Escenarios . . . . .	167
8.5.1.	Análisis del régimen medio . . . . .	167
8.5.2.	Temporales . . . . .	168
<b>Apéndices</b>		<b>169</b>
<b>A.</b>	<b>Red de medida de Puertos del Estado</b>	<b>171</b>
A.1.	Introducción . . . . .	171
A.2.	Conjunto de datos WANA . . . . .	171
A.3.	Conjunto de datos REDEXT . . . . .	172
A.4.	Conjunto de datos REDCOS . . . . .	175
<b>B.</b>	<b>Calibración del modelo: Simulaciones</b>	<b>177</b>
B.1.	Periodo 1 <sup>o</sup> : 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20 . . . . .	177
B.1.1.	Simulación 11 . . . . .	177
B.1.2.	Simulación 14 . . . . .	179
B.1.3.	Simulación 15 . . . . .	181
B.2.	Periodo 2 <sup>o</sup> : 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22 . . . . .	183
B.2.1.	Simulación 16 . . . . .	183
B.2.2.	Simulación 17 . . . . .	185
B.2.3.	Simulación 21 . . . . .	187
B.2.4.	Simulación 27 . . . . .	189
B.2.5.	Simulación 28 . . . . .	189
B.2.6.	Simulación 29 . . . . .	190
B.2.7.	Simulación 30 . . . . .	192
B.2.8.	Simulación 32 . . . . .	193
B.2.9.	Simulación 34 . . . . .	195
B.2.10.	Simulación 35 . . . . .	197
B.2.11.	Simulación 36 . . . . .	199
B.3.	Periodo 1 <sup>o</sup> : 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20 . . . . .	200
B.3.1.	Simulación 37 . . . . .	200
B.3.2.	Simulación 39 . . . . .	202
B.4.	Periodo 2 <sup>o</sup> : 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22 . . . . .	203
B.4.1.	Simulación 38 . . . . .	203
B.5.	Periodo 4 <sup>o</sup> : 2012 02 01 18 - 2012 02 04 16 . . . . .	204
B.5.1.	Simulación 47 . . . . .	204
B.5.2.	Simulación 48 . . . . .	206
B.5.3.	Simulación 49 . . . . .	208
B.5.4.	Simulación 50 . . . . .	210

B.6. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22 . . . . .	212
B.6.1. Simulación 51 . . . . .	212
B.7. Periodo 1º: 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20 . . . . .	214
B.7.1. Simulación 52 . . . . .	214
B.8. Periodo 4º: 2012 02 01 18 - 2012 02 04 16 . . . . .	216
B.8.1. Simulación 56 . . . . .	216
B.8.2. Simulación 61 . . . . .	218
B.9. Periodo 3.1º: 2012 03 01 00 - 2012 03 03 18 . . . . .	220
B.9.1. Simulación 63 . . . . .	220
B.10. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22 . . . . .	222
B.10.1. Simulación 64 . . . . .	222
<b>C. Cálculo del error: Coeficiente de correlación R y Skill</b>	<b>225</b>
C.1. Coeficiente de correlación múltiple: R . . . . .	225
C.2. Coeficiente Skill . . . . .	226
<b>D. Parámetros del modelo numérico.</b>	<b>227</b>
D.1. Módulo WAVE . . . . .	227
D.1.1. Description (Descripción) . . . . .	227
D.1.2. Hydrodynamics (Hidrodinámica) . . . . .	227
D.1.3. Grids (Malla) . . . . .	227
D.1.4. Time frame (Periodo de tiempo) . . . . .	228
D.1.5. Boundaries (Condiciones de contorno) . . . . .	229
D.1.6. Obstacles (Obstáculos) . . . . .	229
D.1.7. Physical parameters (Parámetros físicos) . . . . .	229
D.1.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos) . . . . .	233
D.1.9. Output curves (Curvas de salida) . . . . .	234
D.1.10. Output parameters (Parámetros de salida) . . . . .	234
D.2. Additional parameters (Parámetros adicionales) . . . . .	234
D.3. Módulo FLOW . . . . .	235
D.3.1. Description (Descripción) . . . . .	235
D.3.2. Domain (Dominio) . . . . .	235
D.3.3. Time Frame (Periodo de tiempo) . . . . .	235
D.3.4. Processes (Procesos) . . . . .	235
D.3.5. Initial conditions (Condiciones iniciales) . . . . .	236
D.3.6. Boundaries (Fronteras) . . . . .	236
D.3.7. Physical parameters (Parámetros físicos) . . . . .	236
D.3.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos) . . . . .	238
D.3.9. Operations (Operaciones) . . . . .	238
D.3.10. Monitoring (Monitorización) . . . . .	238
D.3.11. Additional parameters (Parámetros adicionales) . . . . .	238
D.3.12. Output (Salida) . . . . .	239
<b>E. Modelos numéricos de simulación de oleaje</b>	<b>241</b>
E.1. Clasificación de los modelos de oleaje . . . . .	241
E.1.1. Modelos de resolución de fase . . . . .	241
E.1.1.1. Modelos de la integral de contorno . . . . .	242
E.1.1.2. Modelos de la ecuación de la pendiente suave . . . . .	242

E.1.1.3. Modelos de Boussinesq . . . . .	243
E.1.2. Modelos de promediado de fase o Modelos espectrales . . . . .	244
E.1.2.1. Modelos de primera generación . . . . .	245
E.1.2.2. Modelos de segunda generación . . . . .	245
E.1.2.3. Modelos de tercera generación . . . . .	245
<b>F. Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN</b>	<b>247</b>
F.1. Ecuación de balance de acción . . . . .	247
F.1.1. Transferencia de energía al oleaje debida al viento, $S_{in}$ . . . . .	248
F.1.2. Interacciones no lineales entre olas, $S'_{nl}$ . . . . .	249
F.1.3. Disipación de energía en aguas profundas debido al White-capping, $S_{ds,w}$ . . . . .	253
F.1.4. Término debido a la rotura por disminución de la profundidad, $S_{ds,br}$ . . . . .	254
F.1.5. Disipación de energía por fricción con el fondo $S_{ds,b}$ . . . . .	255
<b>G. Ecuaciones del software Delft3D: FLOW</b>	<b>259</b>
G.1. Ecuaciones de gobierno . . . . .	259
G.1.1. Ecs. de conserv. de cantidad de movimiento en el plano horizontal X,Y . . . . .	261
G.1.2. Ecuaciones de continuidad (Conservación de la masa) . . . . .	262
G.1.3. Ecuación del transporte . . . . .	262
G.1.4. Problema del cierre turbulento . . . . .	263
<b>Bibliografía</b>	<b>265</b>

# Índice de figuras

1.1. Lugares de Interés Comunitario dentro de la Bahía de Cádiz. . . . .	4
1.2. Parque natural dentro de la Bahía de Cádiz. . . . .	4
1.3. Situación actual en la Bahía de Cádiz. . . . .	5
1.4. Plano situación actual del Puerto de Cádiz . . . . .	6
1.5. Fotografía aérea actual del Puerto de Cádiz. . . . .	6
1.6. Plano de Zona Franca. . . . .	7
1.7. Fotografía aérea de Zona Franca. . . . .	7
1.8. Plano del Puerto de Santa María. . . . .	8
1.9. Fotografía aérea del Puerto de Santa María . . . . .	8
1.10. Plano del Puerto de Sherry. . . . .	9
1.11. Fotografía del Puerto de Sherry. . . . .	9
1.12. Plano de La Cabezuela. . . . .	10
1.13. Fotografía de La Cabezuela. . . . .	10
1.14. Plano de las dos actuaciones futuras del Puerto de Cádiz. . . . .	11
2.1. Mapa de la zona de estudio con sus dimensiones características . . . . .	14
2.2. Mapa de la zona de estudio con las zonas más relevantes. . . . .	17
2.3. Plano de la situación actual del Puerto de Cádiz. . . . .	21
2.4. Plano de la nueva terminal de contenedores del Puerto de Cádiz. . . . .	23
2.5. Plano de la nueva terminal más dragado. . . . .	25
3.1. Esquema SC 1 . . . . .	32
3.2. Esquema SC 2 . . . . .	32
3.3. Esquema SC 3 . . . . .	32
3.4. Secciones SC 3 . . . . .	32
3.5. Mapa de la colocación de los instrumentos fondeados. . . . .	33
3.6. Esquema del procedimiento seguido para la calibración del modelo. . . . .	35
3.7. Esquema análisis del régimen medio . . . . .	38
4.1. Boyas y puntos WANA disponibles en la Bahía de Cádiz. . . . .	41
4.2. Serie temporal de la altura de ola. . . . .	42
4.3. Histograma de alturas de ola . . . . .	43
4.4. Gráfico de dispersión $H_s - T_p$ . . . . .	43
4.5. Histograma de periodos pico . . . . .	45
4.6. Gráfico de dispersión $T_p - \theta$ . . . . .	45
4.7. Histograma de direcciones medias de procedencia . . . . .	47
4.8. Gráfico de dispersión $H_s - \theta$ . . . . .	47
4.9. Rosa de Oleaje . . . . .	49

4.10. Función de densidad escalar . . . . .	51
4.11. Función de distribución escalar . . . . .	51
4.12. Función distribución escalar en papel probabilístico normal . . . . .	51
4.13. Función de densidad direccional:W . . . . .	52
4.14. Función de distribución direccional: W . . . . .	52
4.15. Función distribución direccional W en papel probabilístico normal . . . . .	52
4.16. Función de densidad direccional:SE . . . . .	53
4.17. Función de distribución direccional: SE . . . . .	53
4.18. Función distribución direccional SE en papel probabilístico normal . . . . .	53
4.19. Picos de altura de ola sobre umbral con $H_{su} = 3$ m . . . . .	54
4.20. Función de densidad escalar . . . . .	55
4.21. Función de distribución escalar . . . . .	55
4.22. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno escalar . . . . .	55
4.23. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno escalar . . . . .	56
4.24. Función de densidad direccional:W . . . . .	57
4.25. Función de distribución direccional:W . . . . .	57
4.26. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: W . . . . .	57
4.27. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: W . . . . .	58
4.28. Función de densidad direccional:SE . . . . .	59
4.29. Función de distribución direccional:SE . . . . .	59
4.30. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: SE . . . . .	59
4.31. Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: SE . . . . .	60
4.32. Histograma de velocidades de viento . . . . .	61
4.33. Histograma de direcciones medias de procedencia . . . . .	62
4.34. Gráfico de dispersión $V_v - \theta_v$ . . . . .	62
4.35. Rosa de Oleaje . . . . .	64
4.36. Función de densidad escalar. $V_v$ . . . . .	66
4.37. Función de distribución escalar. $V_v$ . . . . .	66
4.38. Función de densidad direccional:W $V_v$ . . . . .	66
4.39. Función de distribución direccional: W $V_v$ . . . . .	66
4.40. Función de densidad direccional:E $V_v$ . . . . .	67
4.41. Función de distribución direccional: E $V_v$ . . . . .	67
4.42. Picos de altura de ola sobre umbral con $H_{su} = 3$ m . . . . .	68
4.43. Función de densidad escalar $V_v$ . . . . .	69
4.44. Función de distribución escalar $V_v$ . . . . .	69
4.45. Función de densidad direccional:W $V_v$ . . . . .	70
4.46. Función de distribución direccional:W $V_v$ . . . . .	70
4.47. Función de densidad direccional:E $V_v$ . . . . .	71
4.48. Función de distribución direccional:E $V_v$ . . . . .	71
5.1. Mapa de la colocación de los instrumentos fondeados. . . . .	74
5.2. Resultados campaña de campo. . . . .	77
6.1. Definición de la linea de costa junto con las dos mallas anidadas. . . . .	82
6.2. Batimetría facilitada por el Puerto de Cádiz. . . . .	83
6.3. Carta náutica 443B del Instituto Hidrográfico de la marina . . . . .	83
6.4. Carta náutica "Puerto de Cádiz"de la marina de los estados unidos. . . . .	83
6.5. Batimetría de la Bahía de Cádiz en Delft3D. . . . .	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

6.6. Datos del oleaje en los periodos elegidos para la calibración del modelo. . . . .	86
6.7. Altura de ola calibrada. Periodo 1 . . . . .	87
6.8. Porcentajes. Periodo 1 . . . . .	88
6.9. Altura de ola calibrada. Periodo 3.2 . . . . .	88
6.10. Porcentajes. Periodo 3.2 . . . . .	89
6.11. Altura de ola calibrada. Periodo 2 . . . . .	94
6.12. Porcentajes. Periodo 2 . . . . .	94
6.13. Altura de ola calibrada. Periodo 4 . . . . .	95
6.14. Porcentajes. Periodo 4 . . . . .	95
6.15. Altura de ola validada. Periodo 3.1 . . . . .	103
6.16. Porcentajes. Periodo 3.1 . . . . .	103
7.1. Puntos de control sector Valdelagrana SC 1. . . . .	105
7.2. Histograma. P.Control A (SC1) . . . . .	106
7.3. Histograma. P.Control C (SC1) . . . . .	106
7.4. Histograma. P.Control D (SC1) . . . . .	106
7.5. Histograma. P.Control F (SC1) . . . . .	106
7.6. Rosa Oleaje. P.Control A (SC1) . . . . .	107
7.7. Rosa Oleaje. P.Control C (SC1) . . . . .	107
7.8. Rosa Oleaje. P.Control D (SC1) . . . . .	107
7.9. Rosa Oleaje. P.Control F (SC1) . . . . .	107
7.10. F.Densidad. P.Control A (SC1) . . . . .	108
7.11. F.Densidad. P.Control C (SC1) . . . . .	108
7.12. F.Densidad. P.Control D (SC1) . . . . .	108
7.13. F.Densidad. P.Control F (SC1) . . . . .	108
7.14. Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC1) . . . . .	109
7.15. Puntos de control sector canal de navegación SC 1. . . . .	111
7.16. Histograma. P.Control A' (SC1) . . . . .	111
7.17. Histograma. P.Control B' (SC1) . . . . .	111
7.18. Histograma. P.Control C' (SC1) . . . . .	112
7.19. Histograma. P.Control D' (SC1) . . . . .	112
7.20. Histograma. P.Control E' (SC1) . . . . .	112
7.21. Histograma. P.Control F' (SC1) . . . . .	112
7.22. Rosa Oleaje. P.Control A' (SC1) . . . . .	113
7.23. Rosa Oleaje. P.Control B' (SC1) . . . . .	113
7.24. Rosa Oleaje. P.Control C' (SC1) . . . . .	113
7.25. Rosa Oleaje. P.Control D' (SC1) . . . . .	113
7.26. Rosa Oleaje. P.Control E' (SC1) . . . . .	114
7.27. Rosa Oleaje. P.Control F' (SC1) . . . . .	114
7.28. F. densidad. P.Control A' SC1 . . . . .	115
7.29. F. densidad. P.Control B' SC1 . . . . .	115
7.30. F. densidad. P.Control C' SC1 . . . . .	115
7.31. F. densidad. P.Control D' SC1 . . . . .	115
7.32. F. densidad. P.Control E' SC1 . . . . .	115
7.33. F. densidad. P.Control F' SC1 . . . . .	115
7.34. Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC1) . . . . .	116
7.35. Gráfico de operatividad. Terminal sin ampliación Puerto de Cádiz (SC1) . . . . .	117
7.36. Puntos de control sector Valdelagrana SC 2. . . . .	119

7.37. Histograma. P.Control A (SC2) . . . . .	120
7.38. Histograma. P.Control C (SC2) . . . . .	120
7.39. Histograma. P.Control D (SC2) . . . . .	120
7.40. Histograma. P.Control F (SC2) . . . . .	120
7.41. Rosa Oleaje. P.Control A (SC2) . . . . .	121
7.42. Rosa Oleaje. P.Control C (SC2) . . . . .	121
7.43. Rosa Oleaje. P.Control D (SC2) . . . . .	121
7.44. Rosa Oleaje. P.Control F (SC2) . . . . .	121
7.45. F. Densidad. P.Control A (SC2) . . . . .	122
7.46. F. Densidad. P.Control C (SC2) . . . . .	122
7.47. F. Densidad. D.Control A (SC2) . . . . .	122
7.48. F. Densidad. P.Control F (SC2) . . . . .	122
7.49. Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC2) . . . . .	123
7.50. Puntos de control sector canal de navegación SC 2 . . . . .	124
7.51. Histograma. P.Control A' (SC2) . . . . .	124
7.52. Histograma. P.Control B' (SC2) . . . . .	124
7.53. Histograma. P.Control C' (SC2) . . . . .	125
7.54. Histograma. P.Control D' (SC2) . . . . .	125
7.55. Histograma. P.Control E' (SC2) . . . . .	125
7.56. Histograma. P.Control F' (SC2) . . . . .	125
7.57. Rosa Oleaje. P.Control A' (SC2) . . . . .	126
7.58. Rosa Oleaje. P.Control B' (SC2) . . . . .	126
7.59. Rosa Oleaje. P.Control C' (SC2) . . . . .	126
7.60. Rosa Oleaje. P.Control D' (SC2) . . . . .	126
7.61. Rosa Oleaje. P.Control E' (SC2) . . . . .	127
7.62. Rosa Oleaje. P.Control F' (SC2) . . . . .	127
7.63. F. Densidad. P.Control A' (SC2) . . . . .	128
7.64. F. Densidad. P.Control B' (SC2) . . . . .	128
7.65. F. Densidad. P.Control C' (SC2) . . . . .	128
7.66. F. Densidad. P.Control D' (SC2) . . . . .	128
7.67. F. Densidad. P.Control E' (SC2) . . . . .	128
7.68. F. Densidad. P.Control F' (SC2) . . . . .	128
7.69. Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC2) . . . . .	129
7.70. Gráfico de operatividad. Terminal ampliada Puerto de Cádiz (SC2) . . . . .	130
7.71. Puntos de control sector Valdelagrana SC 3 . . . . .	131
7.72. Histograma. P.Control A (SC3) . . . . .	132
7.73. Histograma. P.Control C (SC3) . . . . .	132
7.74. Histograma. P.Control D (SC3) . . . . .	132
7.75. Histograma. P.Control F (SC3) . . . . .	132
7.76. Rosa Oleaje. P.Control A (SC3) . . . . .	133
7.77. Rosa Oleaje. P.Control C (SC3) . . . . .	133
7.78. Rosa Oleaje. P.Control D (SC3) . . . . .	133
7.79. Rosa Oleaje. P.Control F (SC3) . . . . .	133
7.80. F. densidad. P. Control A (SC3) . . . . .	134
7.81. F. densidad. P. Control C (SC3) . . . . .	134
7.82. F. densidad. P. Control D (SC3) . . . . .	134
7.83. F. densidad. P. Control F (SC3) . . . . .	134
7.84. Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC3) . . . . .	135

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

7.85. Puntos de control sector canal de navegación SC 3 . . . . .	136
7.86. Histograma. P.Control A' (SC3) . . . . .	136
7.87. Histograma. P.Control B' (SC3) . . . . .	136
7.88. Histograma. P.Control C' (SC3) . . . . .	137
7.89. Histograma. P.Control D' (SC3) . . . . .	137
7.90. Histograma. P.Control E' (SC3) . . . . .	137
7.91. Histograma. P.Control F' (SC3) . . . . .	137
7.92. Rosa Oleaje. P.Control A' (SC3) . . . . .	138
7.93. Rosa Oleaje. P.Control B' (SC3) . . . . .	138
7.94. Rosa Oleaje. P.Control C' (SC3) . . . . .	138
7.95. Rosa Oleaje. P.Control D' (SC3) . . . . .	138
7.96. Rosa Oleaje. P.Control E' (SC3) . . . . .	139
7.97. Rosa Oleaje. P.Control F' (SC3) . . . . .	139
7.98. F. densidad. P. Control A' (SC3) . . . . .	139
7.99. F. densidad. P. Control B' (SC3) . . . . .	139
7.100F. densidad. P. Control C' (SC3) . . . . .	139
7.101F. densidad. P. Control D' (SC3) . . . . .	139
7.102F. densidad. P. Control E' (SC3) . . . . .	140
7.103F. densidad. P. Control F' (SC3) . . . . .	140
7.104Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC3) . . . . .	140
7.105Gráfico de operatividad. Terminal ampliada Puerto de Cádiz (SC3) . . . . .	141
7.106Hist. P.Control A (SC2 vs SC1) . . . . .	142
7.107Hist. P.Control C (SC2 vs SC1) . . . . .	142
7.108Hist. P.Control D (SC2 vs SC1) . . . . .	142
7.109Hist. P.Control F (SC2 vs SC1) . . . . .	142
7.110Rosa O. P.Control A (SC2 vs SC1) . . . . .	143
7.111Rosa O. P.Control C (SC2 vs SC1) . . . . .	143
7.112Rosa O. P.Control D (SC2 vs SC1) . . . . .	143
7.113Rosa O. P.Control F (SC2 vs SC1) . . . . .	143
7.114F.dens. P. Control A (SC2 vs SC1) . . . . .	144
7.115F.dens. P. Control C (SC2 vs SC1) . . . . .	144
7.116F.dens. P. Control D (SC2 vs SC1) . . . . .	144
7.117F.dens. P. Control F (SC2 vs SC1) . . . . .	144
7.118Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC2 vs SC1) . . . . .	145
7.119Hist. P.Control A' (SC2 vs SC1) . . . . .	146
7.120Hist. P.Control B' (SC2 vs SC1) . . . . .	146
7.121Hist. P.Control C' (SC2 vs SC1) . . . . .	146
7.122Hist. P.Control D' (SC2 vs SC1) . . . . .	146
7.123Hist. P.Control E' (SC2 vs SC1) . . . . .	147
7.124Hist. P.Control F' (SC2 vs SC1) . . . . .	147
7.125Rosa O. P.Control A' (SC2 vs SC1) . . . . .	147
7.126Rosa O. P.Control B' (SC2 vs SC1) . . . . .	147
7.127Rosa O. P.Control C' (SC2 vs SC1) . . . . .	148
7.128Rosa O. P.Control D' (SC2 vs SC1) . . . . .	148
7.129Rosa O. P.Control E' (SC2 vs SC1) . . . . .	148
7.130Rosa O. P.Control F' (SC2 vs SC1) . . . . .	148
7.131F.dens. P. Control A' (SC2 vs SC1) . . . . .	149
7.132F.dens. P. Control B' (SC2 vs SC1) . . . . .	149

7.133F.dens. P. Control C' (SC2 vs SC1) . . . . .	149
7.134F.dens. P. Control D' (SC2 vs SC1) . . . . .	149
7.135F.dens. P. Control E' (SC2 vs SC1) . . . . .	149
7.136F.dens. P. Control F' (SC2 vs SC1) . . . . .	149
7.137Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC2 vs SC1) . . . . .	150
7.138Hist. P.Control A (SC3 vs SC1) . . . . .	151
7.139Hist. P.Control C (SC3 vs SC1) . . . . .	151
7.140Hist. P.Control D (SC3 vs SC1) . . . . .	151
7.141Hist. P.Control F (SC3 vs SC1) . . . . .	151
7.142Rosa O. P.Control A (SC3 vs SC1) . . . . .	152
7.143Rosa O. P.Control C (SC3 vs SC1) . . . . .	152
7.144Rosa O. P.Control D (SC3 vs SC1) . . . . .	152
7.145Rosa O. P.Control F (SC3 vs SC1) . . . . .	152
7.146F.dens. P. Control A (SC3 vs SC1) . . . . .	153
7.147F.dens. P. Control C (SC3 vs SC1) . . . . .	153
7.148F.dens. P. Control D (SC3 vs SC1) . . . . .	153
7.149F.dens. P. Control F (SC3 vs SC1) . . . . .	153
7.150Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC3 vs SC1) . . . . .	154
7.151Hist. P.Control A' (SC3 vs SC1) . . . . .	155
7.152Hist. P.Control B' (SC3 vs SC1) . . . . .	155
7.153Hist. P.Control C' (SC3 vs SC1) . . . . .	155
7.154Hist. P.Control D' (SC3 vs SC1) . . . . .	155
7.155Hist. P.Control E' (SC3 vs SC1) . . . . .	156
7.156Hist. P.Control F' (SC3 vs SC1) . . . . .	156
7.157Rosa O. P.Control A' (SC3 vs SC1) . . . . .	156
7.158Rosa O. P.Control B' (SC3 vs SC1) . . . . .	156
7.159Rosa O. P.Control C' (SC3 vs SC1) . . . . .	157
7.160Rosa O. P.Control D' (SC3 vs SC1) . . . . .	157
7.161Rosa O. P.Control E' (SC3 vs SC1) . . . . .	157
7.162Rosa O. P.Control F' (SC3 vs SC1) . . . . .	157
7.163F.dens. P. Control A' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.164F.dens. P. Control B' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.165F.dens. P. Control C' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.166F.dens. P. Control D' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.167F.dens. P. Control E' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.168F.dens. P. Control F' (SC3 vs SC1) . . . . .	158
7.169Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC3 vs SC1) . . . . .	159
7.170Datos para el temporal del SW . . . . .	160
7.171Datos para el temporal del WNW . . . . .	160
7.172Diferencia entre el $C_p$ del SC 2 vs SC1 para temporal del SW . . . . .	161
7.173Diferencia entre el $C_p$ del SC 2 vs SC1 para temporal del WNW . . . . .	162
7.174Diferencia entre el $C_p$ del SC 3 vs SC1 para temporal del SW . . . . .	163
7.175Diferencia entre el $C_p$ del SC 3 vs SC1 para temporal del WNW . . . . .	164
A.1. Detalle de una Boya tipo SeaWatch. . . . .	173
A.2. Esquema de la generación y almacenamiento del conjunto de datos REDEXT . . . . .	174
A.3. Esquema de fondeo de boya Triaxys . . . . .	175
A.4. Esquema de generación, transmisión y almacenamiento de las boyas Triaxys . . . . .	176

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

B.1. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 11 . . . . .	178
B.2. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 14 . . . . .	180
B.3. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 15 . . . . .	182
B.4. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 16 . . . . .	184
B.5. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 21 . . . . .	188
B.6. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 30 . . . . .	192
B.7. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 34 . . . . .	196
B.8. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 35 . . . . .	198
B.9. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 37 . . . . .	201
B.10. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 39 . . . . .	202
B.11. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 47 . . . . .	205
B.12. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 51 . . . . .	213
B.13. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 51 . . . . .	215
B.14. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 56 . . . . .	217
B.15. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 61 . . . . .	219
B.16. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 63 . . . . .	221
B.17. Gráfica de Altura de Ola. Simulación 64 . . . . .	223
F.1. Configuración de los cuádrupletes en el método DIA. . . . .	251
G.1. Ejemplo de grid vertical con seis capas . . . . .	260



# Índice de cuadros

1.1. Datos Puerto de Cádiz - Ciudad . . . . .	6
1.2. Datos de Zona Franca . . . . .	7
1.3. Datos del Puerto de Santa María. . . . .	8
1.4. Datos del Puerto de Sherry . . . . .	9
1.5. Datos de La Cabezuela. . . . .	10
4.1. Porcentaje de alturas de ola . . . . .	43
4.2. Altura significativa ola - Periodo Pico . . . . .	44
4.3. Porcentaje de periodos pico . . . . .	45
4.4. Periodo Pico - Dirección media de procedencia . . . . .	46
4.5. Porcentaje de direcciones medias de procedencia . . . . .	47
4.6. Altura significativa ola - Dirección media de procedencia . . . . .	48
4.7. Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio . . . . .	50
4.8. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola. . . . .	53
4.9. Parámetros de ajuste para régimen extremal escalar . . . . .	55
4.10. Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno. . . . .	56
4.11. Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: W . . . . .	57
4.12. Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno. . . . .	58
4.13. Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: SE. . . . .	59
4.14. Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno. . . . .	60
4.15. Porcentaje de velocidades de viento . . . . .	61
4.16. Porcentaje de direcciones medias de procedencia . . . . .	62
4.17. Periodo Pico - Dirección media de procedencia . . . . .	63
4.18. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio . . . . .	65
4.19. Valores de velocidad del viento para el régimen medio. . . . .	67
4.20. Parámetros de ajuste para régimen escalar . . . . .	69
4.21. Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: W . . . . .	70
4.22. Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: E . . . . .	71
5.1. Posición, profundidad y equipos fondeados en la campaña de campo. . . . .	75
6.1. Gráfico de dispersión $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 1 . . . . .	88
6.2. Gráfico de dispersión $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 3.2 . . . . .	89
6.3. Definición de la frontera en coordenadas del grid . . . . .	92
6.4. Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz . . . . .	92
6.5. Gráfico de dispersión $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 2 . . . . .	94
6.6. Gráfico de dispersión $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 4 . . . . .	95
6.7. Definición de la frontera en coordenadas del grid . . . . .	98

6.8. Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz . . . . .	98
6.9. Gráfico de dispersión $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 3.1 . . . . .	103
D.1. Límites superior e inferior y valor por defecto para cada parámetro . . . . .	233
D.2. Definición de la frontera en coordenadas del grid . . . . .	236
D.3. Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz . . . . .	237
D.4. Valores del coeficiente de arrastre por viento . . . . .	237

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La Bahía de Cádiz constituye una región donde conviven espacios naturales de alto valor ecológico y actividades industriales de elevado impacto económico comarcal y regional, de las cuales, las relacionadas con la actividad portuaria tienen un peso relevante. En los siguientes apartados se realiza una breve descripción de la zona desde el punto de vista ambiental y socioeconómico, donde cabe destacar los siguientes pilares sobre los que se asienta la motivación del presente proyecto:

- La existencia de espacios naturales protegidos por figuras tanto comunitarias como nacionales y regionales compuestos por fondos marinos, ríos, estuarios y lagunas. Estos ecosistemas marismos presentan una elevada producción biológica, tanto primaria como secundaria, debido a importantes flujos de materia y energía, característicos de estas fronteras ecológicas entre el medio marino y continental.
- Las diversas actuaciones humanas efectuadas en la Bahía han modificado sustancialmente el esquema circulatorio, alterando el sistema de intercambio de masas de agua entre el saco interior y la Bahía exterior. Ello ha podido provocar afecciones ambientales y modificar las condiciones que favorecen el desarrollo de la vida.
- Economías en el entorno que son altamente dependientes de las aguas y costas de la Bahía.
- La actividad portuaria representa uno de los pilares de la economía de la región.

Teniendo en cuenta lo anterior, los principales factores de riesgo para la Bahía de Cádiz son, en general, los que afectan a los hábitats que ocupan las diferentes comunidades, como son:

- El desarrollo turístico de la costa, que ha provocado la transformación de gran parte del litoral en zonas fuertemente urbanizadas, proceso que no siempre ha ido acompañado de una correcta estimación de sus consecuencias sobre la dinámica de la costa y sus ecosistemas.
- La creación de polígonos industriales que ha afectado gravemente, entre otros factores a la dinámica litoral debido a la ocupación de zonas de “Dominio Público Marítimo Terrestre”.

- La contaminación del agua por vertidos urbanos y en menor grado industriales y navieros ha provocado la pérdida de calidad de agua para el baño así como una pérdida de los hábitats de marismas. Ello implica una pérdida de zonas de alevinaje de especies de interés económico así como una pérdida de producción y diversidad pesquera.
- La desecación y transformación de zonas marismeñas y salinas en granjas marinas y la proliferación de escombreras y vertederos incontrolados.
- La construcción de vías de comunicación que han cegado canales, con la consiguiente pérdida de funcionalidad y el florecimiento de los procesos de colectación y por consiguiente la aceleración de la evolución de la marisma -impacto que se manifiesta más claramente en las comunidades de la marisma baja, si bien esto se ve compensado porque, a su vez, estas comunidades son más fácilmente regenerable que las comunidades de marisma alta-.
- Las actuaciones en los ríos, que condicionan las características hídricas de la marisma, así como en lo referente al aporte de nutrientes y sedimentos.

Cómo se observa en las figuras 1.12 y 1.13 los espacios naturales protegidos de la Bahía de Cádiz están compuestos por fondos marinos, ríos, estuarios y lagunas de elevada importancia ecológica. El Parque Natural de la Bahía de Cádiz posee una superficie aproximada de 10.522 Ha pertenecientes a los términos municipales de las poblaciones que rodean la Bahía.

El área protegida corresponde tanto a zonas emergidas como sumergidas situadas entre el Parque Nacional de Doñana y el Estrecho de Gibraltar, lo que lo convierte en una pieza fundamental del sistema migratorio de multitud de aves acuáticas. Las diversas actuaciones humanas efectuadas a lo largo de la historia en la zona han modificado sustancialmente el esquema circulatorio, con implicaciones negativas en las características ambientales del entorno (disminución de la tasa de renovación de las aguas de la Bahía, disminución de la biodiversidad, problemas de calidad de aguas, aterramiento, reducción del potencial pesquero, etc.). Por ello, se plantea la necesidad de un diagnóstico y pronóstico a corto, medio y largo plazo de la evolución del sistema para preservar y mejorar las características ambientales del entorno.

Por otro lado, la situación estratégica que posee la Bahía de Cádiz la ha convertido desde tiempos muy antiguos en un puerto natural de entrada y salida de mercancías, lo que ha permitido un auge económico de la zona con importantes valores naturales, culturales, sociales y económicos. La cantidad y diversidad de actividades humanas que en esta área confluyen hacen que los impactos y las amenazas a los que se ve sometida determinen en gran medida su estructura y funcionamiento.

Debido a esta dualidad, en la Bahía de Cádiz se está desarrollando el proyecto denominado "Dinámica y flujos biogeoquímicos de la Bahía de Cádiz. Campaña de medida y modelos". Dicho proyecto pretende definir un esquema de actuación para la gestión de la Bahía de Cádiz que favorezca:

- El equilibrio dinámico entre la necesidad de mantener la integridad en el funcionamiento de los ecosistemas y potenciar el desarrollo económico y social de la zona.
- El establecimiento de planteamientos sobre la restauración y reestructuración de la Bahía en función de las afecciones producidas por la duración de las obras de ampliación del

## 1. Introducción

---

puerto (corto plazo), las afecciones producidas por ésta y otras infraestructuras en el entorno de los 25-50 años (medio plazo), y los efectos asociados a la subida del nivel del mar como consecuencia de la variabilidad climática (largo plazo).

- Evaluar los potenciales para la recuperación de servicios ecosistémicos como la pesca si se reinvierten procesos pasados como la degradación de hábitats (p.ej. desecación de marismas) que afectan al ciclo vital de numerosas especies, o se recuperan los flujos de masa entre los dos sacos de la Bahía y el exterior.

El presente proyecto fin de carrera en calidad de informe técnico se engloba dentro del proyecto anterior.

### 1.2. Espacios naturales protegidos

La Bahía de Cádiz constituye un conjunto de marismas, acantilados, playas, salinas, cadenas interiores de dunas y caños. La vegetación dominante de la zona está formada por pinares costeros y especies halófilas adaptadas al flujo mareal, como el carrizo, la salicornia, la espadaña y la castañuela. Por ello, la zona de estudio fue propuesta para formar parte de la Red Natura 2000 de denominación Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) ES 6120009 “Fondos marinos de la Bahía de Cádiz”. Los hábitats principales que describen este LIC son ríos y estuarios sometidos a la dinámica mareal, bancos de arena o de fango y lagunas, incluidas las salinas de producción.

En este entorno existe otro espacio propuesto como LIC, el denominado ES 0000140 “Bahía de Cádiz”. Los límites de este LIC coinciden con los del Parque Natural de la Bahía de Cádiz, declarado por la Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales para su protección. Con posterioridad, en el año 1993, la Bahía de Cádiz fue designada como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), conforme a la Directiva 79/409/CEE, del Consejo, de 2 de abril de 1979, relativa a la conservación de las aves silvestres.

Por otra parte, el Acuerdo del Consejo de Ministros de 27 de septiembre de 2002 incluyó a la Bahía de Cádiz en la Lista de Humedales de Importancia Internacional, conforme al “Convenio relativo a Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas”, suscrito en Ramsar el 2 de febrero de 1971. El humedal Bahía de Cádiz coincide con los límites del Parque Natural de la Bahía de Cádiz.

El Parque Natural de la Bahía de Cádiz posee una superficie aproximada de 10.522 Ha., perteneciente a los términos municipales de San Fernando, Chiclana de la Frontera, Puerto Real, Puerto de Santa María y Cádiz, aglomeración urbana con más de 400000 habitantes en su conjunto. El área protegida corresponde tanto a zonas emergidas como sumergidas, estando éstas últimas situadas en la Bahía Interna. La situación de este enclave, entre el Parque Nacional de Doñana y el Estrecho de Gibraltar convierte a la Bahía de Cádiz en una pieza fundamental del sistema migratorio de multitud de aves acuáticas.

Los ecosistemas marismenños, y en concreto la Bahía de Cádiz, presentan una elevada producción biológica, tanto primaria como secundaria, debido a los importantes flujos de

materia y energía. Así, el continuo aporte de nutrientes de las formaciones estuarinas y la recirculación de éstos por los distintos regímenes mareales posibilita el desarrollo de una vegetación que tiende a colonizar áreas de baja energía, al abrigo de los depósitos arenosos o en el interior de los estuarios. La circulación mareal determina, además del aporte de nutrientes, otros factores ambientales que condicionan la formación de distintas comunidades vegetales, como son la salinidad y el grado de encharcamiento a que están sometidas, importante en el intercambio gaseoso que mantiene la planta con el medio. Estas comunidades se articulan pues, siguiendo un gradiente de altitud que también puede ser entendido como una sucesión ecológica desde los ecosistemas marinos hacia los terrestres; sucesión que se ve favorecida por el alto dinamismo que caracteriza a este tipo de ecosistemas. Otra unidad ambiental relevante son las salinas, que representan un paisaje cultural tradicional en esta región. Destacan también el conjunto de ambientes costeros asociados al estuario del río Guadalete, como son las dunas, playas, bajos arenosos y el cordón litoral de Valdelagrana.



Figura 1.1: Lugares de Interés Comunitario dentro de la Bahía de Cádiz.



Figura 1.2: Parque natural dentro de la Bahía de Cádiz.

### 1.3. Situación actual de la Bahía: influencia del Puerto de Cádiz

El Puerto de la Bahía de Cádiz y el tráfico marítimo de mercancías y pasajeros asociado a él representa una importante fuente de empleo en la zona. Según un estudio que evalúa el impacto económico del Puerto de la Bahía de Cádiz, 15.620 trabajadores, 5.264 de forma directa, dependen del citado puerto. Además, el conjunto de actividades económicas dependientes del Puerto suponen el 15,84 por ciento del VAB (valor añadido bruto) comarcal. Los puestos de trabajo, directo, indirecto e inducidos se cifran en el 15,53 por ciento del empleo del conjunto de la comarca.

En lo que a la industria se refiere, ésta está relacionada principalmente con la acuicultura y producción salinera, la industria aeronáutica, manufacturera y los astilleros e industrias de materiales auxiliares para ellos. Debido a la crisis que atraviesa el sector naval en España,

## 1. Introducción

---

este tipo de empresas se ven amenazadas constantemente con el cierre por disminución de la actividad debido a la poca competitividad que presentan respecto a otros astilleros de zonas asiáticas. El traslado progresivo de las instalaciones militares existentes en la zona tampoco está ayudando a la mejora de la economía en la comarca. La privatización de las grandes industrias y las crisis de algunos de estos sectores cambió la estructura empresarial estando hoy la mayor parte de la mano de obra en pequeñas y medianas empresas.

A continuación se realiza un índice de las principales actuaciones humanas realizadas dentro de la Bahía de Cádiz que afectan tanto a la lámina de agua como a la costa. Es importante remarcar que en este informe técnico únicamente se consideran dichas afecciones y no otras como pueden ser el desarrollo urbanístico de municipios, etc.

- Puerto de Cádiz-Ciudad
- Zona franca
- Puerto de Santa María
- Puerto de Sherry
- La Cabezuela

Su localización se detalla en la siguiente figura y posteriormente se describen las características técnicas de cada uno de ellos.

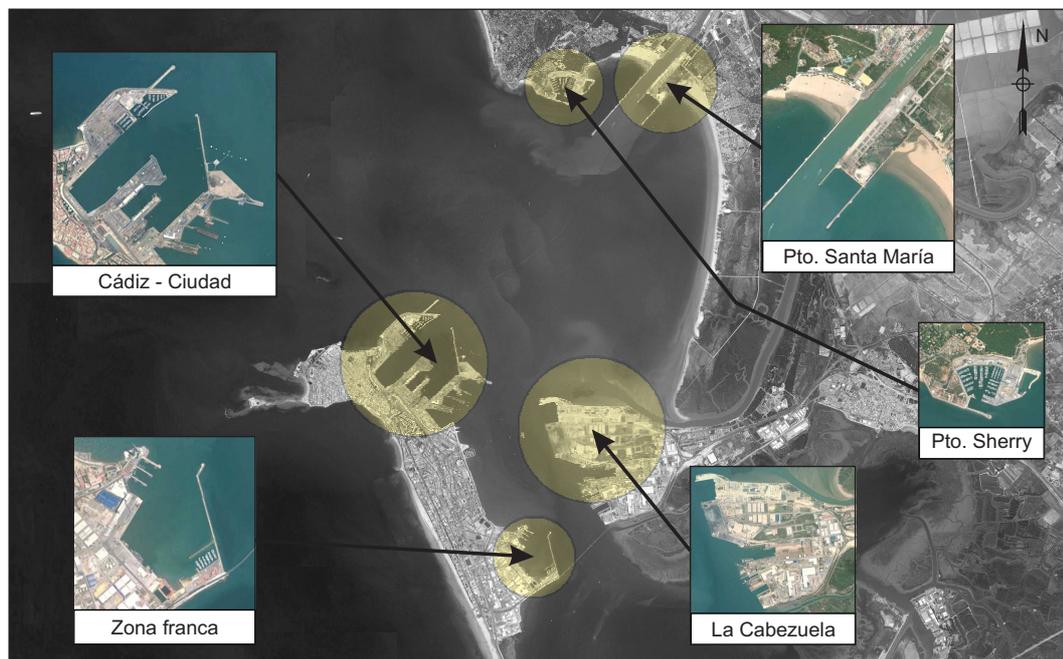


Figura 1.3: Situación actual en la Bahía de Cádiz.

1.3.0.1. Puerto de Cádiz - Ciudad

<b>Situación:</b>	Longitud: 6º 17' Oeste Latitud 36º 32' Norte
<b>Canal de entrada:</b>	Anchura: 250 m Longitud: 3.600 m Calado en B.M.V.E: 13 m
<b>Superficie de agua abrigada:</b>	219 hectáreas
<b>Superficie terrestre:</b>	75,5 hectáreas
<b>Utilización:</b>	Comercial, Pesquera, Pasajeros y Náutico - Deportiva
<b>Instalaciones especiales:</b>	Centro de reparación y transformación de buques de Navantia, S.L.
<b>Muelles:</b>	Reina Victoria - Marqués de Comillas - Ciudad - Alfonso XIII Reina Sofía - de La Libertad - de Las Américas - Pesquero Deportivos (Puerto América y Real Club Náutico)

Tabla 1.1: Datos Puerto de Cádiz - Ciudad<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Fuente: [www.puertodecadiz.es](http://www.puertodecadiz.es)



Figura 1.4: Plano situación actual del Puerto de Cádiz



Figura 1.5: Fotografía aérea actual del Puerto de Cádiz.

## 1. Introducción

---

### 1.3.0.2. Zona Franca

---

<b>Situación:</b>	Longitud: 6º 15' Oeste Latitud 36º 30' Norte
<b>Canal de entrada:</b>	Anchura: 150 m Longitud: 1.200 m Calado en B.M.V.E: 9 m
<b>Superficie de agua abrigada:</b>	4,3 hectáreas
<b>Superficie terrestre:</b>	8 hectáreas
<b>Utilización:</b>	Comercial, y Náutico - Deportiva
<b>Instalaciones especiales:</b>	Regentado por el Consorcio de la Zona Franca de Cádiz, esta Dársena dispone de un amplio recinto donde las mercancías pueden acogerse al régimen de Franquicia Arancelaria.
<b>Muelles:</b>	Poniente - Ribera - Deportivo (Juan Sebastián de Elcano) Reina Sofía - de La Libertad - de Las Américas - Pesquero Deportivos (Puerto América y Real Club Náutico)

---

Tabla 1.2: Datos de Zona Franca

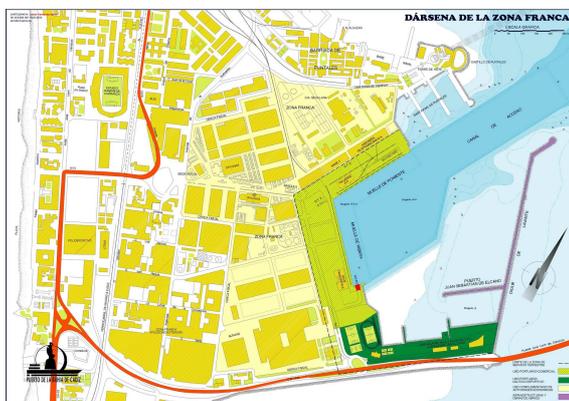


Figura 1.6: Plano de Zona Franca.



Figura 1.7: Fotografía aérea de Zona Franca.

## 1.3.0.3. Puerto de Santa María

<b>Situación:</b>	Longitud: 6º 14' Oeste Latitud 36º 35' Norte
<b>Canal de entrada:</b>	Anchura: 80 m Longitud: 1.250 m Calado en B.M.V.E: 5,50 m
<b>Superficie de agua abrigada:</b>	92 hectáreas
<b>Superficie terrestre:</b>	595 hectáreas
<b>Utilización:</b>	Comercial, Pesquera y Náutico - Deportiva
<b>Muelles:</b>	Exterior - Pesquero y Náutico/Deportivo

Tabla 1.3: Datos del Puerto de Santa María.



Figura 1.8: Plano del Puerto de Santa María.



Figura 1.9: Fotografía aérea del Puerto de Santa María

## 1. Introducción

---

### 1.3.0.4. Puerto de Sherry

---

<b>Situación:</b>	Longitud: 6º 15' Oeste Latitud 36º 35' Norte
<b>Canal de entrada:</b>	Anchura: 100 m Longitud: 200 m Calado en B.M.V.E: 3 m
<b>Superficie de agua abrigada:</b>	Principal: 13,5 hectáreas Playa asfáltica: 1,8 hectáreas
<b>Superficie terrestre:</b>	15,5 hectáreas
<b>Utilización:</b>	Náutico - Deportiva
<b>Muelles:</b>	Dársena - Marina Seca - Varadero - Rampa Asfáltica

---

Tabla 1.4: Datos del Puerto de Sherry



Figura 1.10: Plano del Puerto de Sherry.



Figura 1.11: Fotografía del Puerto de Sherry.

## 1.3.0.5. La Cabezuela

<b>Situación:</b>	Longitud: 6º 15' Oeste Latitud 36º 31' Norte
<b>Canal de entrada:</b>	Anchura: 250 m Longitud: 2.000 m Calado en B.M.V.E: 13 m
<b>Superficie terrestre:</b>	100 hectáreas
<b>Utilización:</b>	Comercial y Graneles sólidos y líquidos
<b>Instalaciones especiales:</b>	Planta Off-Shore de Dragados Off-Shore, S.A. y de Centro de Construcción de Buques de Navantia, S.L.
<b>Muelles:</b>	Muelle Oeste y Muelle Sur

Tabla 1.5: Datos de La Cabezuela.



Figura 1.12: Plano de La Cabezuela.



Figura 1.13: Fotografía de La Cabezuela.

### 1.4. Actuaciones futuras.

Las actuaciones que se pretenden realizar en la Bahía de Cádiz en un futuro próximo y que pueden alterar su dinámica son:

- La creación de una Terminal de Contenedores adosada al actual dique de levante situado en el Puerto de Cádiz - ciudad.

En una primera fase está previsto que dicha terminal está compuesta por un muelle exterior a la dársena de 1065 m de longitud, con una orientación NNW. En una segunda fase se prevé crear otro muelle en el interior de la dársena de unos 715 m de longitud. De esta forma se crea una superficie de tierra de aproximadamente 38 Ha con una anchura media de 425 m y una longitud de atraque de 1065 m con posibilidad de ampliarla a 1780 m si se incluye el muelle interior.

- Dos dragados: Uno en la línea de atraque para alcanzar los calados de proyecto. Y otro a lo largo del canal de navegación para la obtención de material de relleno necesario para la ampliación de la nueva terminal. El volumen de dragado asciende a 3.600.000 m<sup>3</sup>.
- La construcción de un segundo puente que atraviese la Bahía. Su estudio específico no es objeto de este proyecto.

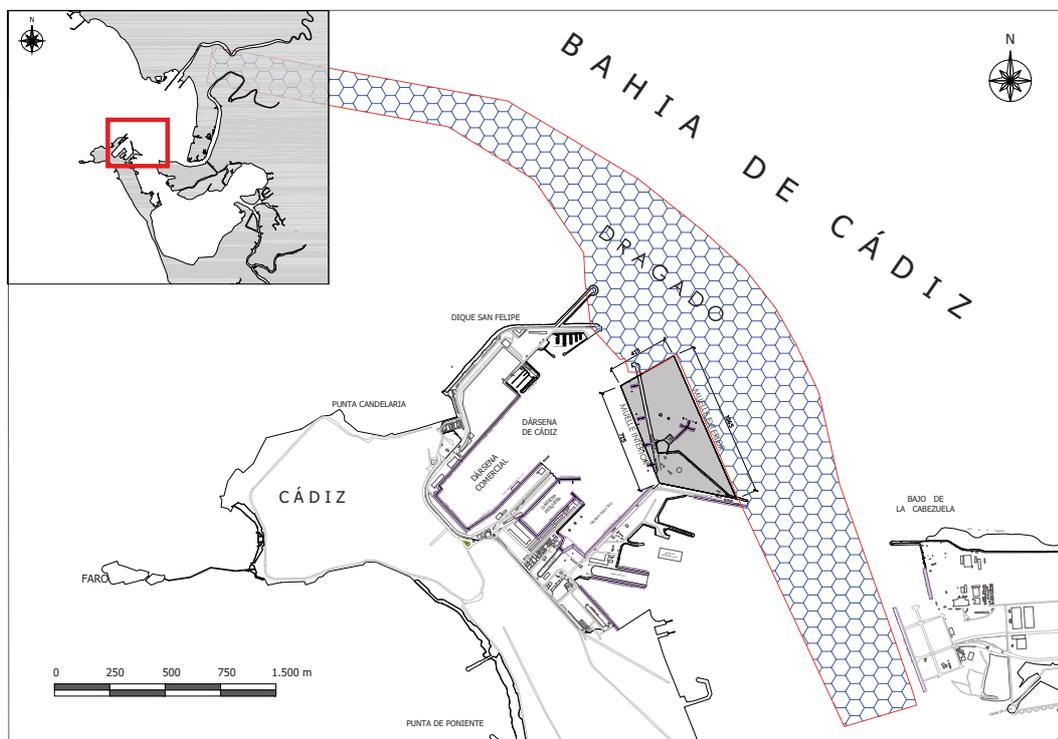


Figura 1.14: Plano de las dos actuaciones futuras del Puerto de Cádiz.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

El objetivo final que se pretende alcanzar con este informe es el análisis del efecto que la nueva terminal de contenedores y dragado del canal de navegación pueden tener en la hidrodinámica de la Bahía de Cádiz. En particular se analizará como afectan a la playa de Valdelagrana (modificación de altura de ola, rosas de oleaje, resultante media anual, etc.) y al canal de navegación, tanto en condiciones medias como de tormenta. Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos que se describen a continuación:

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Análisis de la situación actual de la zona de estudio.
- Caracterización de las nuevas actuaciones previstas para la Bahía de Cádiz.
- Estudio del clima marítimo de la zona de estudio.
- Diseño y realización de una campaña de campo para la toma de datos necesarios para la calibración de un modelo numérico.
- Calibración y validación de un modelo numérico de propagación de oleaje e hidrodinámico para la Bahía de Cádiz.
- Definición de unos escenarios correspondientes a las actuaciones que se van a realizar en la Bahía.
- Simulación del régimen medio y de tormenta sobre dichos escenarios para analizar la influencia de estos sobre la hidrodinámica de la Bahía.
- Análisis de los resultados obtenidos al simular los escenarios con el modelo numérico calibrado.
- Redacción de conclusiones y recomendaciones.

## Capítulo 2

# Zona de estudio

### 2.1. Características de la Bahía de Cádiz

La Bahía de Cádiz se localiza en el suroeste de la Península Ibérica ( $36^{\circ} 23'$  a  $36^{\circ} 37'N$ ;  $6^{\circ} 8'$  a  $6^{\circ} 15'W$ ), siendo gran parte de ella Parque Natural (10.000 Ha). Se llama Bahía de Cádiz al entrante que el mar hace en la costa junto a Cádiz. Antiguamente se trataba de un par de islas junto a la costa, que se han ido uniendo debido a los sedimentos transportados por el río Guadalete.

A la costa de la Bahía de Cádiz, se asoman las ciudades de Cádiz, San Fernando, Puerto Real, El Puerto de Santa María y Rota. Asimismo, por su especial relación con los municipios anteriormente descritos, suelen incluirse en el ámbito de la Bahía de Cádiz los municipios de Chiclana de la Frontera y Jerez de la Frontera. Estos siete municipios forman el Área Metropolitana de la Bahía de Cádiz.

Los terrenos que afloran en el área de la Bahía de Cádiz, tienen carácter postorogénico; están constituidos por materiales pertenecientes al Cuaternario, depositados sobre materiales pliocenos y excavados por la red fluvial. Los materiales pliocenos son arcillas arenosas, calizas toscas y, sobre todo, caliza ostionera y arenisca conchífera. Los depósitos formados en el Cuaternario, de origen marino continental o mixto, ocupan una extensión considerable en la Bahía de Cádiz. Se extienden por toda la superficie de marismas y salinas, así como también por los terrenos litorales (playas, dunas, arenales costeros, llanuras litorales).

Por último, las playas, arenales y dunas, actuales y subactuales, están constituidas por arenas procedentes de la acción erosiva de la red fluvial y del oleaje sobre los materiales continentales, y del posterior depósito de los mismos a lo largo de la costa por las mareas y las corrientes de deriva.

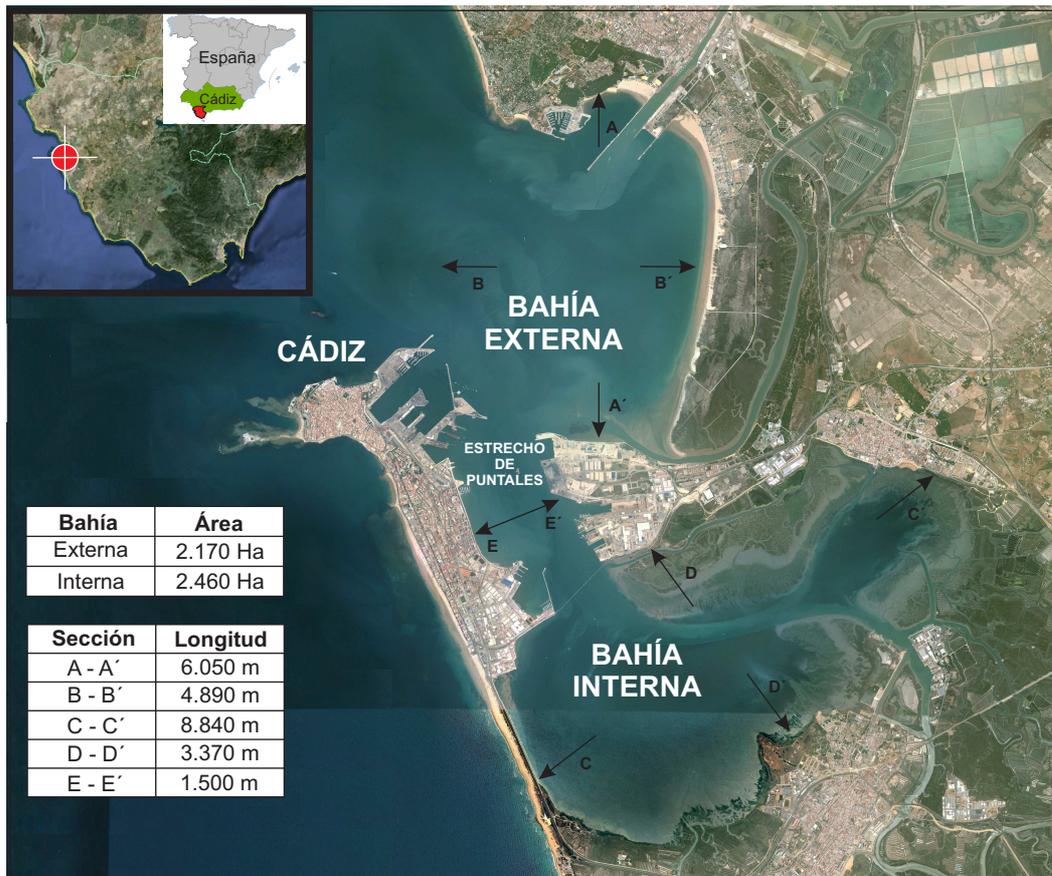


Figura 2.1: Mapa de la zona de estudio con sus dimensiones características

El origen del humedal es claramente natural, aunque la ancestral relación con el hombre ha modificado su estructura, convirtiendo gran parte de las primigenias marismas en salinas y, más recientemente, en granjas marinas, que no obstante conservan un grado de seminaturalidad con elevados valores biológicos. Además, todavía con un alto grado de naturalidad, se conservan parte de las marismas, playas, planicies intermareales fangosas, caños estuarinos e islotes, y afloramientos rocosos.

La Bahía de Cádiz engloba, dentro de sus límites, varios tipos de formaciones que confieren a este espacio su peculiar fisonomía. Dichas formaciones son el resultado de la acción del mar y de los cursos de agua continental (fundamentalmente el río Guadalete) que desaguan en la Bahía y que, en combinación con los factores climáticos, determinan la evolución geomorfológica de la misma.

Las formaciones más significativas, desde el punto de vista hidrológico, son:

- **El entorno marino:** ocupado de modo permanente por las aguas del océano, mezcladas con las aguas dulces procedentes de dos cauces que en ella desembocan, son aguas turbias, con una elevada productividad biológica.
- **Las planicies mareales:** constituyen la franja de contacto entre las aguas de la Bahía y las marismas, salinas y cordones arenosos que la bordean. Son superficies amplias,

## 2. Zona de estudio

---

inclinadas suavemente hacia la Bahía, sometidas a emersión y sumersión diaria por acción de las mareas.

- **Las marismas mareales:** son superficies planas recorridas por cauces fluviales. Están constituidas por depósitos aluviales, y sometidas al régimen de oscilación de las mareas, que las inundan en mayor o menor medida. En la actualidad se hallan transformadas en salinas, en gran parte, o desecadas con fines agrícolas o urbanísticos. Las que aún se mantienen, aparecen como estrechas franjas entre los caños y las salinas, o entre éstas y las planicies mareales. Su valor de conservación es muy alto, especialmente cuando se encuentran menos degradadas, como es el caso de la marisma de los Toruños y dos áreas marismeñas declaradas ambas Paraje Natural, la marisma del Trocadero y las marismas de Sancti Petri.
- **Las salinas:** que ocupan una buena parte de las antiguas marismas, se hallan actualmente reconvertidas, en su mayor parte, a la acuicultura. Son terrenos marismeños, transformados en un conjunto de canales y extensas superficies de escasa profundidad, en las que se controla el paso del agua mareal y se favorece la progresiva evaporación del agua para la extracción de la sal. Son espacios de enorme interés biológico por las características de sus aguas (escasa profundidad, buena iluminación y oxigenación, y riqueza en nutrientes y detritos procedentes de las aguas de la Bahía).
- **Los caños:** son las vías fluviales por donde entran y salen de las marismas las aguas mareales. Se extienden como una red que comunica las marismas y salinas entre sí, y con las aguas de la Bahía. Abunda en ellos la fauna de moluscos, crustáceos, peces y aves. El marisqueo, realizado desde antiguo, tiene especial significación en los fangos de los caños. Los cauces de mayor entidad, dentro del Parque Natural, son el río Guadalete y el río San Pedro y Caño de Sancti-Petri, antiguos brazos del primero. A partir de ellos surge una complicada y extensa red de caños tributarios de menor entidad. Existen también otros caños secundarios como el río Arillo, El Caño Trocadero y el de la Cortadura.

Desde el punto de vista del medio físico, la Bahía de Cádiz se puede caracterizar en una serie de unidades territoriales:

- **Sistema Guadalete - Río San Pedro:** Se trata de una antigua bahía, actualmente desecada, que corresponde al antiguo estuario del Guadalete - Río San Pedro, que en época fenicia conformaban una bahía marina, siendo a partir de época medieval cuando se desarrollan bajos y cordones arenosos que las fueron aislando del mar, con marismas evolucionadas drenadas por los anteriores cauces, hasta ser desecadas por el hombre, en gran parte en los últimos 50 años.

Actualmente, el sector correspondiente a la Playa de Valdelagrana es el resultado de la consolidación del cordón litoral que limita los estuarios de los ríos Guadalete y San Pedro. Este cordón litoral, que se encuentra en el Parque Natural de los Toruños y se designa con el mismo nombre, posee algo más de 7 km de longitud y termina, cerca de la desembocadura del Río San Pedro, en una flecha litoral originada por el transporte de sedimentos a lo largo de la playa en la dirección norte-sur y las corrientes de marea del río San Pedro.

La mayor parte del cordón litoral se encuentra en estado natural. En cuanto a la playa de Valdelagrana, su pendiente media oscila desde el 2.3 % en la zona norte hasta el 0.7 % en la zona sur. Tan sólo existe una zona antropizada en la parte norte, de unos 1600 m de longitud, junto a los espigones que encauzan la desembocadura del río Guadalete. Asimismo se pueden encontrar varios aparcamientos y zonas de acceso a bañistas en el resto de la flecha. Es en estas zonas donde el cordón litoral, formado por dunas de escasa altura (inferior a 2 m), de tipo embrionario y fijadas por vegetación, se ve modificado e interrumpido. Aún así, hay una extensión de más de 5 km de playa sin influencia humana apreciable.

El extremo meridional de la flecha de Valdelagrana, coincidiendo con la desembocadura del río San Pedro, se encuentra dominada por un extenso bancal, con más de 1 km de anchura, y modelado principalmente por las corrientes mareales de flujo y reflujo.

- **Marismas orientales de la Bahía de Cádiz:** donde se desarrolla el complejo salinero de Sancti-Petri. Se trata de otra zona de marismas transformada en salinas que ya en la Edad Media con una importante transformación, si bien el cambio fundamental se lleva a cabo en el siglo XVIII, con la duplicación de la superficie de las salinas existentes. Esta zona comunica con el resto de la bahía a través del caño de Sancti Petri, por el Norte, aunque su principal comunicación con el mar es por el Sur, igualmente a través de dicho caño.
- **Saco interno de la Bahía de Cádiz (Bahía interna):** al Sur del estrecho de Puntales-Matagorda, bañando las costas de San Fernando y Puerto Real, conectado con las Marismas y el Caño de Sancti Petri. Muy abrigada y en proceso de plena colmatación con una gran superficie de zona intermareal de marismas mareales y fangales, en la que deben incluirse las marismas y salinas del río Arillo, en esta ensenada la acción marina es poco notable.
- **Sector Central:** que se corresponde con el Estrecho de Puntales. Se trata de una franja que conecta el saco externo con el interno y que se corresponde con el área marina situada

## 2. Zona de estudio

---

entre el bajo de la Cabezuela y las costas orientales de la ciudad de Cádiz. En esta zona se concentran la mayoría de las infraestructuras portuarias y de transportes.

- **Saco externo de la Bahía de Cádiz (Bahía externa):** situada al Norte de aquel estrechamiento y conectada directamente al Océano Atlántico. Limitada, al Este, por las playas de Levante y los Toruños, al Oeste por la ciudad de Cádiz, y, hacia mar abierto, por una serie de bajos rocosos. Esta zona es la que presenta una presencia importante de espacios permanentemente sumergidos, estando ampliamente abierta a las influencias del oleaje y de las corrientes de marea. Ambientes de un alto valor ecológico.
- **Costa de Rota a El Puerto de Santa María:** que limita de Este a Norte a la bahía externa. Se trata de una zona compuesta principalmente de dunas fósiles en cuyos extremos se desarrollan dos promontorios rocosos de areniscas calcáreas con ostreidos: la punta de Santa Catalina al Este y la Punta Candor al Oeste, sirviendo esta última como límite occidental de la bahía externa.



Figura 2.2: Mapa de la zona de estudio con las zonas más relevantes.

## **2.2. Actuaciones futuras**

### **2.2.1. Nueva terminal de contenedores**

En la actualidad el tráfico de viajeros se mezcla con el de mercancías en la dársena comercial de Cádiz. Ante el actual crecimiento de ambos se hace necesario separarlos en dos zonas bien diferenciadas. De esta manera se resuelven los problemas de seguridad, operatividad e imagen derivados de la mezcla de tráficos.

Así se dejará la terminal actual de Puerto de Cádiz - Ciudad para uso exclusivo de cruceros y se meterá el tráfico pesado de buques de mercancías en una nueva terminal de contenedores en terrenos ganados al mar adosados al dique de levante.

En una primera fase la nueva terminal de contenedores estará compuesta por un muelle exterior a la dársena de 1065 m de longitud, con una orientación NNW. Y un dique de abrigo de taludes muy tendidos situado en la zona norte de la terminal. En una segunda fase se prevé crear otro muelle en el interior de la dársena de unos 715 m de longitud. Así se crea una superficie de tierra de unas 38 Ha con una anchura media de 425 m y una longitud de atraque de 1065 m con posibilidad de ampliarla a 1780 m si se incluye el muelle interior.

El nuevo muelle estará formado por cajones de hormigón armado de 20,5 m de puntal que se rellenarán de arenas procedentes del entorno de la Bahía y se trasdosarán con pedraplen.

La superestructura que forma la viga cantil será de hormigón armado y dispondrá de una galería interior visitable para la revisión de instalaciones. En dicha viga cantil se dispondrán los correspondientes elementos auxiliares como bolardos, escalas o defensas.

### **2.2.2. Dragado**

Las obras se completan con el dragado general de las zonas de atraque y Reviro frente a la nueva terminal así como del canal de navegación hasta la cota -15 m aprovechando el material extraído para la formación de la explanada. Esto permitirá la entrada de buques portacontenedores de mayor tamaño y calado al Puerto de Cádiz.

Para asegurar el apoyo en terrenos competentes tanto del muelle de cajones como del dique de abrigo será necesario realizar un dragado en zanja alrededor de la terminal para eliminar los fangos.

Las actuaciones futuras que tienen previsto realizarse en la Bahía (desde un punto de vista portuario) son:

- Nueva terminal de contenedores adosada al dique de levante en el Puerto de Cádiz - Ciudad.
- Realización de un dragado en zanja alrededor de dicha terminal junto con un dragado mayor en el actual canal de navegación y enfrente de la nueva terminal para:
  - Aumentar la profundidad hasta los -15 m, permitiendo así la entrada de buques de mayor calado.

## 2. Zona de estudio

---

- Obtener material marino para el relleno de la explanada de la nueva de terminal.

### 2.2.3. Planos

Se muestran a continuación los detalles de dichas actuaciones en una serie de planos para su completa comprensión:

- El primer plano corresponde a la situación actual de la Bahía de Cádiz.
- El segundo plano refleja la construcción de la nueva terminal de contenedores adosada al dique de levante junto con las secciones del dique de abrigo y los muelles interior y exterior.
- El tercer plano corresponde a la situación final de la Bahía una vez dichas obras (terminal más dragado) hayan finalizado.



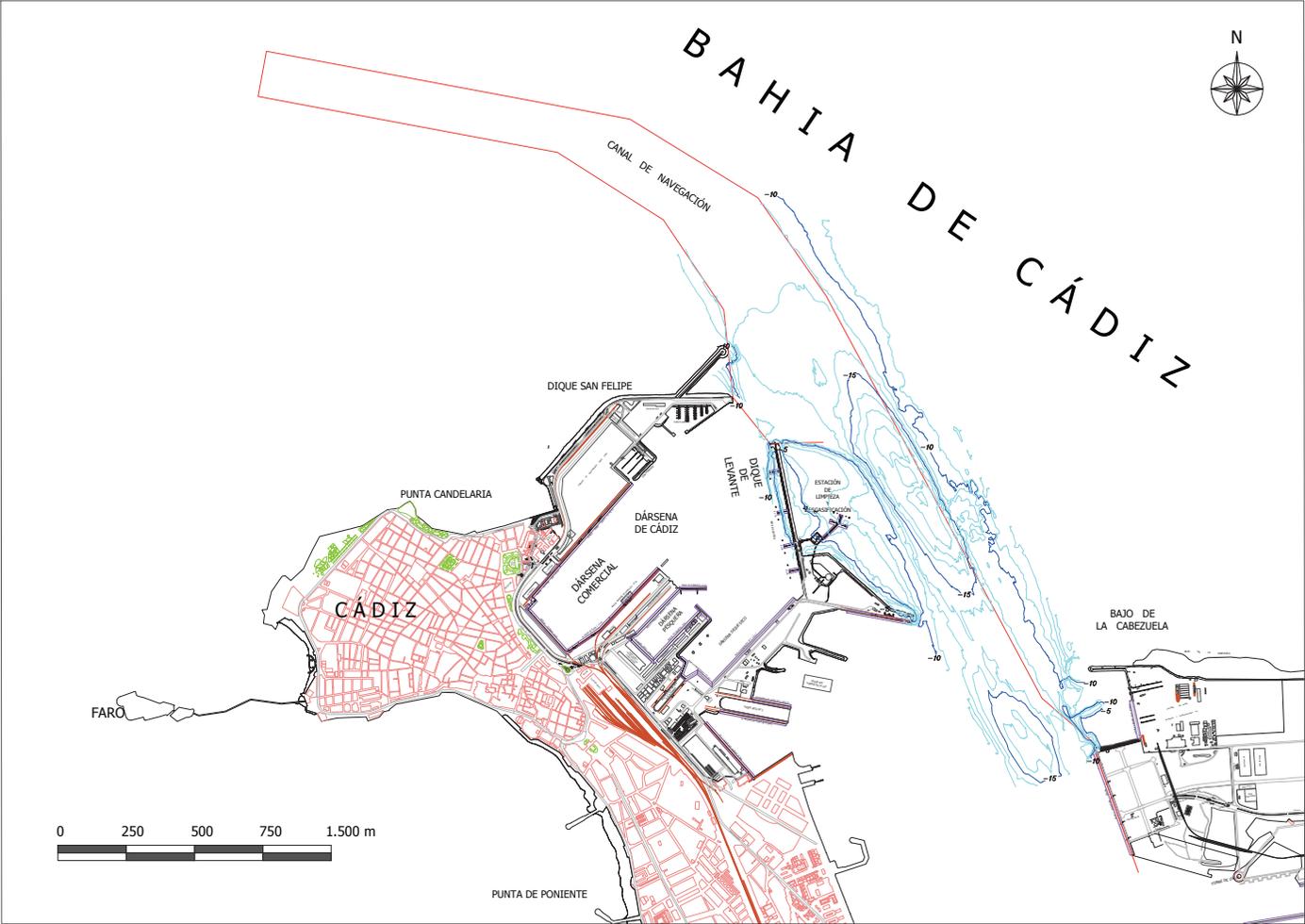


Figura 2.3: Plano de la situación actual del Puerto de Cádiz.



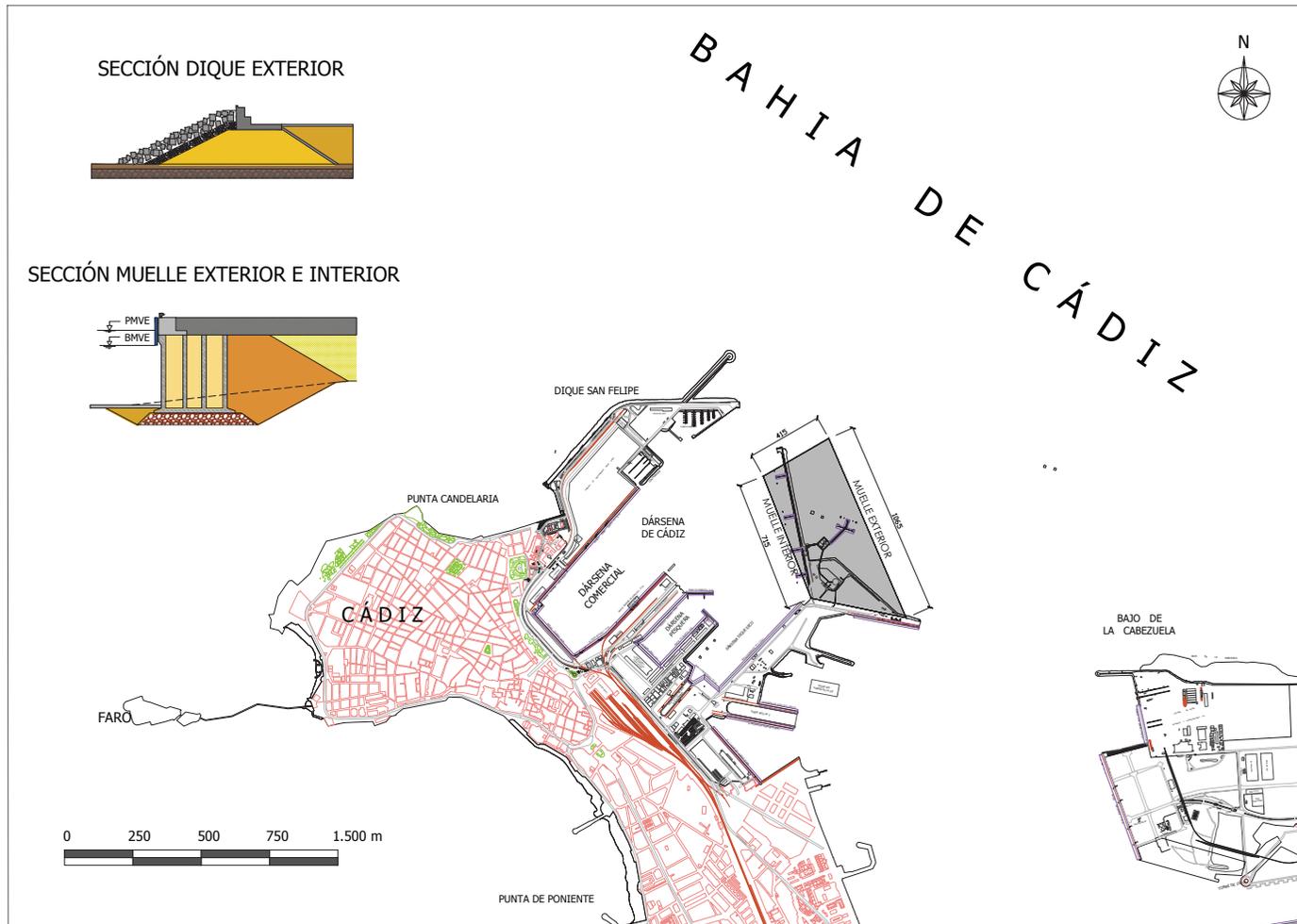


Figura 2.4: Plano de la nueva terminal de contenedores del Puerto de Cádiz. Secciones del dique de abrigo y Muelles.



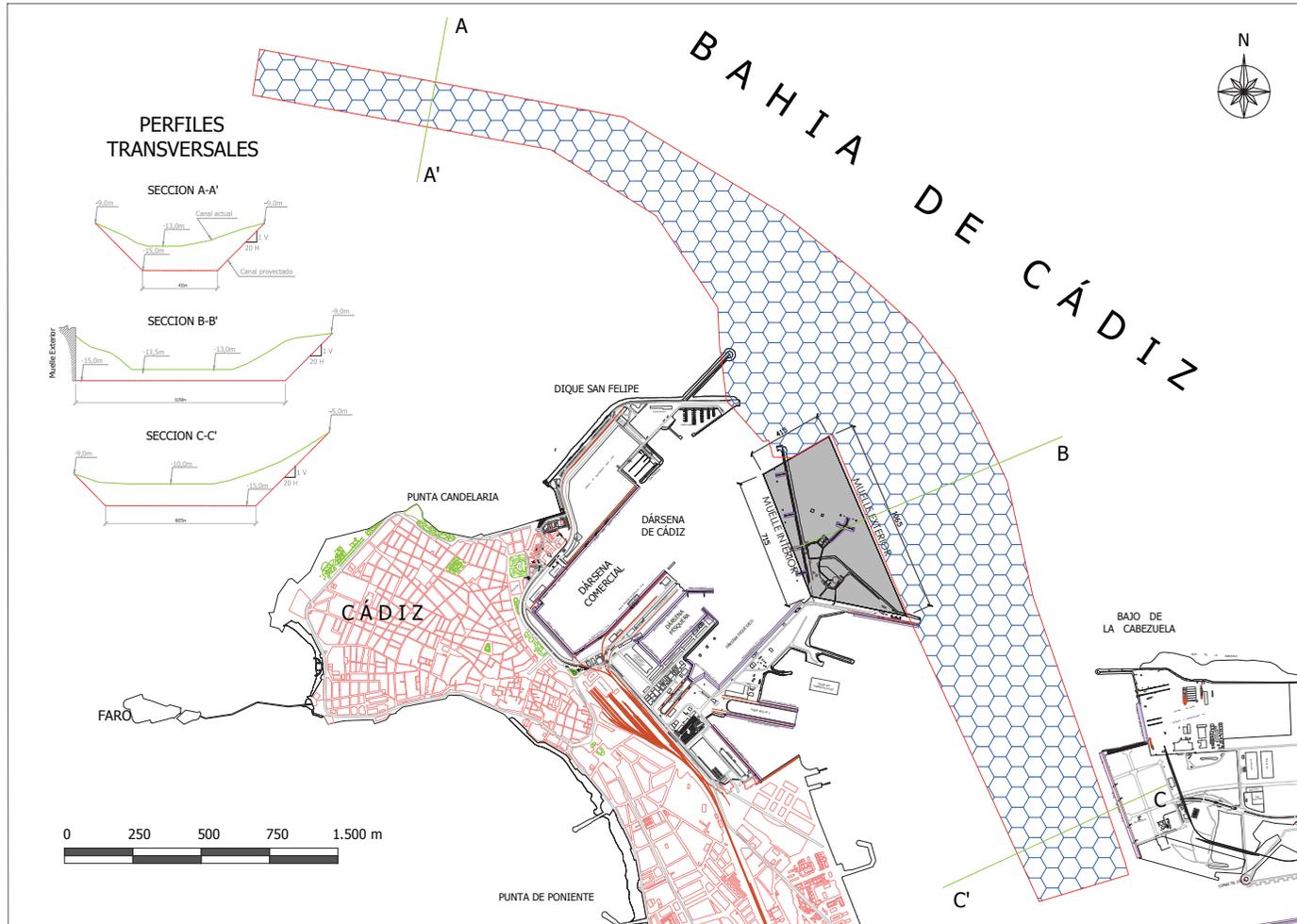


Figura 2.5: Plano de la situación final del Puerto de Cádiz. Nueva terminal más dragado.

#### **2.2.4. Proceso Constructivo**

El proceso constructivo de las nuevas obras portuarias de la Bahía de Cádiz se compone de los siguientes puntos:

1. Demolición de los tres duques de alba que afectan al dragado.
2. Dragado en zanja alrededor de la futura nueva terminal para retirar los lodos que impedirían un correcto asiento tanto del dique como de los muelles.
3. Vertido de escollera y grava en la banqueta de apoyo de cajones y rasanteo.
4. Fabricación, botadura, transporte y fondeo de los cajones de hormigón armado para la construcción de los muelles.
5. Formación de juntas y relleno de las celdas de los cajones.
6. Colocación de instrumentación para control de movimientos en el dique de levante.
7. Preparación y entronque con el dique de abrigo y formación de la plataforma de arranque.
8. Colocación por medios marítimos de banqueta de escollera de 6 t cada una en el dique de abrigo.
9. Vertido por fondo por medios marítimos de todo uno del núcleo y perfilado del talud de apoyo de escollera
10. Colocación mediante grúas sobre pontona de bloques de escollera de 1.5 t cada uno.
11. Colocación mediante grúas sobre pontona de bloques de hormigón de 12 t cada uno. Todos estos trabajos se realizan por medios marítimos hasta la cota -2 m.
12. Continuación por medios terrestres de la formación del dique de abrigo colocando escalonadamente todo uno, escollera de 1.5 t y bloques de hormigón de 12 t cada uno hasta entroncar con el cajón de vuelta del muelle.
13. Retirada y acopio de escollera del dique de Levante.
14. Vertido y perfilado de taludes con material de filtro en dos capas y colocación de geotextil.
15. Formación de la mota sur de cierre con todo en uno y la escollera recuperada del dique de Levante, con idéntico procedimiento constructivo al empleado en el dique de abrigo.
16. Relleno por vía marítima hasta la cota -3 m del pedraplen de trasdos del muelle de cajones
17. Ejecución de la losa de hormigón armado sobre cajones cajones y terminación del relleno de trasdós por vía terrestre. Se dejará una boca de 60 m que permita la entrada de las dragas para el relleno de la explanada mediante vertido por fondo hasta la cota -6 m.
18. Ejecución de la solera, arranque del muro del espaldón del dique de abrigo mediante hormigón sumergido.

## **2. Zona de estudio**

---

19. Alzado del muro y terminación del dique de abrigo con la colocación de escollera y bloques finales.
20. Dragado general de las zonas de atraque y reviro, así como a lo largo del canal de navegación hasta la cota -15 m.
21. Mejora de la explanada mediante colocación de drenes.
22. Precarga de la explanada con material marino hasta la cota +12 m realizada durante el tiempo necesario para estabilizar los asientos.
23. Ejecución de los trabajos de acabado e instalaciones auxiliares.

### **2.2.5. Resumen de características de las actuaciones propuestas**

#### **Terminal de contenedores:**

- Superficie de explanada: 38 Ha
- Anchura de la terminal: 425 m
- Longitud muelle exterior: 1065 m
- Longitud muelle interior: 715 m

#### **Dragado:**

- Calado: Se pretende llegar hasta la cota -15 m.
- Volumen: 3.600.000 m<sup>3</sup>.



# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se expone la metodología seguida en este proyecto fin de carrera para la consecución de los objetivos marcados.

### 3.1. Clima marítimo

#### 3.1.1. Datos de partida

El Golfo de Cádiz cuenta con tres Boyas y dos puntos Wana de los que se podrían obtener los datos de partida del oleaje para las simulaciones, todos ellos pertenecientes a Puertos del Estado.

- Dos puntos WANA: WANA 1052046 y WANA 1054046
- Boyas de la REDEXT: Golfo de Cádiz
- Boya de la REDCOS: Costa de Cádiz
- Boya de la REMRO: Cádiz

Los datos fueron tomados de la **“Boya Golfo de Cádiz”** ( $6.96^{\circ}$  W  $36.48^{\circ}$  N) debido al volumen de datos de que dispone, su frecuencia de muestreo y su lejanía de la costa. Para mayor información acerca del funcionamiento de cada uno de las Boyas, véase **Apéndice A: Red de Puertos del Estado**.

En el análisis del clima marítimo se han estudiado tanto para el oleaje como para el viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal o de tormenta.

#### 3.1.2. Descripción general en profundidades indefinidas

Se han representado tanto un diagrama de la altura de ola con respecto al tiempo como de la velocidad del viento con respecto al tiempo desde la fecha en la que se empiezan a tener datos (1995-2012).

Para el oleaje se obtienen los diagramas de dispersión que relacionan las variables de altura de ola significativa, periodo y dirección media de procedencia. Para el viento se relacionan las variables dirección del viento con velocidad del viento. Esto permite conocer cuales son los tipos de oleaje y de viento más frecuentes. Junto a cada diagrama de dispersión se incluye una tabla que describe dicho diagrama de forma numérica.

Finalmente dichas variables se representan también mediante histogramas y una rosa de oleaje y viento, lo que permite ver de forma rápida cuales son las alturas de ola, periodos, direcciones medias de procedencia, velocidades y direcciones de viento que predominan para la Bahía de Cádiz.

#### 3.1.3. Régimen medio

Se analiza en primer lugar el régimen medio escalar, para todo el registro de datos de la Boya. Posteriormente se consideran las dos direcciones de procedencia más frecuentes de oleaje y de viento y se analiza el régimen medio para dichas direcciones.

El análisis del régimen medio incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución de Weibull en papel probabilístico normal.

Con dichas funciones se pretende conocer la densidad de probabilidad de las alturas de ola y velocidades de viento, así como su probabilidad de no excedencia.

#### 3.1.4. Régimen extremal

Para el análisis del régimen extremal es necesario extraer los datos de la Boya que corresponden a periodos de tormenta, para ello se emplea el método de “Picos Sobre Umbral (POT)”, fijando una altura de ola umbral de 3 m, correspondiente al valor que es superado menos del 1 % del tiempo en el año medio. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración entre temporales debe ser superior a 48 h.

Se obtienen 51 eventos extremales para los cuales se analiza:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad generalizada de valores extremos <sup>1</sup>.
- Ajuste de los datos a una función de distribución generalizada de valores extremos.
- Gráfica altura de ola/velocidad de viento frente a periodo de retorno.

---

<sup>1</sup>La ventaja de emplear dicha función es que dependiendo del valor que tomen los parámetros la función automáticamente se convierte en una Gumbel, Frechet o Weibull.

Igual que en el régimen medio, se analiza en primer lugar el régimen extremal escalar para todos los datos extremales extraídos mediante el método POT y posteriormente se analiza para las dos direcciones más frecuentes.

## 3.2. Escenarios

Se definen tres escenarios batimétricos coincidentes con la situación actual y actuaciones futuras previstas para la Bahía de Cádiz, con la finalidad de simular las condiciones de forzamiento sobre ellos y analizar las posibles afecciones a la hidrodinámica de la Bahía.

- **Escenario 1:** Situación actual.
- **Escenario 2:** Nueva terminal.
- **Escenario 3:** Nueva terminal más dragado.

### 3.2.1. Escenario 1: Situación actual

Este escenario refleja la situación actual de la Bahía de Cádiz. Sin ampliar la terminal de contenedores ni realizar el dragado sobre el canal de navegación.

Para su definición se ha empleado:

- Batimetría facilitada por la Autoridad Portuaria del Puerto de Cádiz.
- Datos de batimetría procedentes de campañas de campo realizadas, como es el caso del río Guadalete y la desembocadura del río San Pedro.
- Cartas náuticas de la Bahía para completar la batimetría facilitada por el puerto en la zona de profundidades indefinidas.

### 3.2.2. Escenario 2: Nueva terminal

Con este escenario se pretende estudiar el efecto que produce únicamente la nueva terminal en la Bahía. Se compone de los mismos elementos que el escenario 1 salvo la zona de la terminal dónde se han modificado las líneas batimétricas, se ha modificado la línea de costa para incluir la nueva ampliación de la terminal y se ha rellenado la explanada para adaptarla a la nueva situación.

### 3.2.3. Escenario 3: Nueva terminal más dragado

Este escenario refleja el efecto que producen de manera conjunta la nueva terminal y el dragado, representado la situación final de la Bahía. Su diseño parte del escenario 2 al que se le añade la modificación de las líneas de batimetría en la zona del dragado.

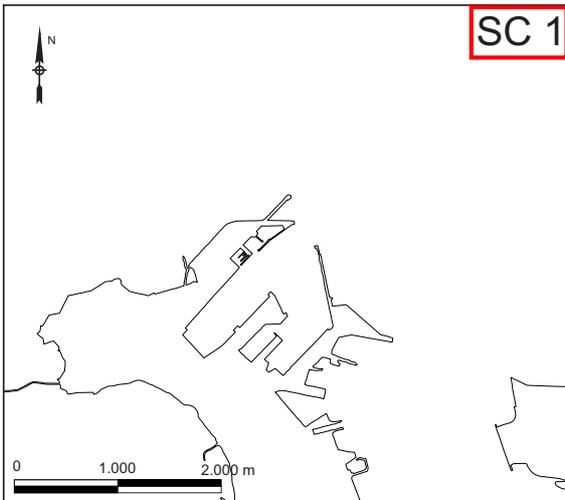


Figura 3.1: Esquema SC 1

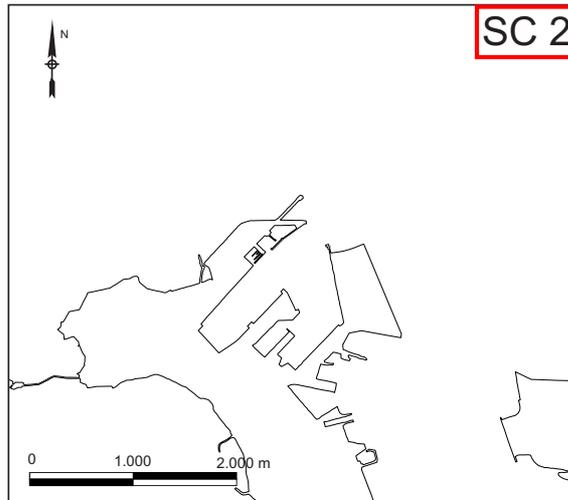


Figura 3.2: Esquema SC 2

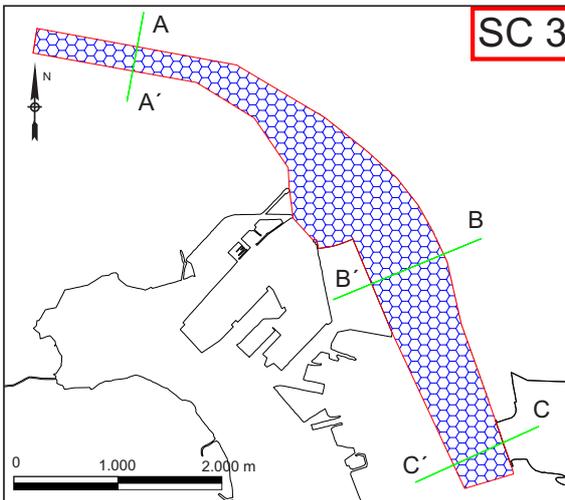


Figura 3.3: Esquema SC 3

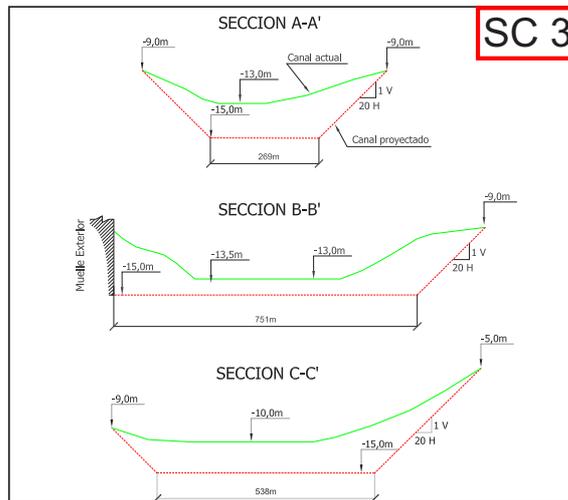


Figura 3.4: Secciones SC 3

### 3.3. Campaña de campo

Para la calibración del modelo numérico es necesario disponer de datos de altura de ola, periodo y dirección medidos en determinados puntos de la Bahía para poder comparar con los resultados de las simulaciones realizadas.

Se ha llevado a cabo una campaña de campo de larga duración (3-4 meses) durante la cual los diferentes instrumentos fondeados tomará medidas de las tres componentes de la velocidad del flujo, presión, temperatura, medición de la superficie libre, conductividad, temperatura y turbidez.

### 3. Metodología

---

Los instrumentos fondeados agrupados en cinco muertos de hormigón o trípodes son:

- $I_1$  : ADCP 2Mhz, CTD y OBS
- $I_2$  : AWAC, CTD y OBS
- $I_3$  : ADCP 1 Mhz y CTD
- $I_4$  : ADCP 2 Mhz
- $I_5$  : ADCP 2 Mhz
- Tres mareógrafos.

La ubicación de los instrumentos se ve en la figura 5.2

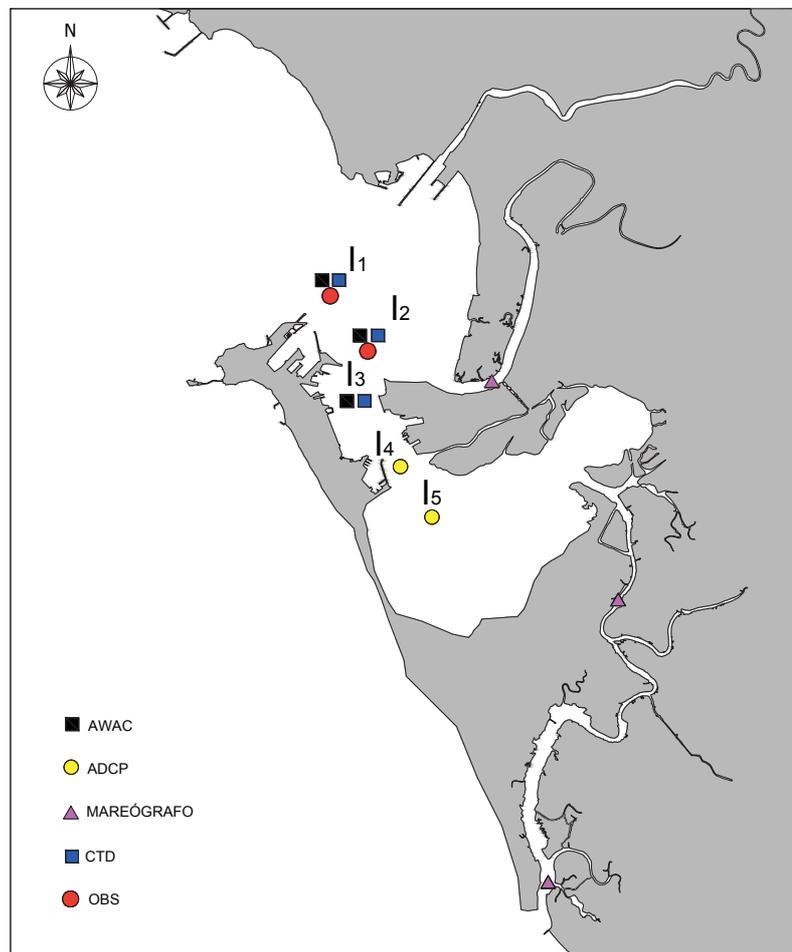


Figura 3.5: Mapa de la colocación de los instrumentos fondeados.

Las variables que se han medido con los instrumentos fueron:

- Las tres componentes de la velocidad del flujo en toda la columna de agua (ADCP y AWAC)
- Presión (ADCP y AWAC)
- Temperatura (ADCP y AWAC)
- Seguimiento de la superficie libre (AWAC)
- Evolución temporal de la superficie libre a partir de la presión (Mareógrafo)
- Conductividad del agua (CTD)
- Turbidez (OBS)

#### 3.4. Modelo Numérico

El modelo numérico empleado para la propagación de oleaje y análisis hidrodinámico es el Delft3D.

Se ha utilizado este modelo ya que es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas, entre ellas: la necesidad de un código que trabaje tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa; que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y lo más importante, se trata de un software libre.

El modelo Delft3D fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países Bajos) para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, . . . generados por vientos locales y corrientes ambientales.

Dicho programa engloba varios módulos, en este proyecto se utilizan de manera conjunta y sincronizada el módulo WAVE y FLOW lo que dota a las simulaciones de de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos.

El trabajo a realizar con el modelo se descompone en:

- Calibración y validación del modelo.
- Simulación de las condiciones de forzamiento en los escenarios.

##### 3.4.1. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se emplean los datos medidos durante la campaña de campo por el instrumento fondeado en  $I_1$ : ADCP 2 Mhz.

### 3. Metodología

En la figura 3.6 se detalla el proceso iterativo seguido para calibrar el modelo:

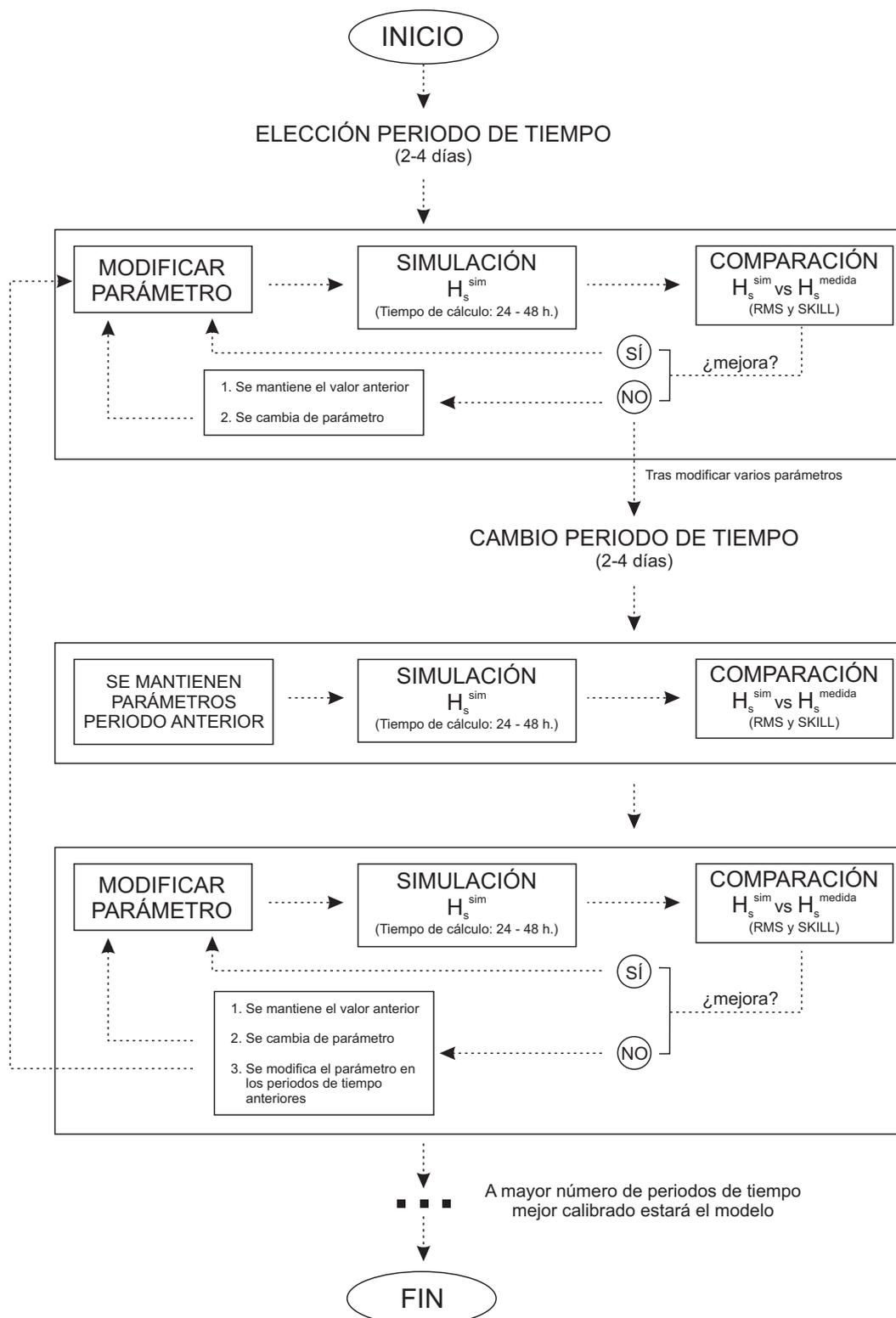


Figura 3.6: Esquema del procedimiento seguido para la calibración del modelo.

Se elige un periodo de tiempo para la simulación dentro de los tres meses que duró la campaña de campo. Posteriormente se modifica un parámetro dejando los demás con su valor por defecto. Se realiza la simulación obteniendo una altura de ola simulada  $H_s^{sim}$  en el punto de control dónde el instrumento ADCP “I<sub>1</sub>” midió durante la campaña. Resultado de dicha medición se obtiene  $H_s^{medida}$ . Se comparan dichas alturas de ola empleando dos coeficientes de correlación: el R y el Skill que se detallan en el **Apéndice C: Parámetros para el cálculo del error. Coeficiente de correlación R y Skill.**

- **a) La simulación mejora respecto a la anterior:** En ese caso se vuelve a modificar el mismo parámetro para tratar de ajustarlo hasta que los resultados de la simulación no mejoren respecto de la simulación anterior. Es la opción b)
- **b) La simulación no mejora respecto de la anterior:** En este caso se cambia de parámetro y se repite todo el proceso.

Repitiendo este proceso para cada uno de los parámetros del modelo y para diferentes periodos de tiempo se obtienen unos valores para cada parámetro que permiten propagar oleaje de forma precisa sean cuales sean las condiciones de la Bahía.

El número total de simulaciones realizadas fue de 65 y se encuentran de forma resumida y comentada en el **Apéndice B: Calibración del modelo: Simulaciones**

#### 3.4.2. Validación del modelo

Una vez el modelo ha sido calibrado para varios periodos de tiempo, se elige otro periodo distinto de los anteriores dónde se simulan de nuevo el oleaje sin modificar ningún parámetro. Si el ajuste es bueno, el modelo se puede decir que está bien calibrado y validado.

#### 3.4.3. Simulación de las condiciones de forzamiento en los escenarios

Definidos los tres escenarios, sobre ellos se analizarán:

- El régimen medio.
- Dos temporales, uno procedente del NNW y otro del SW.

#### 3.4.4. Análisis del régimen medio

Se debe calcular el régimen medio en los tres escenarios para posteriormente compararlos entre sí y analizar los efectos de cada escenario sobre la dinámica de la Bahía.

El análisis del régimen medio implica tener los 46461 estados de mar de la Boya propagados en los diferentes puntos de control definidos dentro de la Bahía.

Propagar todos los estados de mar supone un alto coste computacional, por tanto el procedimiento a seguir es:

1. Se seleccionan los estados de mar más representativos de todo el registro de la Boya (200 estados de mar). Para ello, en primer lugar se analizan las tablas 4.2, 4.17 y 4.6 para sacar los estados de mar más frecuentes. En segundo lugar se añaden algunos de estados de mar para tener una representación completa de todo el registro de la Boya, para poder interpolar posteriormente.

### 3. Metodología

---

2. Los estados de mar seleccionados se dividen en tres grupos en función de la dirección de procedencia: SW, W y NW para facilitar la propagación mediante Delft3D
3. Cada grupo de estados de mar se propaga desde la Boya a los puntos de control de la Bahía.
4. Se programa una rutina en Matlab para que:
  - Lea los archivos de salida del programa (estados de mar propagados) de cada uno de los tres grupos.
  - Junte los tres grupos en un archivo único que contenga los 200 estados de mar propagados.
  - Pregunte en que punto de control queremos realizar la interpolación de los datos.
  - Empleando una función de Matlab “interp3D” se interpolan los 46461 datos a partir de los 200 propagados, teniendo todos los datos propagados en el punto de control elegido.
  - Repita el proceso para todos los puntos de control dónde se deseen analizar el régimen medio.
  - Para cada escenario por separado calcule los histogramas de altura de ola significativa, función de densidad de Weibull, función de distribución de Weibull, rosa de oleaje y resultante media anual (RMA) en cada punto de control.
  - Superponga los histogramas, funciones de densidad, distribución, rosas y RMA de los escenario 2 y 1. Y haga lo mismo con los del escenario 3 y los del 1 para poder analizar como varía la hidrodinámica de un escenario a otro en función de las actuaciones realizadas en la Bahía.

La figura 3.7 refleja dicho proceso:

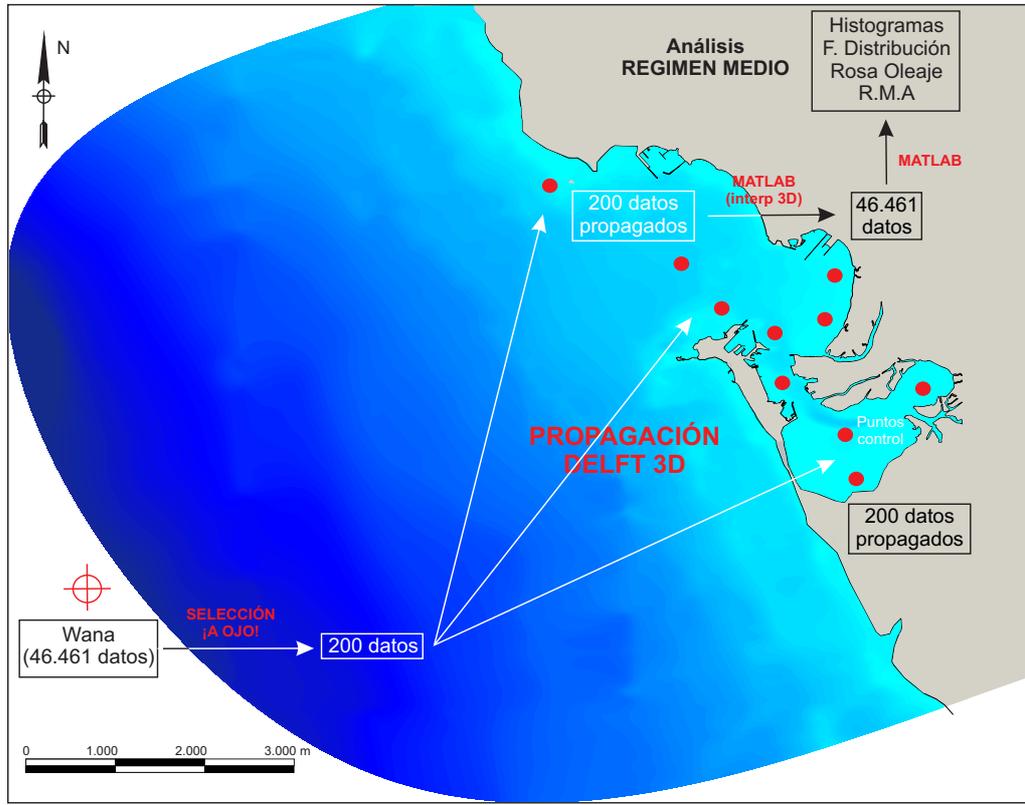


Figura 3.7: Esquema del procedimiento seguido para el análisis del régimen medio.

#### 3.4.5. Análisis de los temporales

Para el análisis de los temporales el proceso seguido es:

- Elección de dos temporales siguiendo los siguientes criterios programando un rutina en Matlab:
  - Que tengas alturas de ola mayores de los 3 m.
  - Que tengan una duración mayor o igual a 72 horas para tener un número suficiente de datos con los que realizar el análisis
  - Que coincidan con ciclos de marea viva para que situación sea la más desfavorable.
  - Que las direcciones de procedencia sean NNW y SW
- Propagación de los temporales para cada escenario mediante el modelo numérico calibrado. Tres escenarios con dos temporales por escenario dan lugar a 6 casos diferentes.
- Para cada caso analizar:
- Variación del coeficiente de propagación en cada punto, definido como:  $C_p = \frac{H_s}{H_{boya}}$

#### 3.5. Análisis de resultados

Para el análisis del régimen medio se calculan para cada escenario:

1. Los histogramas de altura de ola a lo largo de la playa de Valdelagrana.
2. Las rosas de oleaje a lo largo de la playa de Valdelagrana.
3. La función de densidad a lo largo de la playa de Valdelagrana.
4. La resultante media anual a lo largo de la playa de Valdelagrana.
5. Los histogramas de altura de ola a lo largo del canal de navegación.
6. Las rosas de oleaje a lo largo del canal de navegación.
7. La función de densidad a lo largo del canal de navegación.
8. La resultante media anual a lo largo del canal de navegación.

Se calculan las diferencias de cada resultado entre el escenario 2 y el 1 y entre el escenario 3 y el 1 para analizar como afectan las dos nuevas actuaciones portuarias a la dinámica de la Bahía.

Para los temporales, se calculan para el temporal del SW y el del WNW:

1. Los coeficientes de propagación para cada escenario en todos los puntos de la Bahía.

Se calculan las diferencias de los coeficientes de propagación entre los escenarios para analizar como afectan las dos actuaciones portuarias.



## Capítulo 4

# Clima Marítimo

### 4.1. Datos para el estudio del clima marítimo de la zona de estudio

Los datos empleados para el estudio del clima marítimo en la Bahía de Cádiz son los del punto WANA 1052046. Su localización puede verse en la figura 4.1.

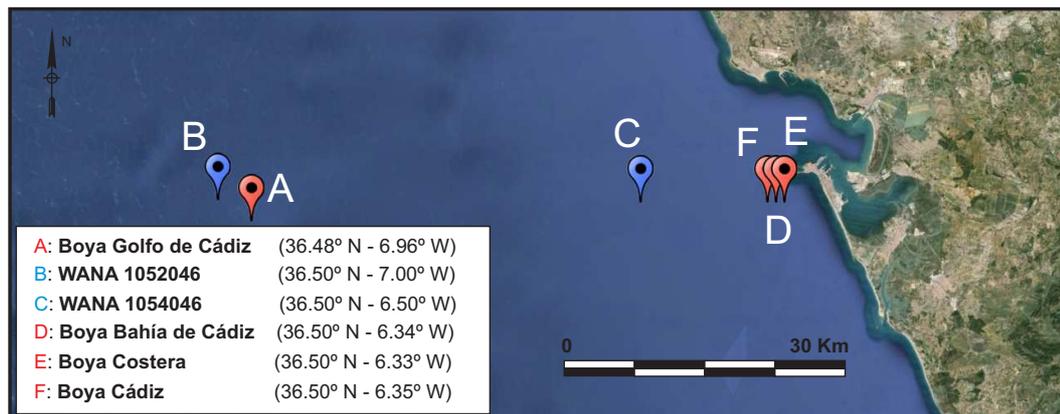


Figura 4.1: Localización de las Boyas y puntos WANA disponibles en la Bahía de Cádiz.

Para más información acerca del funcionamiento, medidas, frecuencia de muestreo, etc. tanto de las Boyas como de los puntos WANA véase el **Apéndice A: Red de medida de Puertos del Estado**.

Se analiza para el oleaje y para el viento:

- Descripción general en profundidades indefinidas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal

## 4.2. Oleaje

### 4.2.1. Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del oleaje en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Serie temporal del oleaje desde 1995 hasta 2012.
- Tres gráficos de dispersión entre las variables  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ . El primero representa la altura de ola respecto a la dirección de procedencia; el segundo, periodo pico respecto a la dirección de procedencia y el tercero, la altura de ola respecto al periodo pico.
- Tres tablas que representan los diagramas de dispersión de forma numérica.
- Tres histogramas, uno por cada variable:  $H_s$ ,  $T_p$  y  $\theta$ .
- Rosa de oleaje.

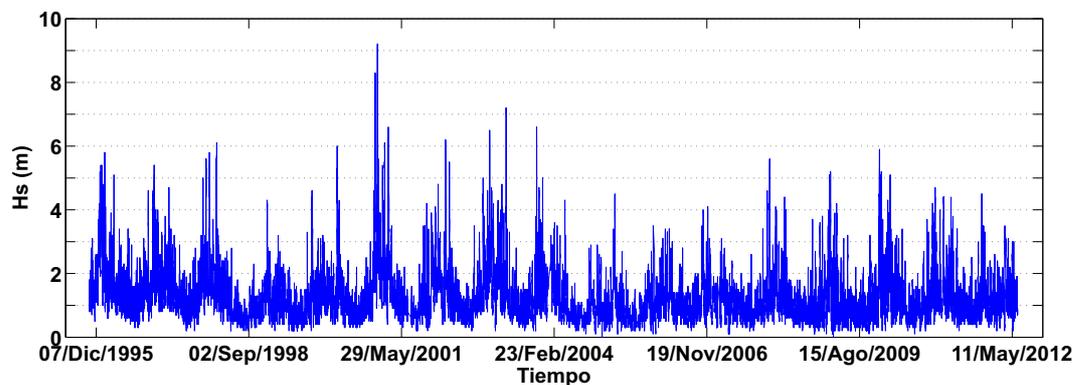


Figura 4.2: Serie temporal altura de la altura de ola.

#### 4. Clima Marítimo

Hs (m)	Fr (%)
[a - b]	
0 - 0.25	1.07
0.25 - 0.5	7.03
<b>0.5 - 0.75</b>	<b>20.91</b>
<b>0.75 - 1</b>	<b>15.86</b>
<b>1 - 1.25</b>	<b>18.52</b>
1.25 - 1.5	9.24
1.5 - 1.75	9.71
1.75 - 2	4.18
2 - 2.25	4.26
2.25 - 2.5	1.97
2.5 - 2.75	2.23
2.75 - 3	1.23
3 - 3.25	1.24
3.25 - 3.5	0.60
3.5 - 3.75	0.71
3.75 - 4	0.33
4 - 4.25	0.37
4.25 - 4.5	0.20
4.5 - 4.75	0.22
4.75 - 5	0.09

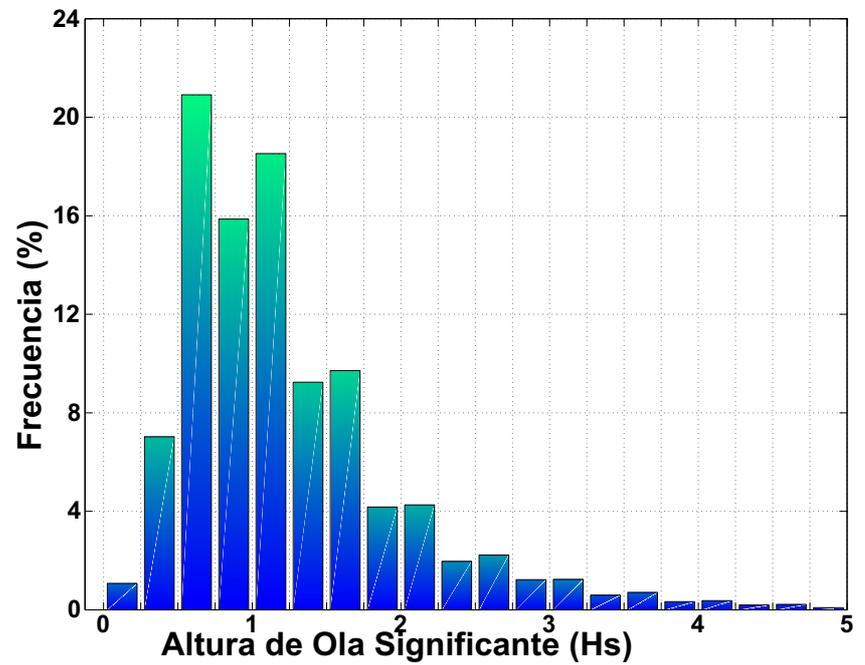


Figura 4.3: Histograma de alturas de ola

Tabla 4.1: Porcentaje de alturas de ola

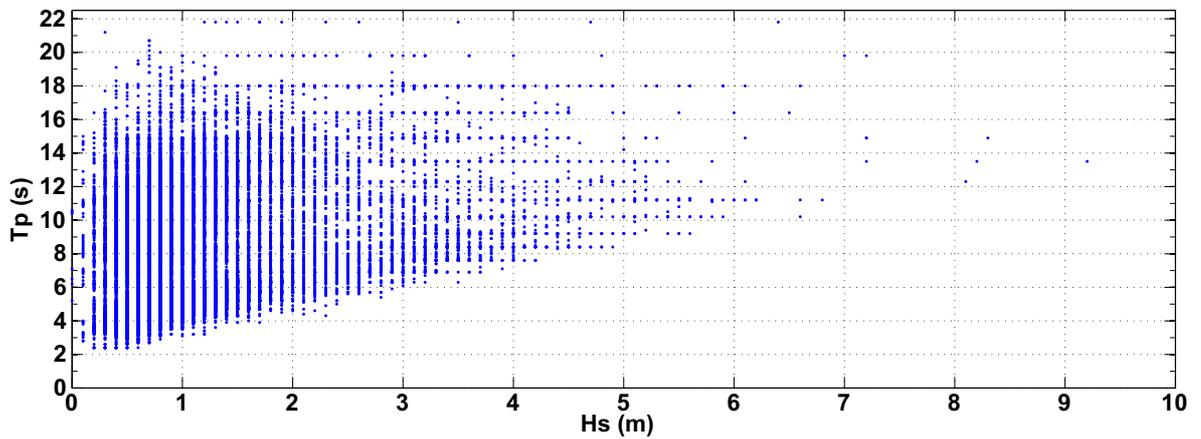


Figura 4.4: Gráfico de dispersión Hs - Tp

ALTURA SIGNIFICANTE DE OLA - PERIODO PICO																			
Hm0(m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	TOTAL
Tp (s)																			
0	0	0	0.017	0.168	0.090	0.056	0.140	0.084	0.116	0.121	0.088	0.108	0.030	0.022	0.024	0.004	0.002	0	1.070
0.25	0	0	0.069	0.820	1.100	0.278	0.491	0.581	1.083	0.898	0.590	0.446	0.269	0.176	0.097	0.052	0.037	0.011	6.995
0.5	0	0	0.125	2.374	4.244	1.784	0.826	1.472	1.907	2.391	2.017	1.705	0.964	0.555	0.314	0.056	0.056	0.019	20.811
0.75	0	0	0.002	0.749	3.330	2.271	0.751	0.734	1.128	1.403	1.651	1.410	1.154	0.710	0.299	0.069	0.095	0.026	15.781
1	0	0	0	0.209	3.229	3.818	1.162	0.596	0.777	1.266	1.365	1.916	2.002	1.240	0.585	0.069	0.140	0.050	18.422
1.25	0	0	0	0.006	0.826	2.432	0.831	0.303	0.375	0.443	0.624	0.749	1.035	0.870	0.493	0.028	0.136	0.015	9.167
1.5	0	0	0	0.006	0.349	2.507	1.567	0.411	0.319	0.370	0.396	0.514	1.003	1.089	0.717	0.093	0.209	0.019	9.569
1.75	0	0	0	0	0.028	0.820	0.966	0.258	0.179	0.183	0.140	0.194	0.319	0.484	0.319	0.041	0.151	0.019	4.100
2	0	0	0	0	0.013	0.443	1.242	0.331	0.243	0.224	0.196	0.189	0.220	0.398	0.355	0.037	0.196	0.013	4.100
2.25	0	0	0	0	0.004	0.103	0.566	0.297	0.121	0.112	0.105	0.088	0.103	0.170	0.121	0.015	0.095	0.002	1.903
2.5	0	0	0	0	0	0.043	0.508	0.467	0.155	0.140	0.112	0.125	0.121	0.157	0.166	0.026	0.125	0.004	2.148
2.75	0	0	0	0	0	0.009	0.189	0.263	0.131	0.093	0.067	0.105	0.032	0.097	0.101	0.015	0.052	0.006	1.160
3	0	0	0	0	0	0	0.090	0.250	0.174	0.121	0.071	0.077	0.069	0.080	0.090	0.015	0.086	0.017	1.141
3.25	0	0	0	0	0	0	0.019	0.116	0.103	0.075	0.067	0.015	0.030	0.034	0.047	0.013	0.045	0.002	0.568
3.5	0	0	0	0	0	0	0.013	0.082	0.118	0.116	0.097	0.043	0.043	0.041	0.041	0.011	0.047	0.006	0.659
3.75	0	0	0	0	0	0	0	0.022	0.050	0.054	0.054	0.030	0.017	0.030	0.032	0.002	0.015	0.011	0.316
4	0	0	0	0	0	0	0	0.026	0.054	0.069	0.054	0.045	0.013	0.019	0.032	0.002	0.032	0.004	0.351
4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.015	0.043	0.030	0.028	0.015	0.013	0.022	0.002	0.019	0.002	0.189
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.022	0.030	0.050	0.041	0.026	0.019	0.011	0	0.011	0	0.209
4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0.006	0.011	0.006	0.026	0.019	0.004	0	0	0.002	0	0.075
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.017	0.022	0.041	0.028	0.017	0.009	0	0.002	0	0.136
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.017	0.013	0.002	0.006	0.004	0	0	0.045
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.006	0.013	0.019	0.004	0	0	0.002	0	0.045
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0.013	0	0.002	0	0	0	0.019
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.013	0.002	0	0.002	0	0.002	0	0.019
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0	0	0	0.002	0	0.006
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0	0	0.002
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.004	0	0	0	0.006
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0	0	0	0	0.004
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.213</b>	<b>4.333</b>	<b>13.213</b>	<b>14.565</b>	<b>9.363</b>	<b>6.293</b>	<b>7.075</b>	<b>8.188</b>	<b>7.837</b>	<b>7.957</b>	<b>7.522</b>	<b>6.240</b>	<b>3.885</b>	<b>0.549</b>	<b>1.558</b>	<b>0.228</b>	

Tabla 4.2: Altura significativa ola - Periodo Pico

#### 4. Clima Marítimo

Tp (s)	Fr (%)
[a - b)	
0 - 1	0.00
1 - 2	0.00
2 - 3	0.21
3 - 4	4.33
4 - 5	<b>13.22</b>
5 - 6	<b>14.57</b>
6 - 7	9.37
7 - 8	6.30
8 - 9	7.08
9 - 10	8.19
10 - 11	7.84
11 - 12	7.96
12 - 13	7.53
13 - 14	6.24
14 - 15	3.89
15 - 16	0.55
16 - 17	1.56
17 - 18	0.23
18 - 19	0.81
19 - 20	0.13
20 - 21	0.00

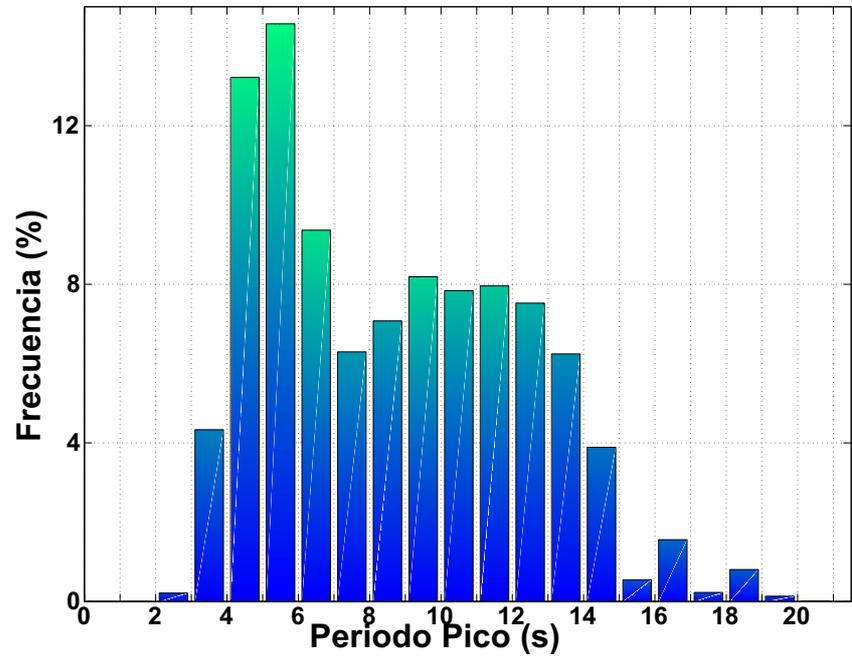


Figura 4.5: Histograma de periodos pico

Tabla 4.3: Porcentaje de periodos pico

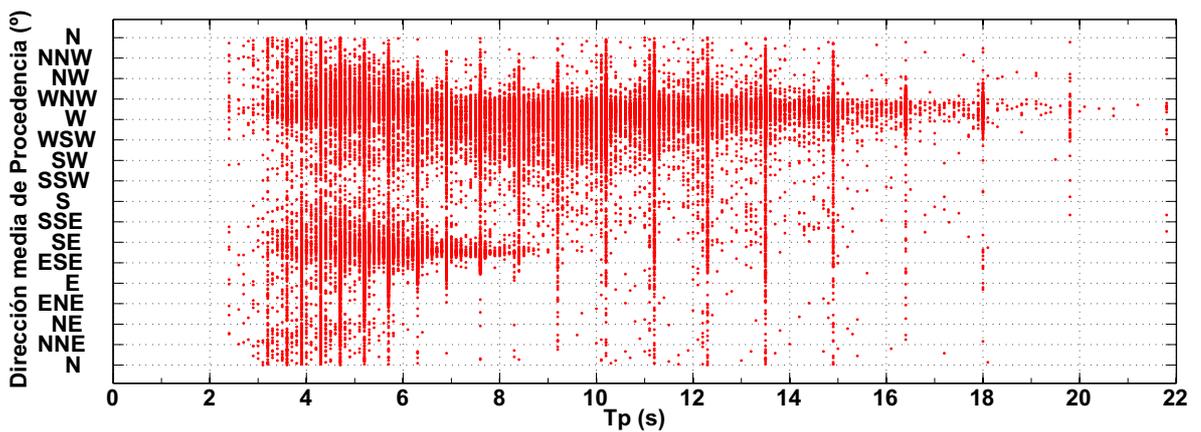


Figura 4.6: Gráfico de dispersión  $T_p - \theta$

PERIODO PICO - DIRECCIÓN MEDIA DE PROCEDENCIA																	
Tp (s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	TOTAL
	Dirección media de procedencia (°)																
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
2	0.011	0.015	0.011	0.009	0.011	0.006	0.002	0	0.004	0	0.022	0.052	0.013	0.026	0.026	0.002	0.209
3	0.258	0.144	0.149	0.196	0.366	0.245	0.090	0.060	0.069	0.062	0.220	1.184	0.478	0.284	0.254	0.138	4.197
4	0.338	0.340	0.316	0.661	1.543	0.824	0.260	0.112	0.176	0.273	0.820	4.150	2.129	0.777	0.258	0.116	13.095
5	0.086	0.172	0.340	1.188	3.003	0.833	0.200	0.116	0.204	0.452	0.848	4.382	2.081	0.478	0.108	0.039	14.530
6	0.009	0.006	0.030	0.818	2.099	0.418	0.093	0.108	0.220	0.715	1.100	2.839	0.771	0.112	0.015	0.004	9.354
7	0.002	0.002	0.002	0.125	0.932	0.140	0.058	0.097	0.174	0.693	1.229	2.434	0.323	0.058	0.019	0.004	6.293
8	0.002	0	0	0.026	0.215	0.073	0.071	0.116	0.252	0.863	1.627	3.315	0.450	0.052	0.006	0.004	7.073
9	0.011	0.009	0.017	0.026	0.043	0.054	0.103	0.133	0.267	0.904	1.931	4.126	0.471	0.069	0.019	0.000	8.183
10	0.013	0.013	0.017	0.028	0.054	0.067	0.071	0.082	0.176	0.637	1.560	4.380	0.536	0.127	0.056	0.013	7.830
11	0.013	0.017	0.034	0.039	0.082	0.108	0.108	0.084	0.136	0.491	1.345	4.440	0.790	0.174	0.062	0.019	7.942
12	0.017	0.034	0.009	0.043	0.103	0.127	0.090	0.112	0.133	0.267	1.205	4.537	0.646	0.136	0.041	0.015	7.516
13	0.006	0.013	0.028	0.067	0.077	0.108	0.099	0.058	0.071	0.151	0.839	3.900	0.607	0.142	0.043	0.017	6.227
14	0.011	0.013	0.015	0.024	0.030	0.069	0.041	0.037	0.045	0.108	0.547	2.527	0.325	0.052	0.032	0.011	3.885
15	0.004	0.002	0	0.004	0.004	0.004	0.009	0.006	0.006	0.022	0.093	0.364	0.017	0.006	0.002	0.002	0.547
16	0.004	0.004	0.004	0.009	0.004	0.013	0.006	0.013	0.006	0.015	0.200	1.121	0.142	0.009	0.004	0	1.556
17	0	0	0	0	0	0.004	0.006	0.002	0.002	0.004	0.026	0.166	0.011	0.002	0.002	0	0.226
18	0.002	0	0.004	0.009	0.013	0.002	0	0.004	0	0.004	0.105	0.573	0.071	0.011	0.004	0.002	0.805
19	0	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0.002	0.006	0.022	0.080	0.009	0.009	0.002	0	0.133
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.011	0	0	0	0	0.011
21	0	0	0	0	0	0.002	0.002	0	0	0	0.006	0.017	0	0	0	0	0.028
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
24																	0.000
<b>TOTAL</b>	0.788	0.786	0.977	3.269	8.579	3.097	1.313	1.143	1.946	5.667	13.745	44.597	9.868	2.523	0.956	0.387	

Tabla 4.4: Periodo Pico - Dirección media de procedencia

#### 4. Clima Marítimo

$\theta$ ( $^{\circ}$ )	Fr (%)
N	0.38
NNE	0.73
NE	0.81
ENE	0.80
E	1.69
<b>ESE</b>	<b>5.69</b>
<b>SE</b>	<b>7.14</b>
SSE	1.68
S	1.19
SSW	1.31
SW	3.73
WSW	7.88
<b>W</b>	<b>32.71</b>
<b>WNW</b>	<b>27.65</b>
NW	4.75
NNW	1.41

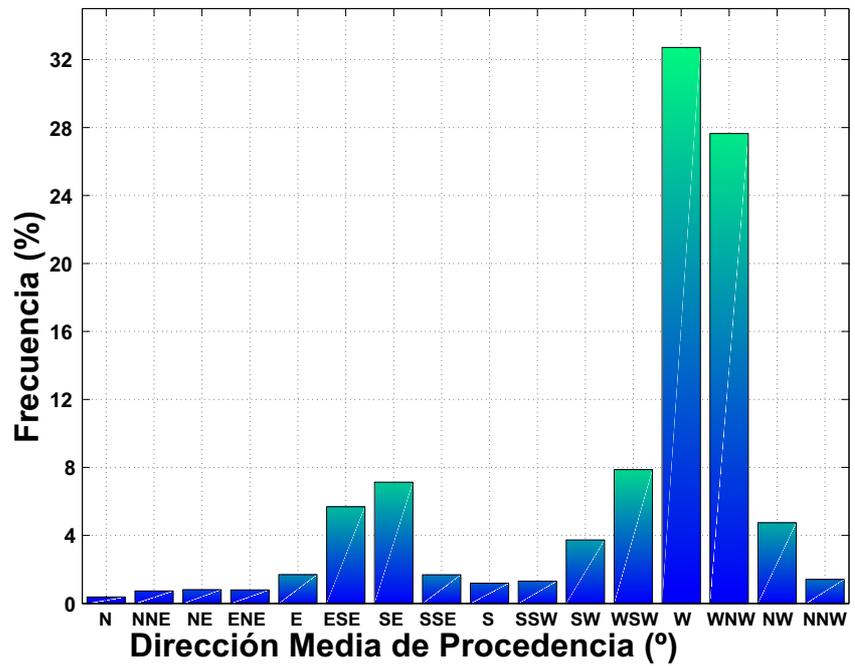


Tabla 4.5: Porcentaje de direcciones medias de procedencia

Figura 4.7: Histograma de direcciones medias de procedencia

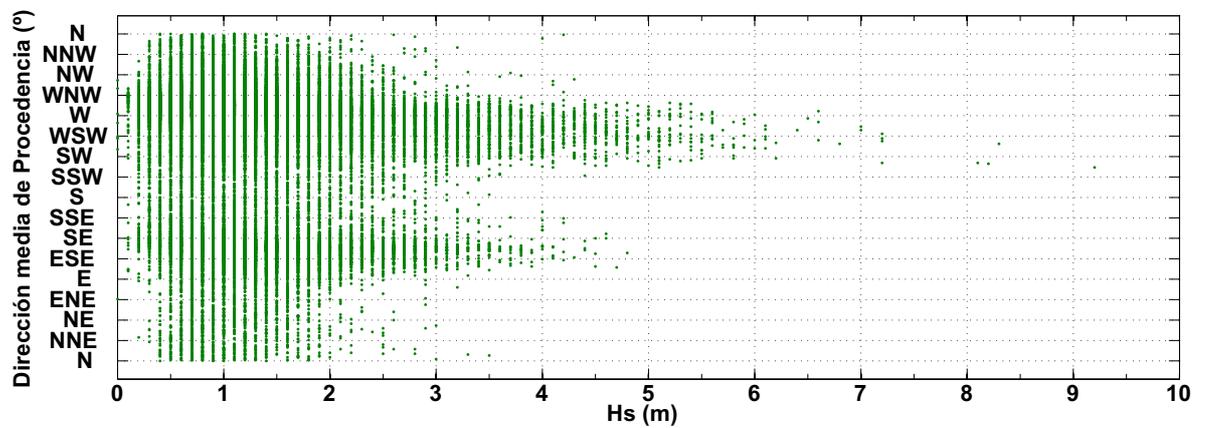


Figura 4.8: Gráfico de dispersión Hs -  $\theta$

ALTURA SIGNIFICANTE OLA - DIRECCIÓN MEDIA DE PROCEDENCIA																	
Hs (m)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	TOTAL
	Dirección media de procedencia (°)																
0	0.002	0	0.004	0.013	0.058	0.034	0.011	0.017	0.026	0.047	0.084	0.637	0.127	0.009	0	0	1.070
0.25	0.028	0.013	0.013	0.062	0.263	0.209	0.110	0.097	0.121	0.170	0.545	4.522	0.676	0.101	0.052	0.015	6.995
0.5	0.196	0.142	0.170	0.303	1.096	0.704	0.237	0.176	0.254	0.562	2.008	11.894	2.116	0.527	0.273	0.093	20.751
0.75	0.133	0.133	0.140	0.312	0.949	0.415	0.168	0.136	0.250	0.564	1.959	7.701	2.200	0.443	0.170	0.082	15.755
1	0.174	0.211	0.192	0.693	1.494	0.525	0.228	0.164	0.334	0.863	2.460	7.970	2.163	0.598	0.220	0.095	18.383
1.25	0.097	0.101	0.176	0.392	0.926	0.250	0.118	0.125	0.179	0.506	1.227	3.648	1.018	0.299	0.080	0.041	9.182
1.5	0.082	0.125	0.176	0.508	1.229	0.338	0.181	0.133	0.185	0.570	1.317	3.556	0.867	0.275	0.080	0.030	9.653
1.75	0.034	0.032	0.056	0.293	0.564	0.151	0.086	0.080	0.108	0.303	0.661	1.330	0.295	0.118	0.022	0.015	4.148
2	0.024	0.015	0.028	0.306	0.605	0.176	0.082	0.073	0.133	0.413	0.743	1.285	0.226	0.095	0.034	0.006	4.244
2.25	0.004	0.006	0.009	0.110	0.362	0.103	0.030	0.054	0.062	0.220	0.424	0.486	0.067	0.022	0.004	0	1.963
2.5	0.006	0.004	0.004	0.133	0.446	0.082	0.022	0.058	0.071	0.254	0.527	0.508	0.071	0.019	0.006	0.002	2.215
2.75	0.004	0.002	0.006	0.065	0.217	0.037	0.024	0.009	0.030	0.179	0.334	0.286	0.011	0.006	0.009	0.002	1.220
3	0.002	0	0.002	0.032	0.157	0.030	0.011	0.013	0.050	0.230	0.402	0.280	0.015	0.004	0.002	0.002	1.233
3.25	0	0	0	0.019	0.077	0.017	0.002	0.006	0.030	0.131	0.204	0.101	0.004	0.002	0	0.002	0.598
3.5	0	0	0	0.013	0.071	0.006	0.002	0.002	0.024	0.179	0.243	0.159	0.002	0.002	0	0.002	0.706
3.75	0	0	0	0.006	0.028	0	0	0	0.011	0.101	0.123	0.058	0.002	0	0	0	0.329
4	0	0	0	0.004	0.026	0.013	0.002	0	0.011	0.103	0.155	0.045	0.006	0	0.004	0	0.370
4.25	0	0	0	0	0.009	0	0	0	0.011	0.054	0.086	0.034	0.002	0	0	0	0.196
4.5	0	0	0	0.004	0.002	0.006	0	0	0.017	0.052	0.108	0.030	0	0	0	0	0.220
4.75	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0.004	0.037	0.034	0.011	0	0	0	0	0.088
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.017	0.054	0.039	0.028	0	0	0	0	0.138
5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0.015	0.017	0.013	0	0	0	0	0.050
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.024	0.017	0.009	0	0	0	0	0.052
5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.013	0.011	0	0	0	0	0	0.026
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.013	0.004	0.002	0	0	0	0	0.022
6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0	0	0	0.002
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.004	0.002	0	0	0	0	0.009
6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.000	0	0	0	0	0	0.002
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.004	0.006	0	0	0	0	0	0.013
7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
7.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.004	0	0	0	0	0	0	0	0.004
<b>TOTAL</b>	0.788	0.786	0.977	3.269	8.579	3.097	1.313	1.143	1.946	5.667	13.745	44.597	9.868	2.523	0.956	0.387	

Tabla 4.6: Altura significativa ola - Dirección media de procedencia

## 4. Clima Marítimo

---

Se representa a continuación la rosa de oleaje de los datos del punto WANA.

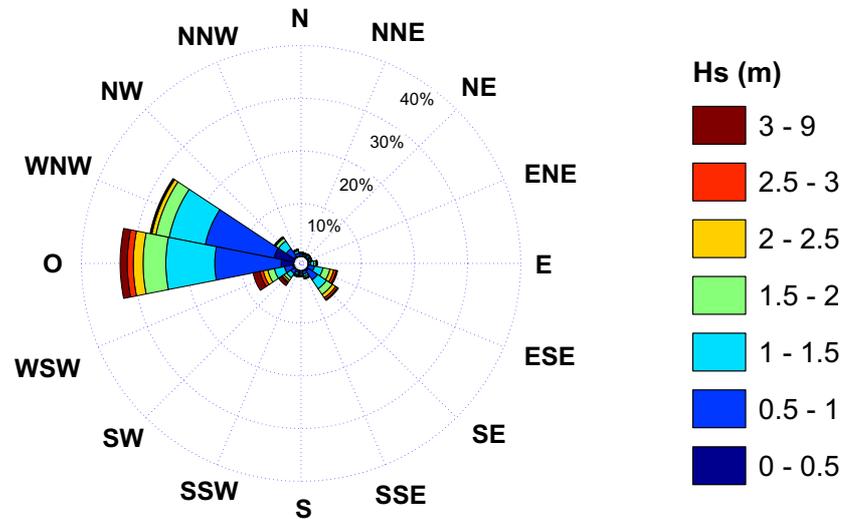


Figura 4.9: Rosa de Oleaje

### 4.2.1.1. Resumen de resultados parciales

Los resultados más reseñables de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Rango de alturas de ola entre 0 y 5 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.5 y 1 m.
- Rango de periodos pico entre 2 y 20 s.
- Los periodos pico más frecuentes están entre 4 y 6 s.
- Las direcciones de procedencia del oleaje más frecuentes son SE y W.

### 4.2.2. Régimen medio anual de $H_s$ en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio anual del oleaje en profundidades indefinidas para la “Altura de ola significativa  $H_s$  (m)” considerando todas las direcciones. Después se calcula de nuevo el régimen medio pero únicamente para las dos direcciones predominantes del oleaje: W y SE.

Todos los regímenes medios de altura de ola significativa se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0,\infty)}(x) \quad (4.1)$$

En la tabla 4.18 se muestran los parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de altura de ola obtenidos según la distribución de Weibull.

	a	b
<b>Escalar</b>	1.3819	1.7014
<b>Dirección W</b>	1.3683	1.7186
<b>Dirección SE</b>	1.5345	1.9819

Tabla 4.7: Parámetros de la distribución tipo Weibull para el régimen medio

Las figuras siguientes se organizan en tres bloques, cada bloque corresponde con un régimen medio distinto: el escalar y los dos direccionales (W y SE). Dentro de cada bloque se pueden diferenciar tres figuras, en la primera se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos), esta gráfica permite conocer la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la segunda figura se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada altura de ola, es decir, la probabilidad de que dicha altura de ola no sea superada.

4.2.2.1. Régimen medio escalar

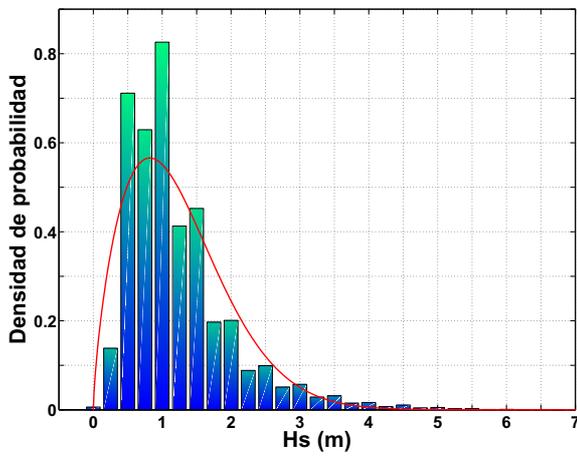


Figura 4.10: Función de densidad escalar

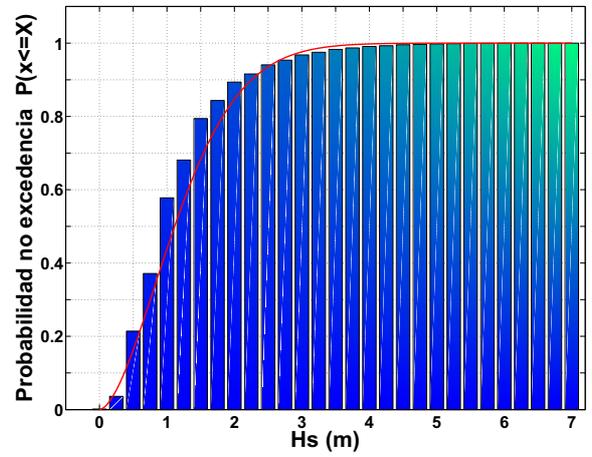


Figura 4.11: Función de distribución escalar

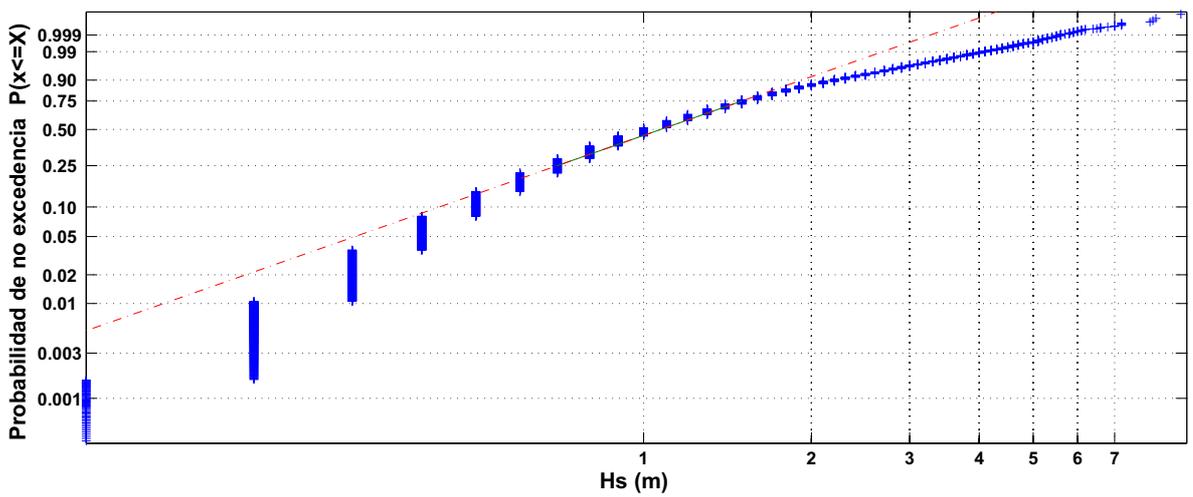


Figura 4.12: Función distribución escalar en papel probabilístico normal

4.2.2.2. Régimen medio direccional W

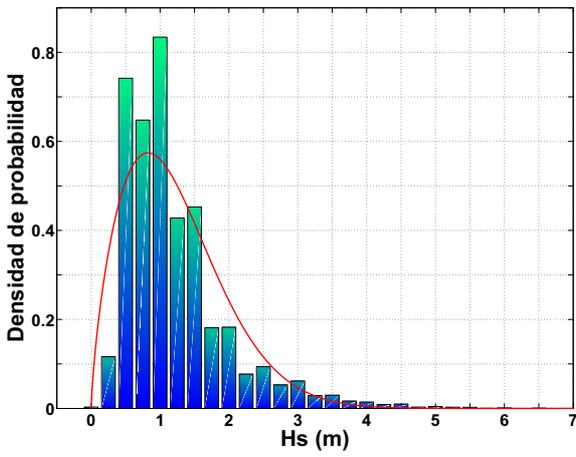


Figura 4.13: Función de densidad direccional:W

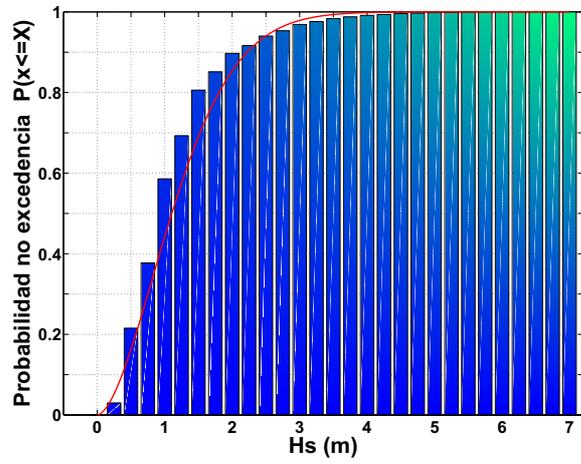


Figura 4.14: Función de distribución direccional: W

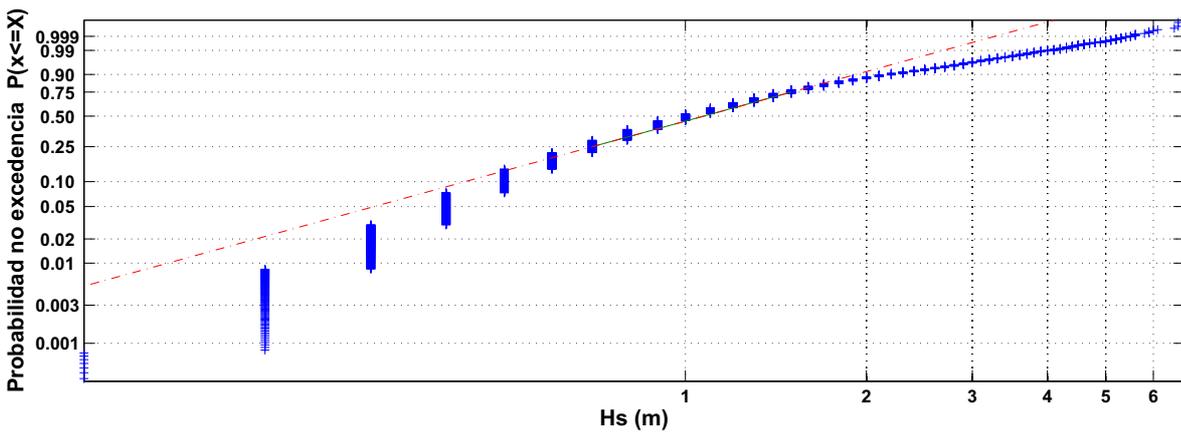


Figura 4.15: Función distribución direccional W en papel probabilístico normal

4.2.2.3. Régimen medio direccional SE

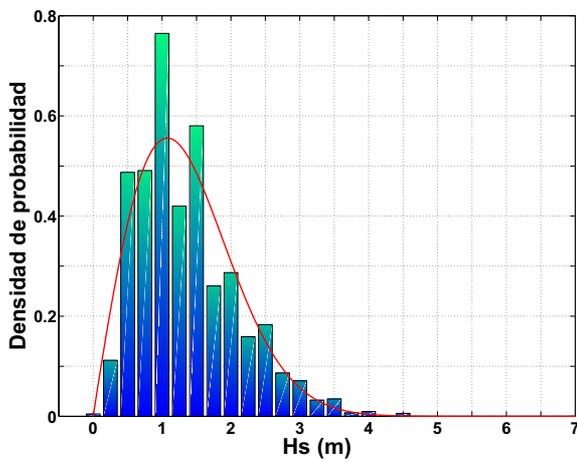


Figura 4.16: Función de densidad direccional:SE

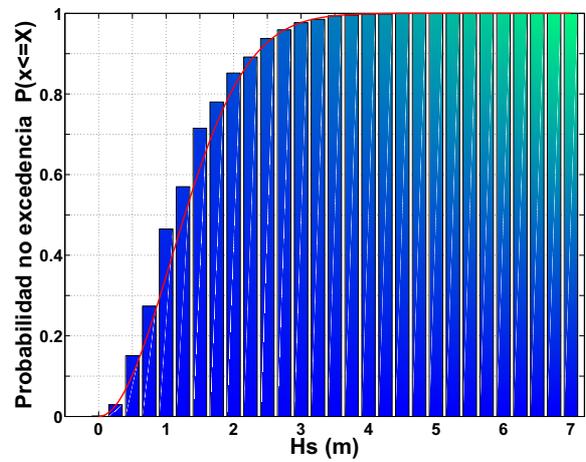


Figura 4.17: Función de distribución direccional: SE

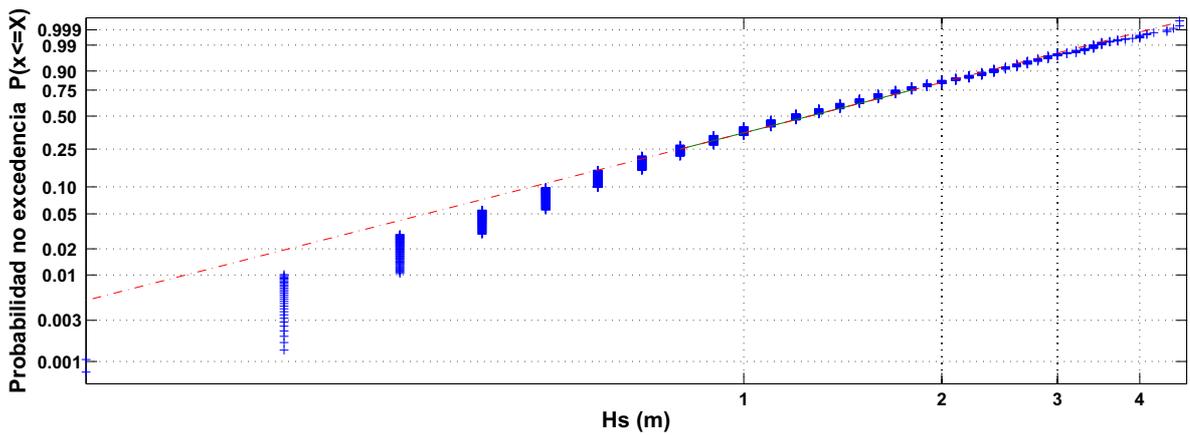


Figura 4.18: Función distribución direccional SE en papel probabilístico normal

4.2.2.4. Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la altura de ola se presenta la siguiente tabla:

REGIMEN MEDIO	ALTURA DE OLA, Hs (m)	
	Prob. No excedencia 50 %	Prob. No excedencia 85 %
Escalar	0.9	1.8
Direccional W	1.1	2.1
Direccional SE	1.25	2.25

Tabla 4.8: Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola.

### 4.2.3. Régimen extremal de $H_s$ en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la altura de ola umbral correspondiente a 3 m, correspondiente al valor que es superado en menos del 1%. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 horas. De esta manera se han obtenido 51 eventos extremales respectivamente, en los 15 años meteorológicos analizados.

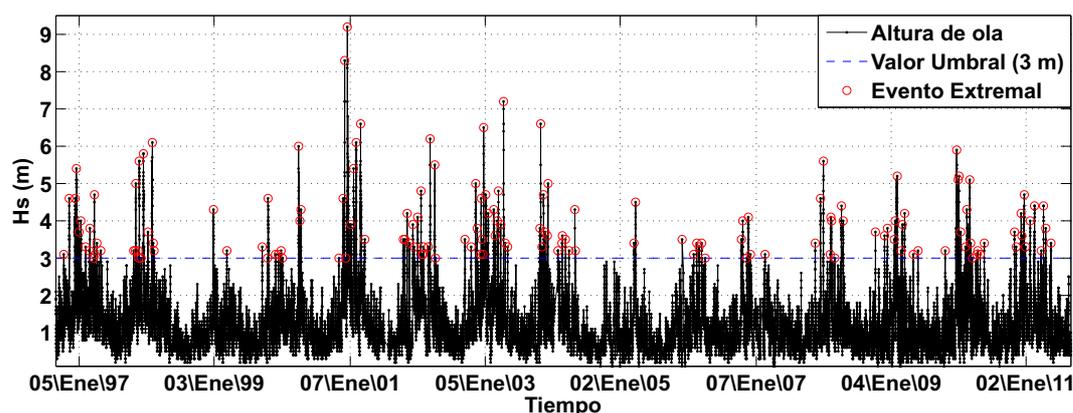


Figura 4.19: Picos de altura de ola sobre umbral con  $H_{su} = 3$  m

Para caracterizar al régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (4.2)$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une a las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y escala,  $\mu$  y  $\sigma$ , y un parámetro de forma,  $k$ . De esta manera, cuando  $k < 0$ , el GEV es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando  $k > 0$ , es equivalente a la de tipo II (Frechet); y en el límite cuando  $k=0$ , se convierte en el tipo I (Gumbel).

4.2.3.1. Régimen extremal escalar

Régimen extremal escalar	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.6039	0.4344	3.3793	Frechet	156

Tabla 4.9: Parámetros de ajuste para régimen extremal escalar

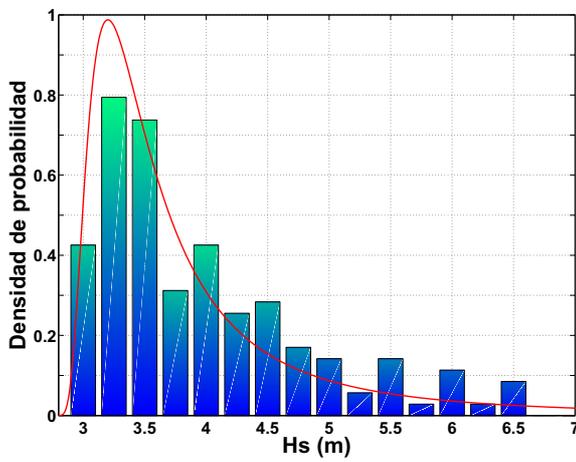


Figura 4.20: Función de densidad escalar

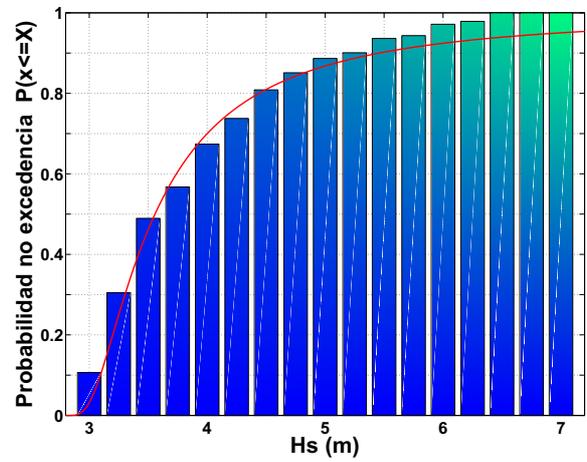


Figura 4.21: Función de distribución escalar

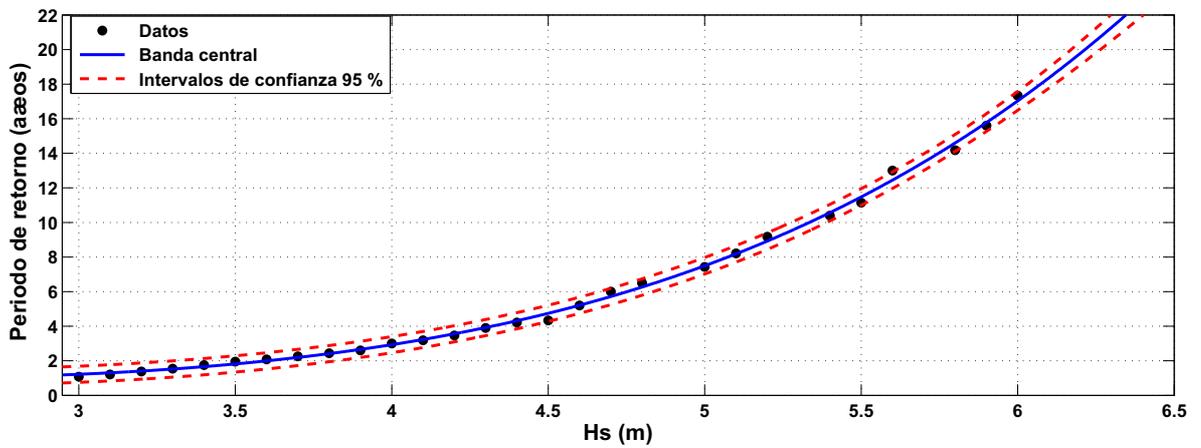


Figura 4.22: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno escalar

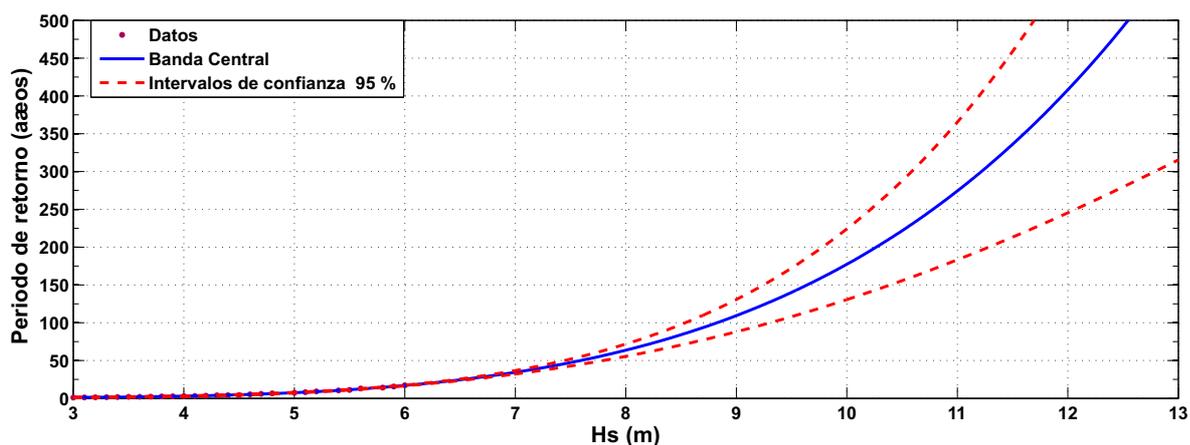


Figura 4.23: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno escalár

#### 4.2.3.2. Resumen de resultados parciales

A partir del gráfico de altura de ola frente a periodo de retorno se muestran en la tabla 4.10 las alturas de ola asociadas a los periodos de retorno 5, 10, 100, 250 y 500 años, tanto para la banda central como para las bandas de confianza del 95%.

Periodo de Retorno (años)	Hs (m)		Hs (m)
	Banda central	Banda Superior	Banda inferior
5	4.7	4.5	4.8
10	5.4	5.3	5.5
100	8.9	8.5	9.3
250	10.8	10.3	12
500	12.5	11.6	>13

Tabla 4.10: Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno.

4.2.3.3. Regimen extremal direccional: W

Régimen extremal direccional: W	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.6895	0.3555	3.2995	Frechet	39

Tabla 4.11: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: W

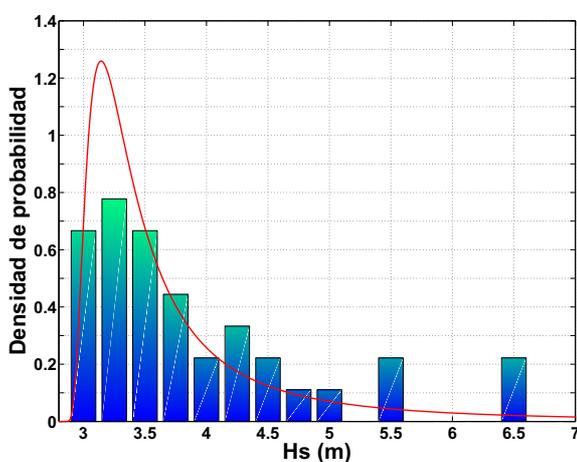


Figura 4.24: Función de densidad direccional:W

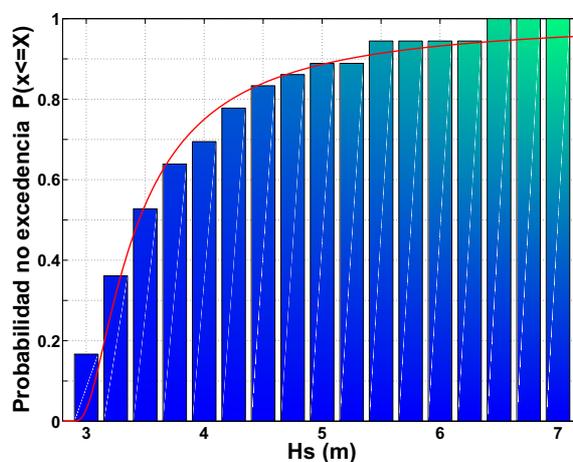


Figura 4.25: Función de distribución direccional:W

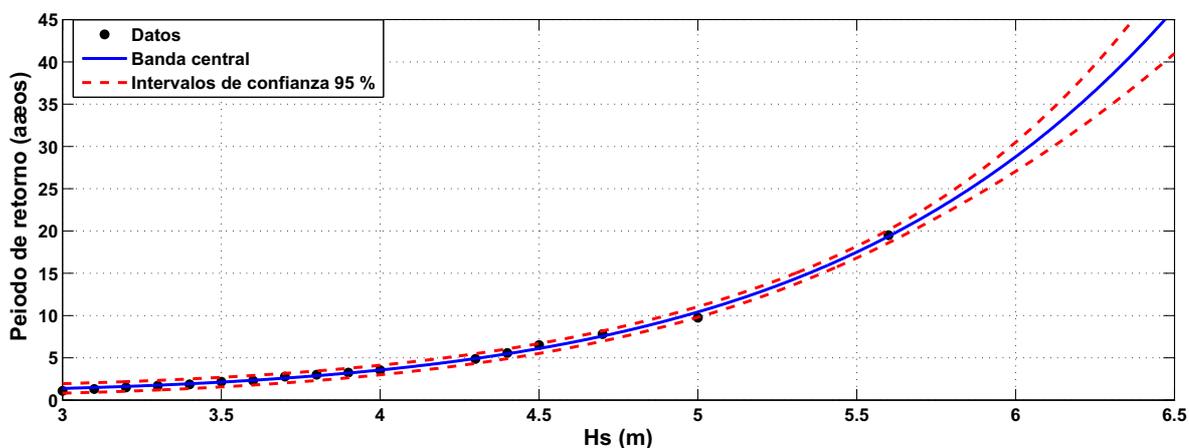


Figura 4.26: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: W

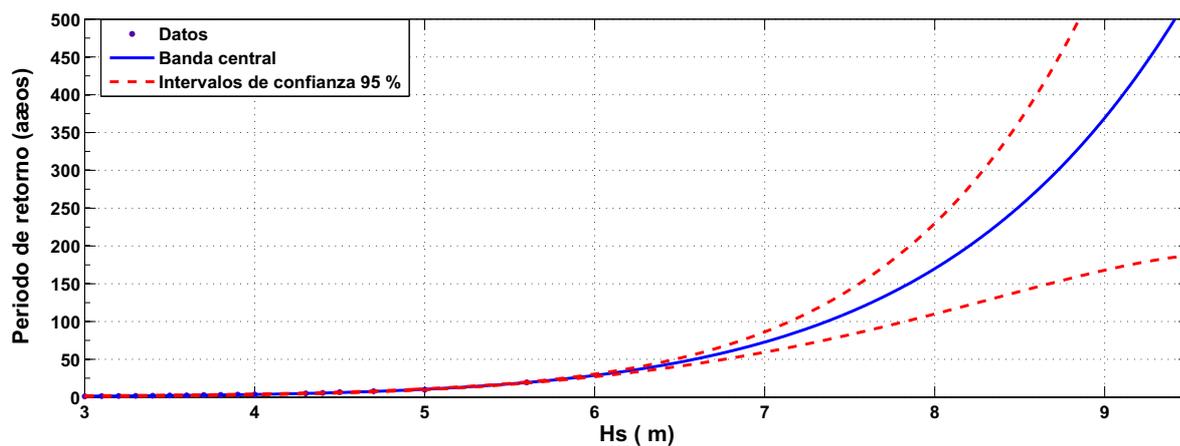


Figura 4.27: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: W

#### 4.2.3.4. Resumen de resultados parciales

A partir del gráfico de altura de ola frente a periodo de retorno se muestran en la tabla 4.12 las alturas de ola asociadas a los periodos de retorno 5, 10, 100, 250 y 500 años. En este caso sólo se representa la banda central ya que por falta de datos, las bandas superior e inferior correspondientes a los intervalos de confianza del 95% no son del todo fiables.

Periodo de Retorno (años)	Hs (m) Banda central
5	4.3
10	5
100	7.3
250	8.5
500	9.5

Tabla 4.12: Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno.

4.2.3.5. Régimen extremal direccional: SE

Régimen extremal direccional: SE	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.1799	0.3841	3.3906	Frechet	16

Tabla 4.13: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: SE.

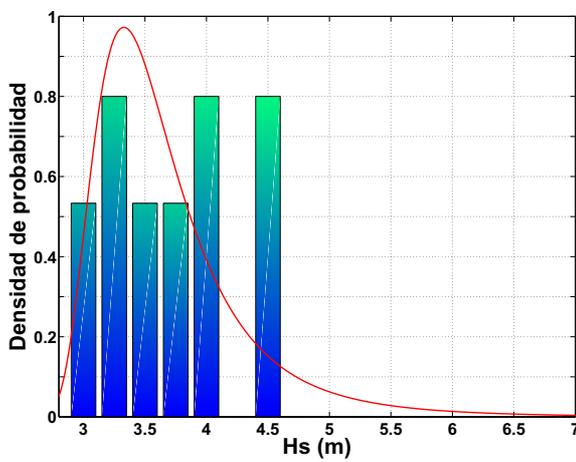


Figura 4.28: Función de densidad direccional:SE

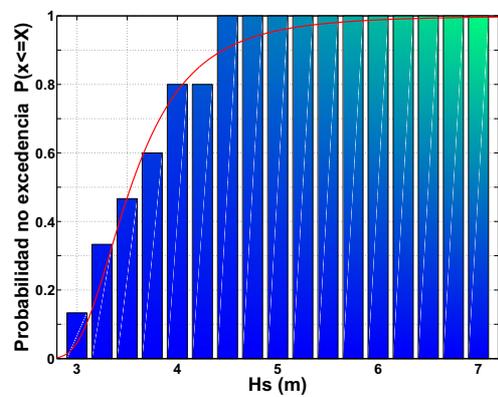


Figura 4.29: Función de distribución direccional:SE

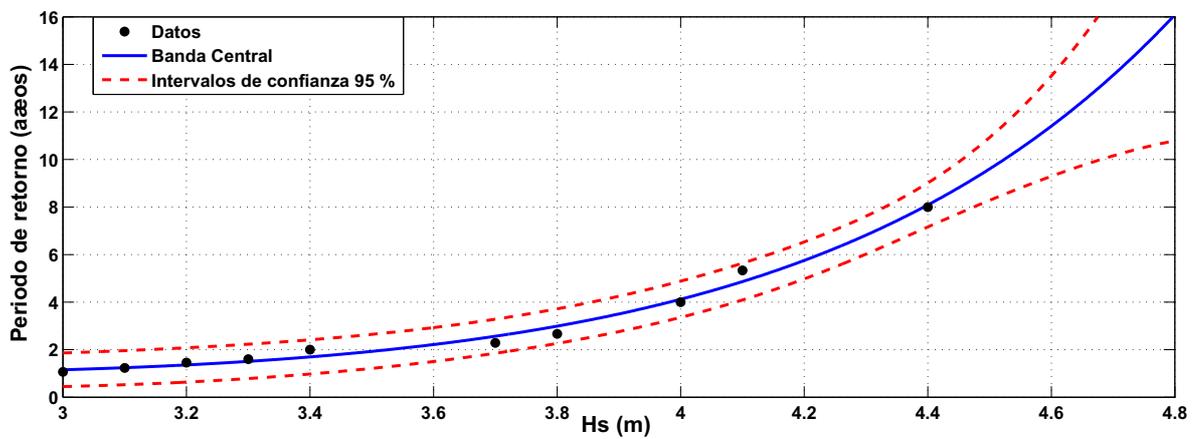


Figura 4.30: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: SE

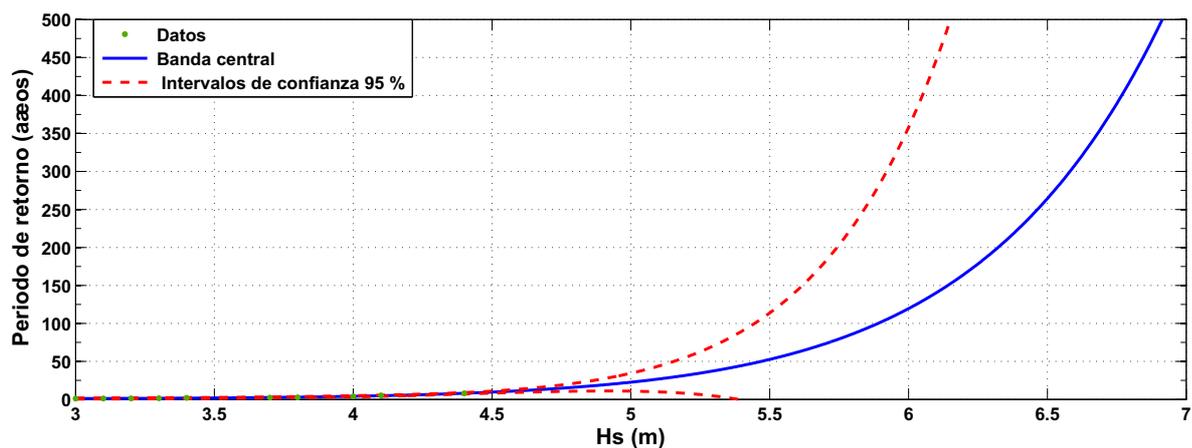


Figura 4.31: Gráfica altura de ola - Periodo de retorno direccional: SE

#### 4.2.3.6. Resumen de resultados parciales

A partir del gráfico de altura de ola frente a periodo de retorno se muestran en la tabla 4.14 las alturas de ola asociadas a los periodos de retorno 5, 10, 100, 250 y 500 años. En este caso sólo se representa la banda central

Periodo de Retorno (años)	Hs (m) Banda central
5	3.8
10	4.5
100	5.8
250	6.4
500	6.8

Tabla 4.14: Altura significativa de ola asociada a los periodos de retorno.

### 4.3. Viento

#### 4.3.1. Descripción general del viento en profundidades indefinidas

En primer lugar se realiza una descripción general de las características del viento en profundidades indefinidas en la zona de estudio, en el que se mostrará:

- Un gráfico de dispersión entre las variables  $V_v$  y  $\theta_v$ .
- Una tabla que representen el diagrama de dispersión de forma numérica.
- Dos histogramas, uno por cada variable:  $V_v$  y  $\theta_v$ .
- Rosa de los vientos.

$V_v$ (m/s)	Fr (%)
[a - b)	
0 - 1	1.46
1 - 2	4.97
2 - 3	8.36
3 - 4	11.24
4 - 5	<b>13.11</b>
5 - 6	<b>13.67</b>
6 - 7	12.08
7 - 8	10.59
8 - 9	7.80
9 - 10	5.77
10 - 11	3.87
11 - 12	2.76
12 - 13	1.69
13 - 14	1.16
14 - 15	0.77
15 - 16	0.31
16 - 17	0.18
17 - 18	0.15
18 - 19	0.05
19 - 20	0.03

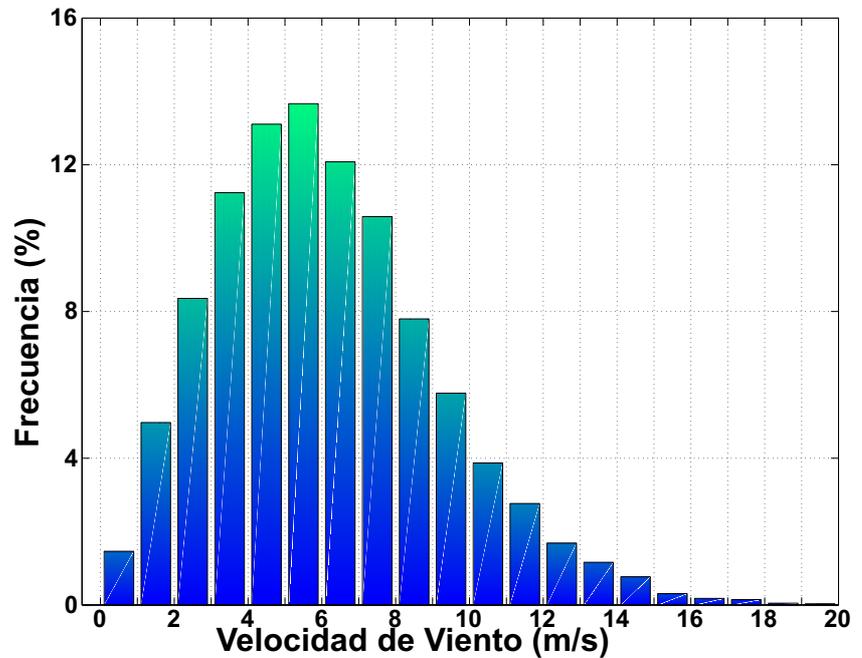


Figura 4.32: Histograma de velocidades de viento

Tabla 4.15: Porcentaje de velocidades de viento

$\theta$ (°)	Fr (%)
N	2.61
NNE	4.29
NE	5.43
ENE	6.36
<b>E</b>	<b>10.01</b>
ESE	7.80
SE	3.40
SSE	2.16
S	2.22
SSW	2.83
SW	4.40
WSW	6.00
<b>W</b>	<b>10.75</b>
WNW	<b>10.62</b>
NW	9.67
NNW	8.21

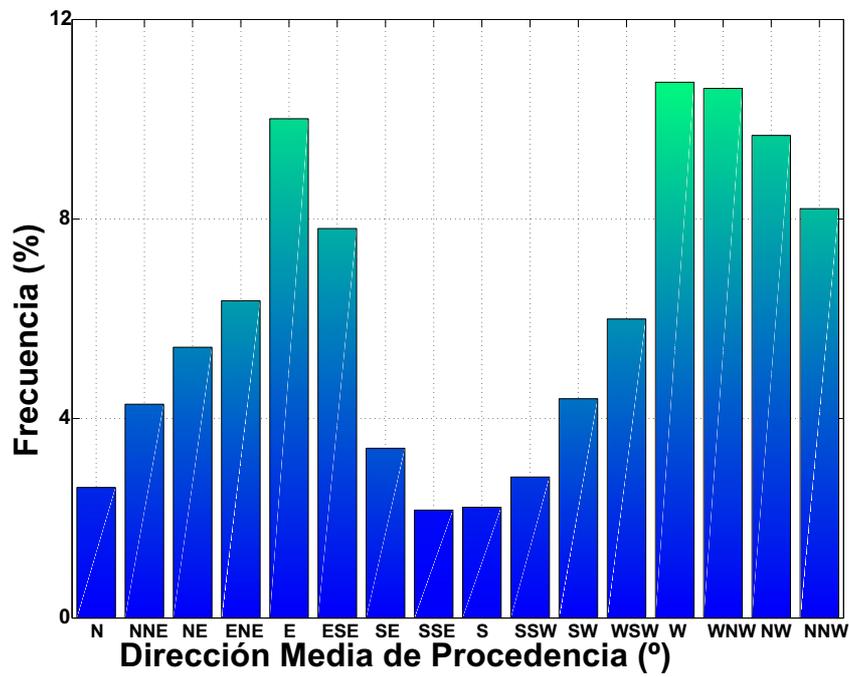


Tabla 4.16: Porcentaje de direcciones medias de procedencia

Figura 4.33: Histograma de direcciones medias de procedencia

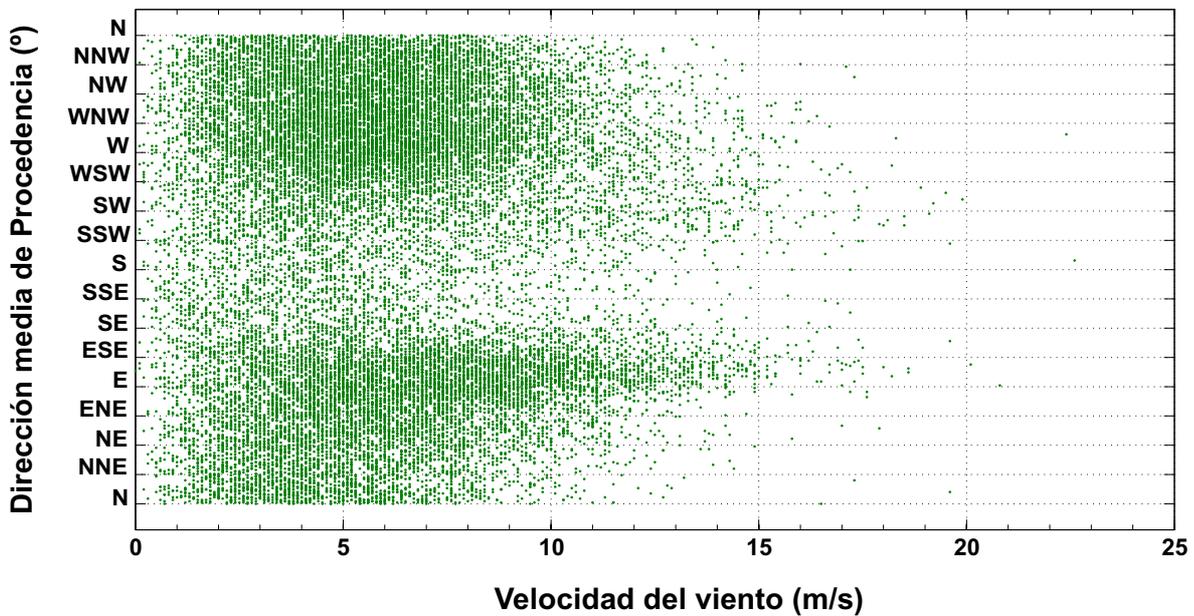


Figura 4.34: Gráfico de dispersión  $V_v - \theta_v$

VELOCIDAD VIENTO - DIRECCIÓN MEDIA DE PROCEDENCIA																	
Vv (m/s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	TOTAL
	Dirección media de procedencia (°)																
<b>0</b>	0.108	0.080	0.071	0.116	0.069	0.082	0.110	0.088	0.054	0.110	0.099	0.086	0.140	0.095	0.067	0.062	1.44
<b>1</b>	0.334	0.342	0.301	0.295	0.308	0.303	0.159	0.185	0.228	0.245	0.265	0.482	0.433	0.390	0.325	0.224	4.82
<b>2</b>	0.536	0.598	0.529	0.501	0.413	0.269	0.248	0.254	0.357	0.370	0.555	0.803	0.697	0.826	0.749	0.357	8.06
<b>3</b>	0.768	0.764	0.710	0.704	0.439	0.260	0.295	0.273	0.433	0.527	0.872	1.205	1.068	1.130	0.949	0.443	10.84
<b>4</b>	0.693	0.818	0.999	0.971	0.519	0.323	0.269	0.334	0.418	0.637	1.070	1.653	1.390	1.246	1.003	0.409	12.75
<b>5</b>	0.553	0.773	1.055	1.055	0.540	0.310	0.245	0.265	0.267	0.626	1.429	1.905	1.522	1.384	0.936	0.426	13.29
<b>6</b>	0.512	0.818	0.919	1.048	0.441	0.293	0.174	0.207	0.295	0.512	1.085	1.653	1.309	1.298	1.025	0.308	11.90
<b>7</b>	0.484	0.678	1.005	1.124	0.519	0.181	0.161	0.237	0.286	0.454	0.809	1.362	1.022	1.070	0.824	0.226	10.44
<b>8</b>	0.256	0.385	0.777	1.074	0.422	0.131	0.090	0.170	0.248	0.338	0.611	0.947	0.777	0.749	0.588	0.140	7.70
<b>9</b>	0.155	0.325	0.573	0.958	0.387	0.108	0.082	0.136	0.248	0.303	0.362	0.611	0.557	0.568	0.291	0.026	5.69
<b>10</b>	0.077	0.207	0.402	0.826	0.316	0.101	0.065	0.099	0.179	0.189	0.237	0.329	0.319	0.327	0.131	0.032	3.84
<b>11</b>	0.054	0.146	0.280	0.529	0.250	0.073	0.065	0.090	0.179	0.217	0.226	0.220	0.185	0.121	0.103	0.017	2.75
<b>12</b>	0.024	0.037	0.155	0.379	0.174	0.065	0.034	0.039	0.149	0.129	0.136	0.172	0.062	0.075	0.037	0.009	1.67
<b>13</b>	0.009	0.032	0.054	0.325	0.108	0.017	0.011	0.043	0.129	0.149	0.077	0.084	0.058	0.045	0.017	0	1.16
<b>14</b>	0.011	0.006	0.043	0.174	0.082	0.022	0.013	0.022	0.067	0.129	0.067	0.056	0.052	0.017	0.009	0	0.77
<b>15</b>	0	0.004	0.004	0.056	0.039	0.004	0.004	0.019	0.039	0.030	0.034	0.043	0.030	0	0	0	0.31
<b>16</b>	0	0	0	0.047	0.017	0.017	0	0.004	0.030	0.013	0.017	0.004	0.017	0	0.004	0	0.17
<b>17</b>	0	0.009	0.013	0.043	0.009	0.004	0	0.017	0.013	0.017	0.009	0	0	0	0	0	0.14
<b>18</b>	0	0	0	0.017	0	0	0	0	0.017	0.004	0.004	0.004	0	0	0	0	0.05
<b>19</b>	0	0	0	0	0.004	0	0	0.004	0.004	0.013	0	0	0	0	0	0.004	0.03
<b>20</b>	0	0	0	0.009	0	0	0	0.004	0	0	0	0.004	0	0	0	0	0.02
<b>TOTAL</b>	4.574	6.022	7.890	10.252	5.056	2.563	2.025	2.490	3.637	5.015	7.964	11.625	9.638	9.350	7.058	2.684	

Tabla 4.17: Periodo Pico - Dirección media de procedencia

Se representa a continuación la rosa de los vientos de los datos del punto WANA.

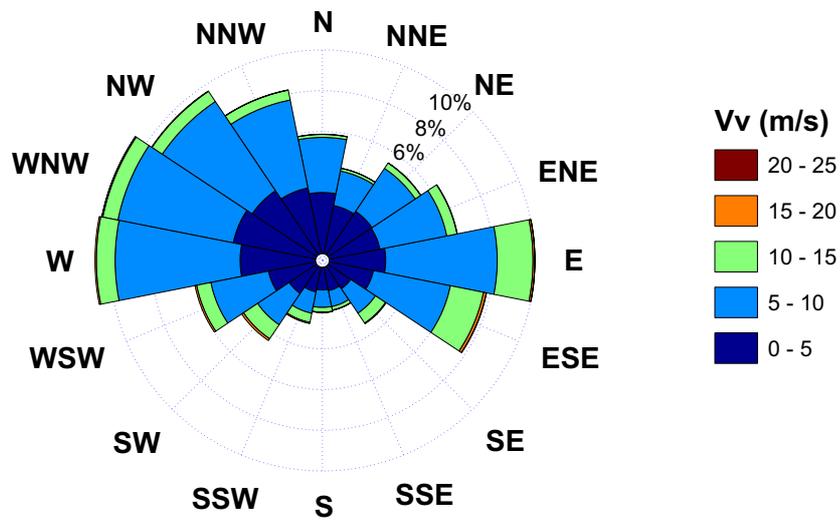


Figura 4.35: Rosa de Oleaje

#### 4.3.1.1. Resumen de resultados parciales

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 20 m/s
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 4-6 m/s
- Las direcciones de viento más frecuentes son: W y E.

**4.3.2. Régimen medio anual de  $V_v$  en profundidades indefinidas.**

Se obtiene el régimen medio anual de velocidades de viento en profundidades indefinidas considerando todas las direcciones. Después se calcula de nuevo el régimen medio, pero únicamente para las dos direcciones predominantes de procedencia del viento: W y E.

Todos los regímenes medios de velocidad de viento se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} I_{(0,\infty)}(x) \tag{4.3}$$

En la tabla 4.18 se muestran los parámetros de ajuste de los regímenes medios direccionales y escalar de velocidades de viento obtenidos según la distribución de Weibull.

	a	b
<b>Escalar</b>	6.8744	2.1038
<b>Dirección W</b>	6.9174	2.3384
<b>Dirección E</b>	7.9853	2.3724

Tabla 4.18: Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio

Las figuras siguientes se organizan en tres bloques, cada bloque corresponde con un régimen medio distinto: el escalar y los dos direccionales (W y E). Dentro de cada bloque se pueden diferenciar a su vez tres figuras, en la primera se representa el histograma de frecuencias (datos reales) junto con la función de densidad de los datos ajustados según una distribución de Weibull (datos empíricos), esta gráfica permite saber la probabilidad de ocurrencia de cada velocidad de viento. En la segunda figura se encuentra representado el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución que indica la probabilidad de no excedencia de cada velocidad de viento, es decir, la probabilidad de que dicha velocidad de viento no sea superada.

4.3.2.1. Régimen medio escalar

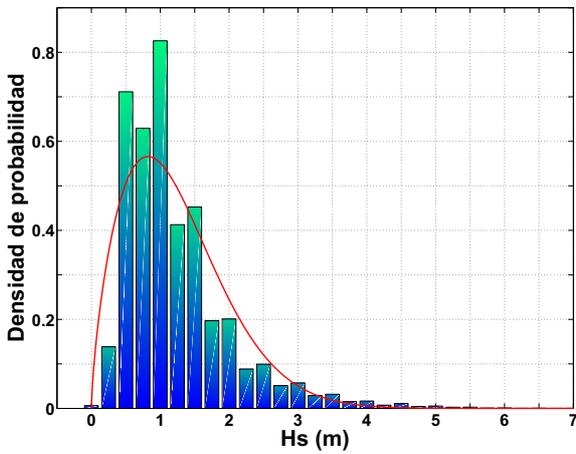


Figura 4.36: Función de densidad escalar.  $V_v$

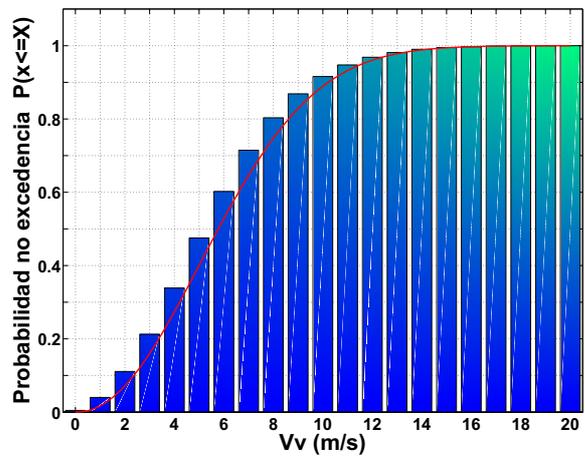


Figura 4.37: Función de distribución escalar.  $V_v$

4.3.2.2. Régimen medio direccional W

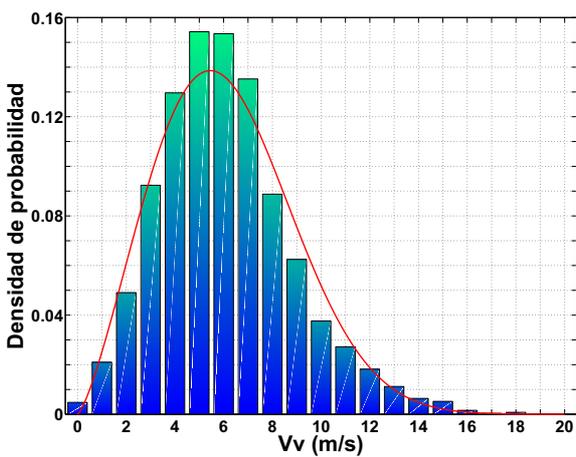


Figura 4.38: Función de densidad direccional:  $W V_v$

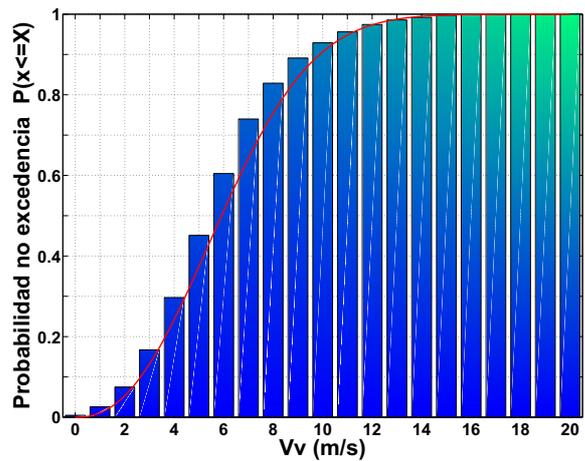


Figura 4.39: Función de distribución direccional:  $W V_v$

4.3.2.3. Régimen medio direccional E

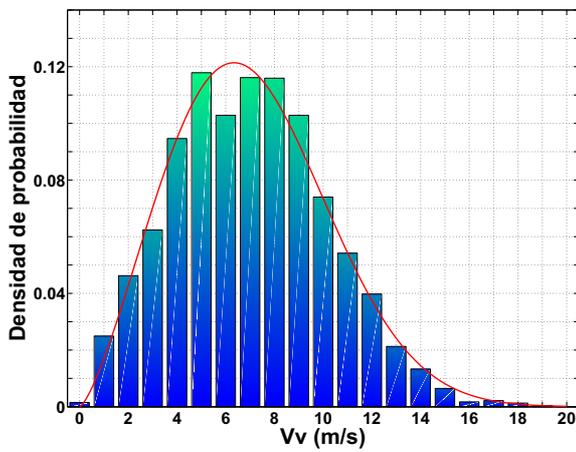


Figura 4.40: Función de densidad direccional: E Vv

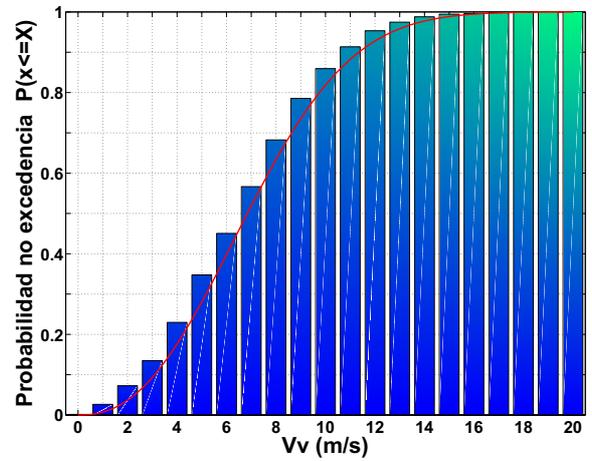


Figura 4.41: Función de distribución direccional: E Vv

4.3.2.4. Resumen de resultados parciales

Como resumen del régimen medio para la velocidad del viento se presenta la siguiente tabla:

REGIMEN MEDIO	Velocidad Viento, Vv (m/s)	
	Prob. No excedencia 50 %	Prob. No excedencia 85 %
Escalar	6	9
Direccional W	6	9
Direccional E	7	11

Tabla 4.19: Valores de velocidad del viento para el régimen medio.

### 4.3.3. Régimen extremal de $V_v$ en profundidades indefinidas

Para la obtención del régimen extremal se ha usado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Para ello se ha fijado la altura de ola umbral correspondiente a 12 m/s, correspondiente al valor que es superado en menos del 1%. Para garantizar la independencia estadística entre temporales, se ha supuesto que la duración mínima entre temporales debe ser superior a 48 horas. De esta manera se han obtenido 51 eventos extremales respectivamente, en los 15 años meteorológicos analizados.

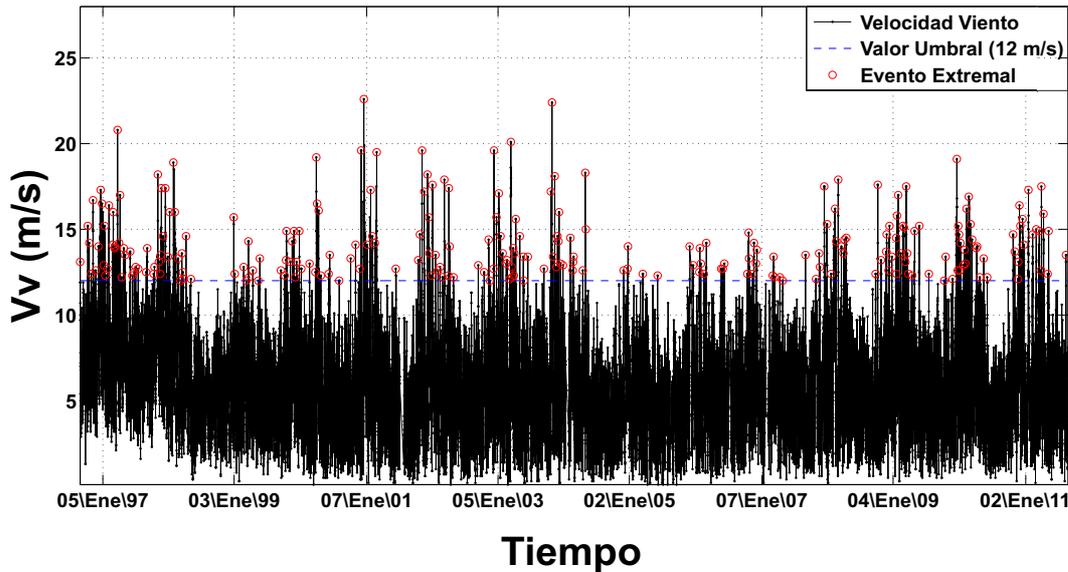


Figura 4.42: Picos de altura de ola sobre umbral con  $H_{su} = 3$  m

Para caracterizar al régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (4.4)$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une a las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y escala,  $\mu$  y  $\sigma$ , y un parámetro de forma,  $k$ . De esta manera, cuando  $k < 0$ , el GEV es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando  $k > 0$ , es equivalente a la de tipo II (Frechet); y en el límite cuando  $k = 0$ , se convierte en el tipo I (Gumbel).

4.3.3.1. Régimen extremal escalar

Régimen extremal escalar	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.4395	1.0464	13.0438	Frechet	254

Tabla 4.20: Parámetros de ajuste para régimen escalar

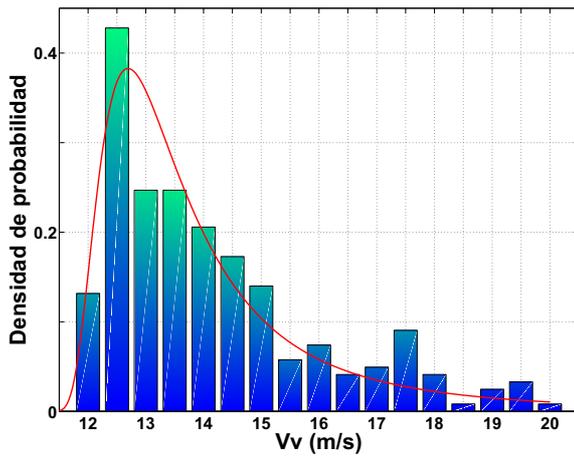


Figura 4.43: Función de densidad escalar  $V_v$

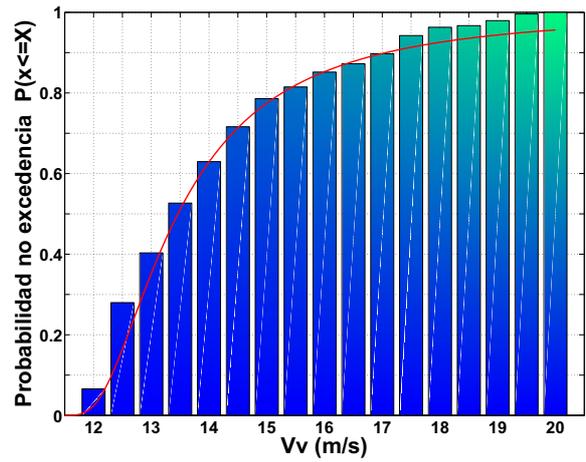


Figura 4.44: Función de distribución escalar  $V_v$

4.3.3.2. Régimen extremal direccional: W

Régimen extremal direccional: W	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.7335	0.8807	12.6707	Frechet	14

Tabla 4.21: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: W

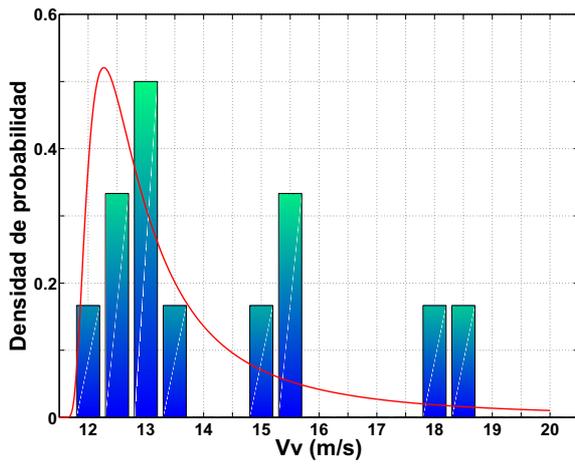


Figura 4.45: Función de densidad direccional:W Vv

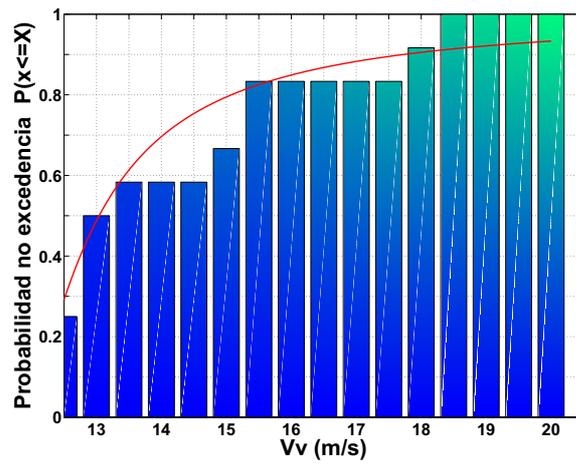


Figura 4.46: Función de distribución direccional:W Vv

4.3.3.3. Régimen extremal direccional: E

Régimen extremal direccional: E	$k$	$\sigma$	$\mu$	Distribución Equivalente	Número de eventos
	0.4018	1.0965	13.0835	Frechet	46

Tabla 4.22: Parámetros de ajuste para régimen extremal direccional: E

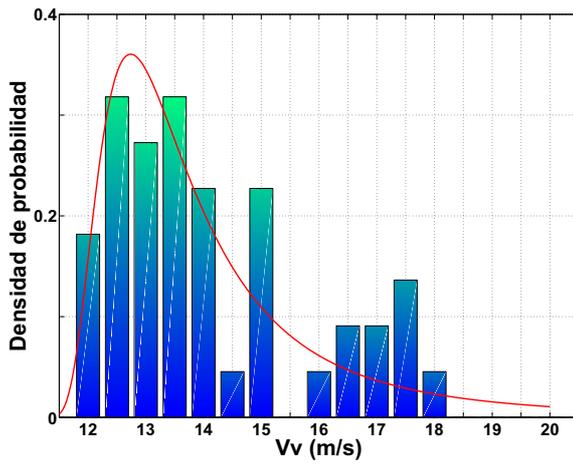


Figura 4.47: Función de densidad direccional: E Vv

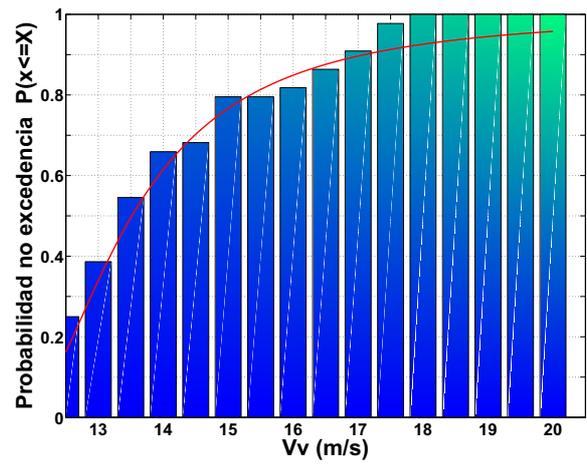


Figura 4.48: Función de distribución direccional: E Vv



## Capítulo 5

# Campaña de campo de larga duración

Para la calibración del modelo numérico es necesario disponer de datos de altura de ola, periodo y dirección medidos en determinados puntos de la Bahía para poder comparar con los resultados de las simulaciones realizadas. Se fondearon en puntos específicos de la Bahía una serie de instrumentos que midieron el tiempo que duró la campaña de campo.

### 5.1. Diseño de la campaña de campo

#### 5.1.1. Fechas y duración de la campaña

Esta campaña de campo se denomina de larga duración debido a que los instrumentos miden durante 3-4 meses. Desde Noviembre de 2011 hasta Abril de 2012.

#### 5.1.2. Instrumentación

La instrumentación que se instaló para la realización de la campaña se describe a continuación:

- **Perfilador de corriente (ADCP):** instrumento que mide las tres componentes de la velocidad del flujo en toda la columna de agua empleando para ello celdas de medida. Además, el instrumento incorpora sensores puntuales de presión y temperatura.
- **Perfilador de corriente con módulo de oleaje (AWAC):** instrumento que mide las tres componentes de la velocidad del flujo en toda la columna de agua empleando para ello celdas de medida. Incluye el módulo AST (Acoustic Surface Tracking) para el seguimiento de la superficie libre. Además, el instrumento incorpora sensores puntuales de presión y temperatura.
- **Mareógrafos:** disponen de sensor de presión a partir del cual se caracteriza la evolución temporal de la superficie libre en el punto de medida.
- **CTD:** sensor de conductividad y temperatura para medir la calidad del agua.
- **OBS:** sensor que mide turbidez.

### 5.1.3. Ubicación

Teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen en el proyecto, así como la instrumentación disponible, se propone la ubicación de la instrumentación que se muestra en la figura 5.2.

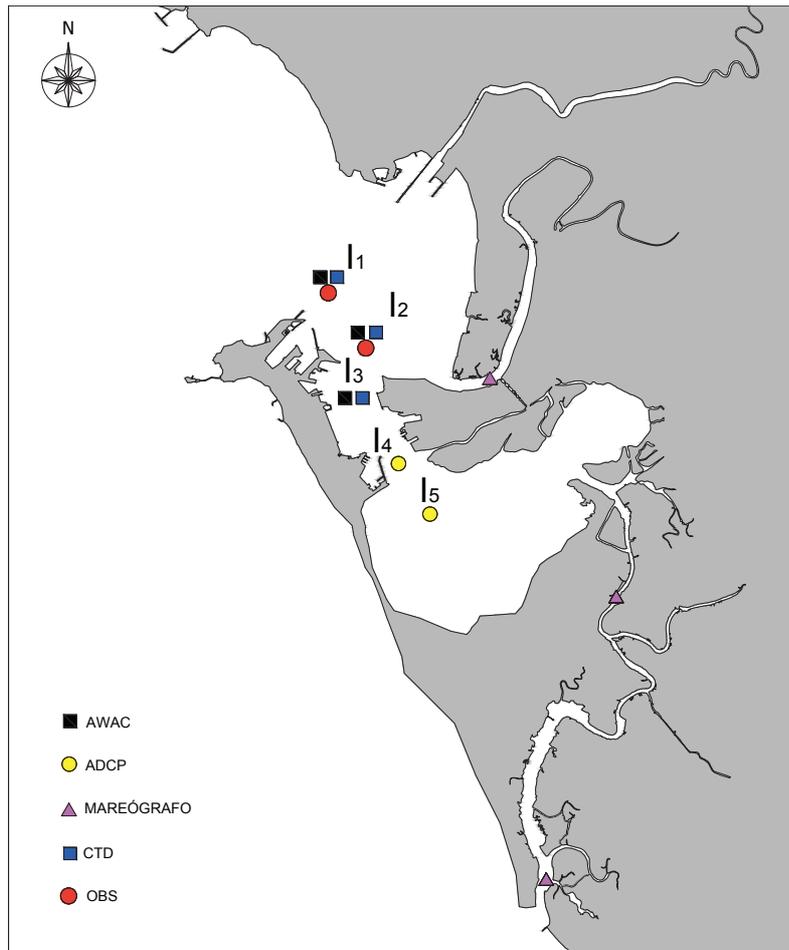


Figura 5.1: Mapa de la colocación de los instrumentos fondeados.

Se propone la instalación de 5 perfiladores de corriente (ADCP y AWAC) que permitan caracterizar la evolución tanto de corriente como de niveles dentro de los sacos exterior e interior de la Bahía, así como evaluar las transferencias entre ambos. Los instrumentos AWAC se posicionarán en el saco exterior, al ser mayor en él la influencia del oleaje. También se fondearán 3 CTD y 2 OBS para medir la calidad del agua: temperatura y turbidez. Finalmente, se instalarán 3 mareógrafos que permitan estudiar la propagación de la onda.

## 5. Campaña de campo de larga duración

---

### 5.1.4. Sistema de instalación y/o fondeo

Para la instalación de los instrumentos se plantea el fondeo bien mediante trípodes o bien mediante cubos de hormigón. Se fondean tres muertos denominados desde  $I_1$  hasta  $I_5$ .

Los aparatos colocados en cada muerto son:

Nombre del equipo	Posición de fondeo	Profundidad aproximada a la que estará el equipo fondeado	Intrumentos fondeados
$I_1$	X = 744.263 Y = 4.048.429 (Saco externo)	10 m	ADCP 2 Mhz CTD OBS
$I_2$	X = 745.295 Y = 4.045.302 (Saco central)	13 m	AWAC CTD OBS
$I_3$	X = 745.149 Y = 4.046.779 (Sector central)	11 m	ADCP 1 Mhz CTD
$I_4$	X = 745.584 Y = 4.043.615 (Sector Central)	8 m	ADCP 2 Mhz
$I_5$	N 36° 29' 59.2 '' W 06° 14' 48.8''	6 m	ADCP 2 Mhz

Tabla 5.1: Posición, profundidad y equipos fondeados en la campaña de campo.

### 5.1.5. Descripción de equipo

- **AWAC 1 Mhz:** Correntímetro Perfilador Nortek modelo AWAC (1MHz) apto para perfilar un mínimo de 30m. Incluye 150MB de memoria, sensor de temperatura, brújula y sensor de actitud de dos ejes, sensor de presión (0-50m), sensor de turbidez OBS, cilindro portabaterías sencillo con baterías de litio, salida RS232 y Software de configuración y control bajo Windows AST capaz de medir oleaje a una profundidad de 40m. Incluye cardan, juego de herramientas y repuesto básico y caja de transporte profesional.
- **ADCP 1Mhz:** Correntímetro Perfilador Nortek modelo Aquadopp Profiler (2MHz) apto para una profundidad total de 200m para medir columnas de agua de entre 4 y 10 m. Incluye 80MB de memoria y baterías de Litio, sensor de litio, sensor de temperatura, brújula y sensor de actitud de dos ejes, sensor de presión (0-200m), sensor de turbidez OBS, salida RS232 y sensor de mareas Valeport Midas Mod 740; y cable en Y para

interconectar dos sensores con el instrumento Nortek. Software de configuración, control y postproceso Windows . Incluye juego de herramientas y repuesto básico y caja de transporte profesional.

- **ADCP 2 Mhz:** Correntímetro Perfilador marca Nortek modelo Aquadopp Profiler (2 MHz) con cabezal en ángulo recto apto para una profundidad superior a 200 metros para medir columnas en modo HR de entre 1-2 m (4-10 m en modo estándar) dependiendo de la calidad del agua y resolución vertical de 1-3 cm (30 cm). Incluye 176 MB de memoria, baterías de litio, sensor de temperatura, brújula y sensor de actitud de dos ejes, sensor de presión (0-10 metros) salida RS232; Software de configuración y control (AquaPro) y firmware de adquisición de datos procesamiento a alta resolución espacial HR (y estándar) bajo Windows. Incluye juego de herramientas y repuesto básicos, caja de transporte profesional.
- **OBS-3:** Equipo para medir sólidos en suspensión. El OBS-3 puede medir en un rango de 0 a 2,500 mg/l con sedimentos finos (lodos) y de 0 a 50 g/l con arenas. La razón máxima de muestreo del OBS-3 es de 10 Hz. El registro digital de los datos del OBS-3 se realizó conectando dicho instrumento a un puerto libre del equipo ADCP.
- **CTD:** Equipos que miden las características del agua tales como la salinidad, temperatura y presión profundidad. Los instrumentos CT se utilizan "in situ", donde, de hecho, se colocan los instrumentos dentro del agua que está midiendo. A medida que el instrumento CT se sumerge en el agua, (o a medida que permanece en un punto determinado), las mediciones de conductividad, temperatura y profundidad son registradas de manera continua. La adquisición de un perfil de CT alcanza hasta 24 Hz; esto significa que, cada parámetro podría ser medido hasta 24 veces por segundo. Esto ofrece una descripción de resolución muy elevada del agua que está siendo examinada.

## 5. Campaña de campo de larga duración

### 5.1.6. Resultados de la campaña de campo.

De la campaña de campo, los resultados que pueden se extraen son:

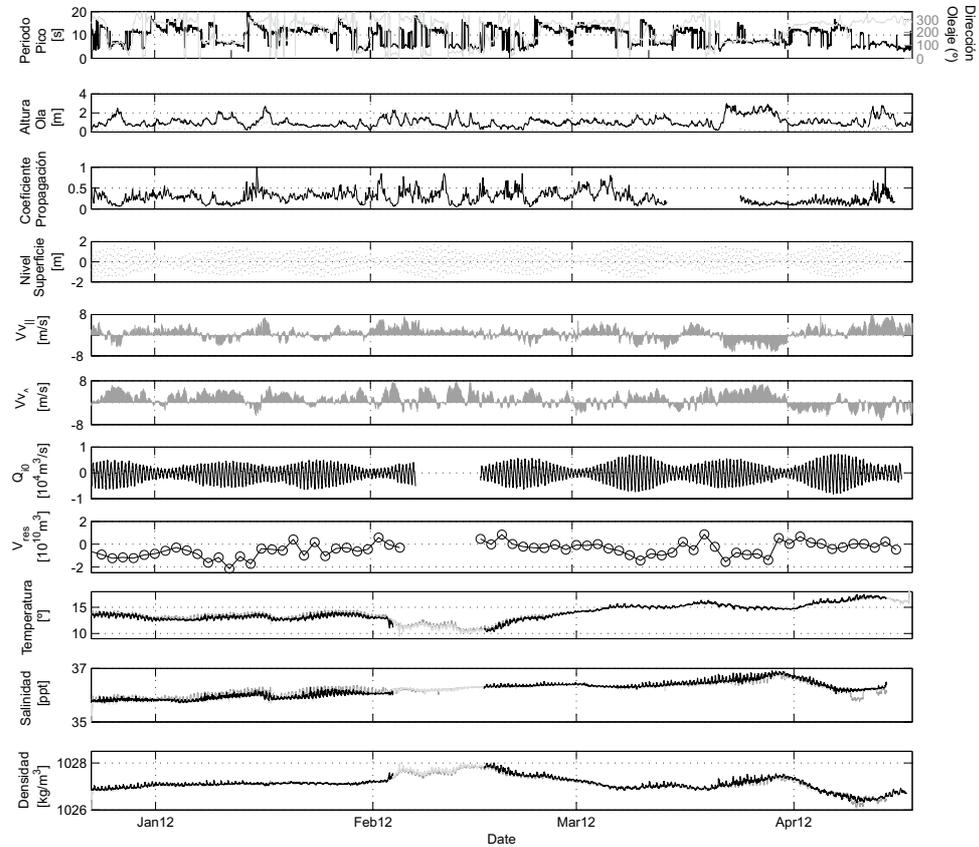


Figura 5.2: Panel 1: Línea negra periodo pico y línea gris dirección de oleaje. Panel 2: Línea negra altura de ola y puntos altura de ola (I1). Panel 3: Coeficiente de propagación. Panel 4: Superficie libre (I1, I3). Panel 5 y 6: Velocidad de viento paralela y normal al eje del canal (Boya 2342). Panel 7: Caudal transportado (I3). Panel 8: Volumen residual (I3). Panel 9,10 y 11: Temperatura, salinidad y densidad (I1,I2 y I3)

---

## 5. Campaña de campo de larga duración

- Las carreras de marea oscilan entre 4 m en mareas vivas y 1 m en mareas muertas.
- Las mayores mareas se dan en el estrecho de puntales y de ahí se propagan al resto del saco interno.
- Las componentes armónicas más importantes son las semidiurnas (orden de metros) y las diurnas (orden de centímetros).
- Las corrientes de marea son mayores en el estrecho de puntales con respecto al saco exterior e interior. Las corrientes de marea del saco interior y exterior son del mismo orden de magnitud. En el estrecho de puntales se alcanzan unas corrientes medias de 0.36 m/s y máximas de 0.87 m/s. En los sacos interno y externo se alcanzan unas velocidades medias de 0.24 m/s y 0.26 m/s.
- Todas las direcciones de propagación de las corrientes siguen el eje del canal central desviado del Norte unos 30° antihorarios exceptuando el instrumento  $I_4$ , dónde la desviación es de 70° y se cree que es debido a la proximidad del puerto de Zona Franca por la izquierda y a la proximidad de un caño por la derecha.
- La altura de ola máxima medida durante la campaña fue de 2 m.
- Los vientos predominantes son los procedentes del NW y SE con velocidades medias de 6-7 m/s.
- Los vientos del NW originan alturas de ola en  $I_1$  de 2 m y 0.4 m en el resto.
- En el 92% de los casos el coeficiente de propagación  $C_p$  es menor de 0.5. Esto muestra que hay una fuerte reducción después de la entrada a la Bahía.  
  
Y en el 8% restante de los casos es mayor que 0.5 asociado siempre a olas del NW.
- Los periodos pico son cortos, menores de 6 s.

## Capítulo 6

# Modelo numérico I: Aplicación, calibración y validación

### 6.1. Características del modelo

El modelo numérico que se utilizó para el análisis de la influencia de la nueva terminal y el dragado sobre la hidrodinámica de la Bahía es el Delft3D.

De todos los programas comerciales disponibles para las simulaciones de oleaje se ha utilizado el modelo Delft3D ya que es el que mejor se adapta a las necesidades exigidas, entre ellas: la necesidad de un código que trabaje tanto en aguas profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa; que tenga en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y el hecho de que sea un software libre con multitud de manuales y guías disponibles hacen de este modelo el más idóneo.

El modelo Delft3D fue desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países Bajos) para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, . . . generados por vientos locales y corrientes ambientales. Es una extensión de los modelos de tercera generación de aguas profundas para aguas someras.

Dicho programa engloba varios módulos, en este proyecto se utilizan de manera conjunta y sincronizada el módulo WAVE y FLOW lo que dota a las simulaciones de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos.

#### 6.1.1. Módulo WAVE

El módulo WAVE del Delft3D se basa en el modelo numérico SWAN (Simulation Waves Nearshore). En SWAN el oleaje es descrito mediante el espectro bidimensional de densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$ . Por tanto la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción,  $N(\theta, \sigma)$  a partir de condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría, siendo  $\theta$  la frecuencia y  $\sigma$  la dirección de propagación. Esto es debido a que en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no ([Whitham, 1974](#)).

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa  $N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ .

En su forma general, esta ecuación de conservación de la acción se presenta :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (6.1)$$

(Hasselmann and T.P. Barnett, 1973)

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$  en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $c_\sigma$  al velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $c_\theta$  en el espacio  $\theta$ ).

El término de la derecha ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (6.2)$$

- $S_{in}$ : Transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- $S_{nl}$ : Interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$ : Disipación de energía en aguas profundas debidas al White-capping.
- $S_{ds,br}$ : Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$ : Disipación de energía por fricción con el fondo.

La formulación detallada de las ecuaciones del modelo, se encuentra en los **Apéndices F y G: Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN y FLOW**.

### 6.1.2. Módulo FLOW

El módulo Delft3D-FLOW proporciona la base hidrodinámica al resto de módulos del programas, en concreto al WAVE. Permite simular el flujo y el transporte en aguas someras resultado de las mareas y/o forzamiento meteorológico teniendo en cuenta los siguientes procesos físicos:

- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Efecto coriolis por la rotación de la tierra.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de marea en contornos abiertos.

- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

El Delft3D-FLOW resuelve el sistema de ecuaciones formado por: La ecuación de la continuidad (conservación de masa), las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación del transporte y el problema de cierre turbulento.

### 6.2. Datos de entrada

#### 6.2.1. Línea de costa

La línea de costa se crea mediante Autocad usando la herramienta polilínea y se exportan las coordenadas xyz de cada punto para importarlas en el Delf3D. El resultado se ve en la figura 6.1.

#### 6.2.2. Malla

La malla es la discretización del dominio físico para la propagación del oleaje y modelado hidrodinámico. El diseño de la malla es un proceso que debe basarse en la experiencia y en el ensayo-error.

Los criterios empleados para la definición de la malla fueron:

- Asegurar un buen anidamiento de las mallas, evitando que se inunden zonas de tierra seca.
- Evitar vértices que concentren mucha energía y que puedan impedir una buena propagación del oleaje.
- Orientar la malla correctamente para que abarque el oleaje predominante.

Finalmente se definieron dos mallas: una exterior y otra interior más pequeña anidada dentro de la anterior para dar mayor precisión a la zona más cercana a la Bahía.

En la figura 6.1 se observan las dos mallas anidadas junto con la línea de costa.

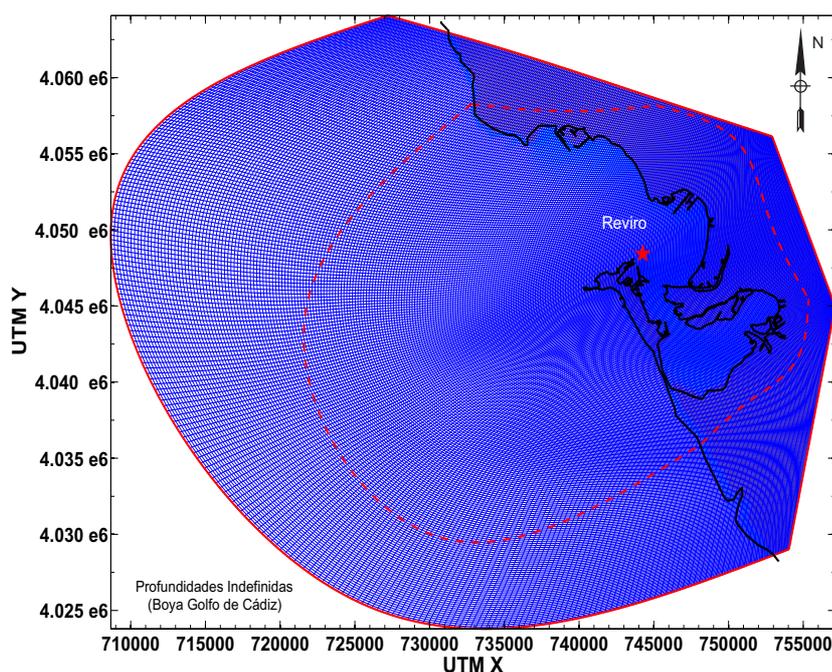


Figura 6.1: Definición de la línea de costa junto con las dos mallas anidadas.

### Malla exterior

Esta malla cubre la zona de profundidades reducidas (sacos interno y externo de la Bahía de Cádiz) como las zonas más profundas.

Se compone de cuatro contornos, tres de ellas están en la zona de tierra y la cuarta abarca todo el oleaje procedente de las direcciones Norte, Oeste y Sur con direcciones de procedencia comprendidas entre  $150^{\circ}$  y los  $360^{\circ}$  ( $0^{\circ} = N$ ). La longitud de este cuarto contorno es de 86,36 Km. Desde el punto de vista de las profundidades, la mayor que se alcanza es de 100 metros en la zona más alejada de la costa.

En cuanto a la resolución de la malla hay que diferenciar entre la zona de profundidades indefinidas donde la resolución de la malla es de  $200 \times 200$  m mientras que en la zona interior de la Bahía (aguas más someras) la resolución pasa a ser  $65 \times 200$  m.

### Malla interior

La malla interior también cuenta con dos tamaños de celda, en la zona mas alejada de la costa tiene un tamaño de celda de  $220 \times 150$  m y en la zona de la Bahía pasa a  $100 \times 100$  m.

### 6.2.3. Batimetría

Para asignarle a cada punto de la malla un valor de profundidad se ha usado la batimetría de:

- Batimetría facilitada por la Autoridad Portuaria del Puerto de Cádiz junto con datos

## 6. Modelo numérico I: Aplicación, calibración y validación

---

de batimetría procedentes de campañas de campo realizadas (río Guadalete, desembocadura del río San Pedro, etc.)

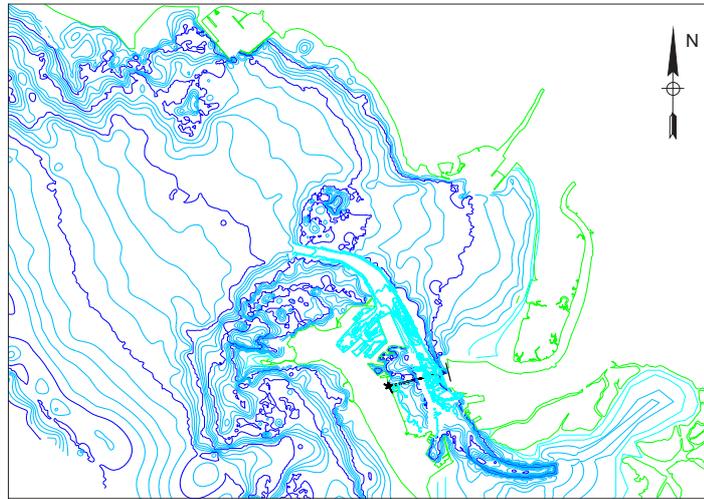


Figura 6.2: Batimetría facilitada por el Puerto de Cádiz.

- Batimetría dibujada a partir de cartas náuticas del Golfo de Cádiz, para cubrir aquellas zonas que faltaban en aguas profundas.

Las cartas náuticas empleadas son: Instituto Hidrográfico de la marina (44, 443A y 443B) y la del Puerto de Cádiz de la marina de los estados unidos. En las figuras 6.3 y 6.4 se muestran la 443B y la del Puerto de Cádiz de la marina de los estados unidos.



Figura 6.3: Carta náutica 443B del Instituto Hidrográfico de la marina

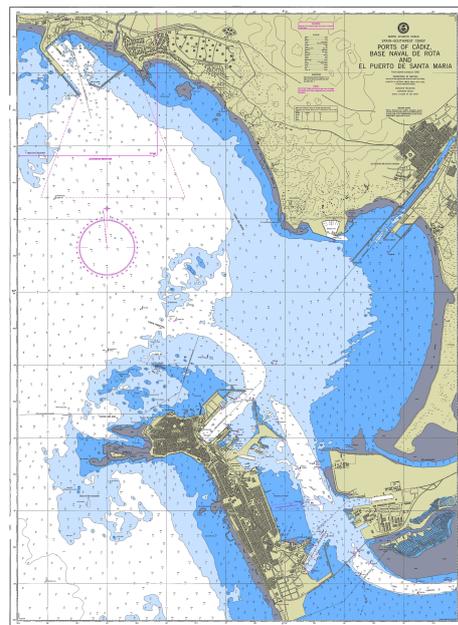


Figura 6.4: Carta náutica "Puerto de Cádiz" de la marina de los estados unidos.

La batimetría se ha exportado de Autocad a un archivo de texto con las coordenadas X,Y y Z de cada punto para importarlo en el Delft3D y asignar a cada celda de la malla una profundidad.

La batimetría final es la que se muestra en la figura 6.5:

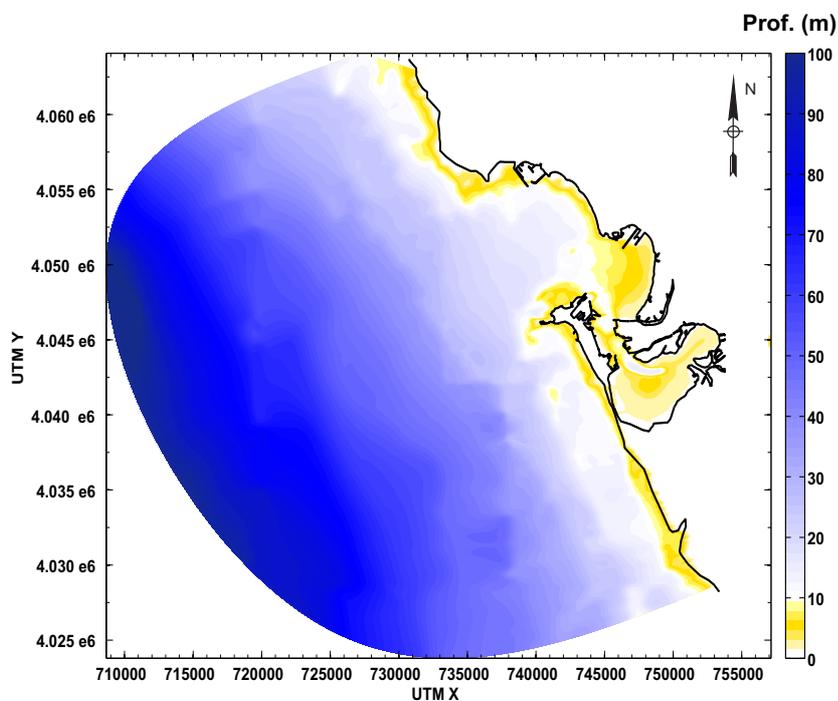


Figura 6.5: Batimetría de la Bahía de Cádiz en Delft3D.

### 6.2.4. Archivo Wavecon

Este archivo contiene los datos a propagar. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas: Tiempo, altura de ola significativa ( $H_s$ ), periodo pico ( $T_p$ ), dirección de procedencia del oleaje ( $\theta$ ), dispersión ( $ms$ ), nivel de la superficie libre ( $wl$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ), dirección de procedencia del viento ( $\theta_v$ ).

### 6.2.5. Parámetros del modelo

El programa necesita un valor para cada uno de sus parámetros internos de los módulos WAVE y FLOW. La correcta definición de estos valores para la Bahía de Cádiz constituye el proceso de calibración del modelo numérico.

Para una descripción detallada de cada uno de los parámetros del modelo véase, **Apéndice D: Parámetros del modelo numérico**.

### 6.3. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo numérico se eligen previamente unos periodos de tiempo de entre 48 y 96 h de duración en los que se realizan las simulaciones tratando de ajustar la altura de ola simulada con la medida por el instrumento en la posición  $I_1$  junto a la Boya Reviro. (Véase **Capítulo 5: Campaña de campo de larga duración.**)

Se han empleado cinco periodos de tiempo, los cuales se muestran en la figura 6.6.

- **Periodo 1:** 2012 02 05 20 a 2012 02 07 20 (Año, mes, día, hora)
- **Periodo 2:** 2012 01 14 22 a 2012 01 17 22
- **Periodo 3.1:** 2012 03 01 00 a 2012 03 03 18
- **Periodo 3.2:** 2012 03 05 00 a 2012 03 07 18
- **Periodo 4:** 2012 02 01 18 a 2012 02 04 16

En la figura 6.6 se muestran varias gráficas, de arriba a abajo: en la primera se representa en azul la altura de ola significativa medida en la Boya Golfo de Cádiz, en negro la medida por el instrumento fondeado en  $I_1$ ; la segunda representa la dirección de procedencia del oleaje en la Boya; la tercera, la dirección de procedencia del oleaje en  $I_1$ ; la cuarta representa la velocidad y dirección de procedencia del viento en la Boya y la quinta gráfica el nivel de marea medido por el instrumento en  $I_1$ . Sombreado en gris, los cinco periodos de tiempo elegidos para la calibración del modelo.

Se han tomado periodos de tiempo coincidentes con picos de altura de ola altos, direcciones de procedencia del oleaje de componente oeste principalmente y ciclos de mareas vivas y mareas muertas tratando de que los valores calibrados para cada parámetro sean válidos para cualquier condición de forzamiento en la Bahía.

De los cinco periodos anteriores, el 3.1 se ha empleado para validar el modelo una vez este ha sido calibrado.

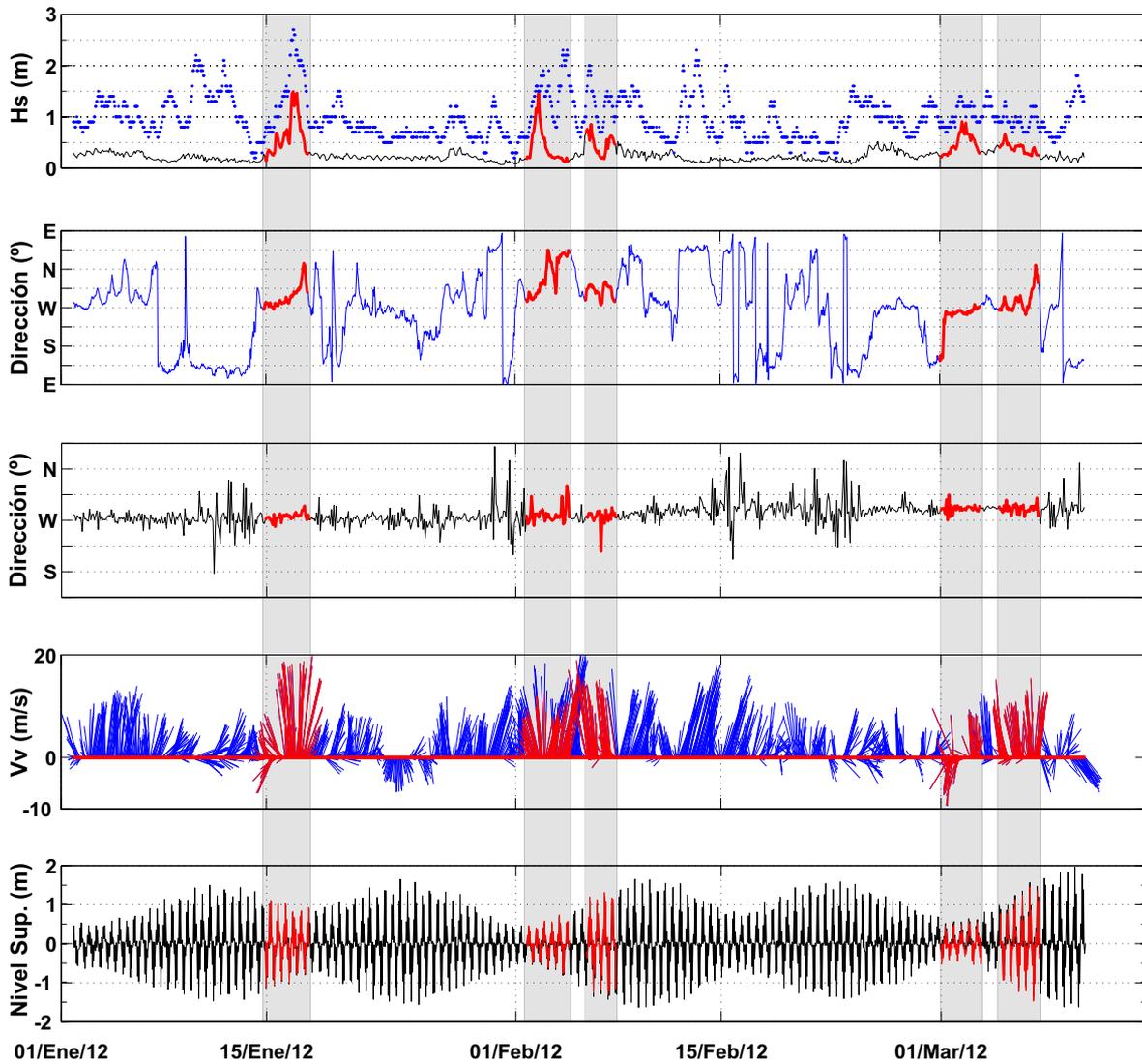


Figura 6.6: Panel 1 (superior): En azul altura de ola significativa (Boya), en negro altura de ola significativa ( $I_1$ ); panel 2: dirección de procedencia de oleaje (Boya); panel 3: dirección de procedencia de oleaje ( $I_1$ ); panel 4: velocidad y dirección de viento (Boya) y panel 5: nivel de marea ( $I_1$ ). Sombreados en gris los cinco periodos de tiempo elegidos.

Definidos los periodos de tiempo, se sigue de forma iterativa el proceso descrito en el **Capítulo 3: Metodología** para obtener cada uno de los parámetros descritos en **Apéndice D: Parámetros del modelo numérico**, para la Bahía de Cádiz.

### 6.4. Resultados de la calibración del modelo

Se recogen los resultados de las simulaciones que reducen al máximo el error para los cinco periodos de tiempo elegidos. Estos resultados dan los parámetros de calibración del modelo que posteriormente se utilizan para simular las condiciones de forzamiento sobre los escenarios.

Se ha hecho distinción entre el periodo de mareas muertas y el de mareas vivas para obtener un ajuste fiable en ambas situaciones.

#### 6.4.1. Mareas vivas

Dos de los periodos de tiempo definidos coinciden con ciclos de mareas vivas.

Estos periodos son:

##### 6.4.1.1. Periodo 1

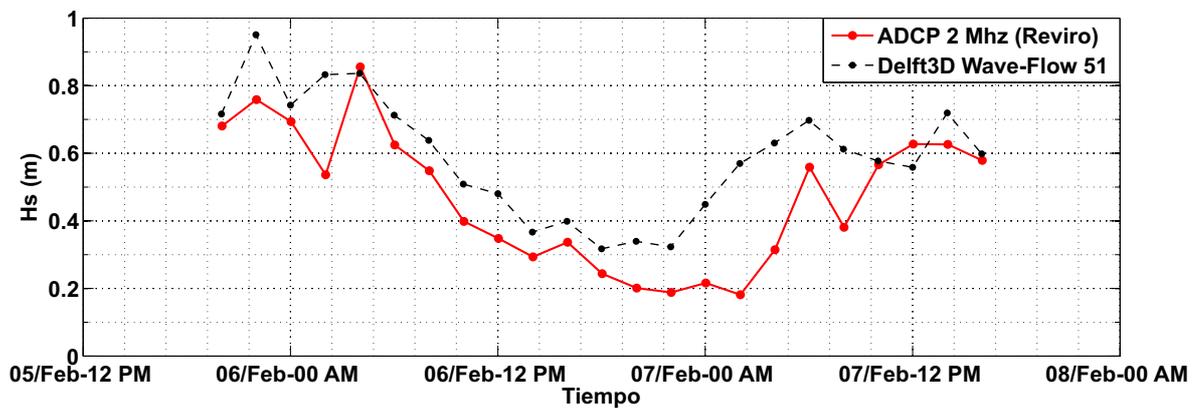
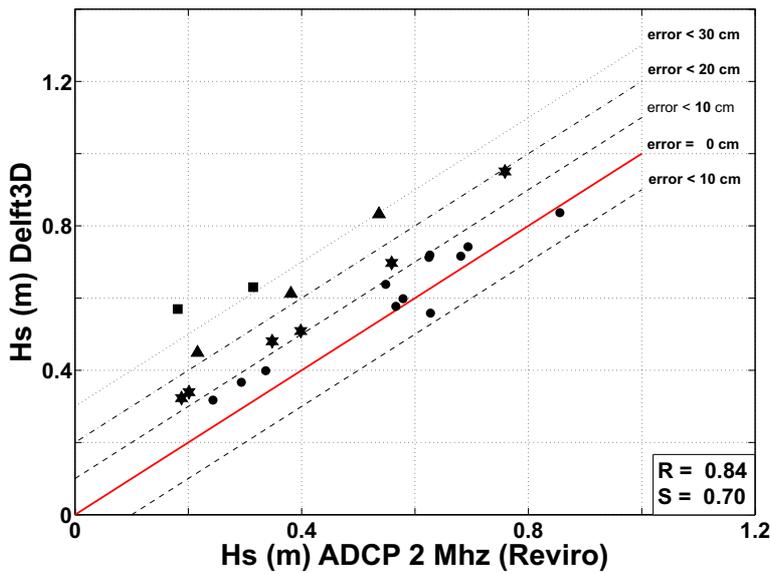


Figura 6.7: En rojo, altura de ola medida por el ADCP fondeado en  $I_1$  junto a la Boya Reviro. En negro, la altura de ola obtenida en la simulación número 51



$ H_s^{Delft} - H_s^{Reviro} $	Valor
< 10 cm	52%
< 20 cm	78%
< 30 cm	91%
$\geq 30$ cm	9%

Tabla 6.1: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 1

Figura 6.8: Porcentajes. Periodo 1

En este periodo el ajuste conseguido fue:  $R = 0.84$  y  $SKILL = 0.70$

Se observa que el 80 % de los valores tienen un error menor de 20 cm entre la altura de ola obtenida mediante el Delft3D y la medida en el punto “ $I_1$ ” con el ADCP. Y un 50 % menor de 10 cm.

### 6.4.1.2. Periodo 3.2

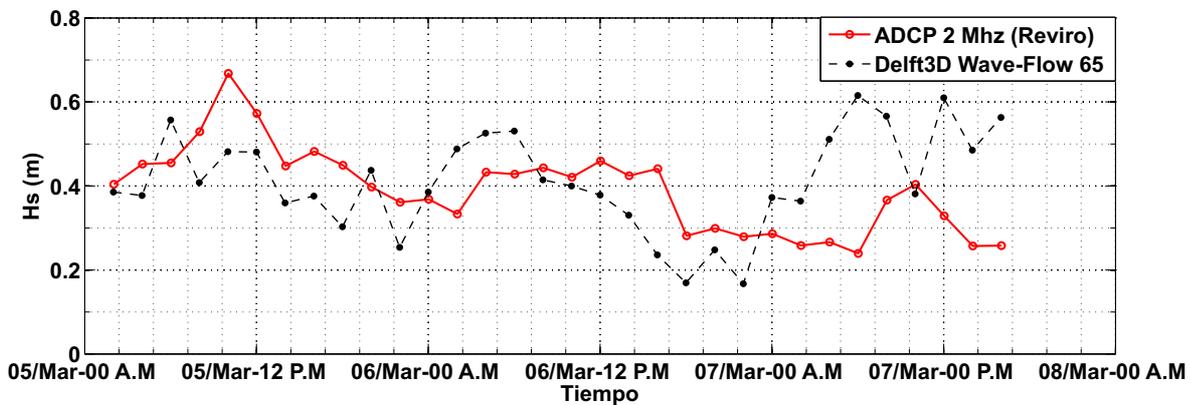
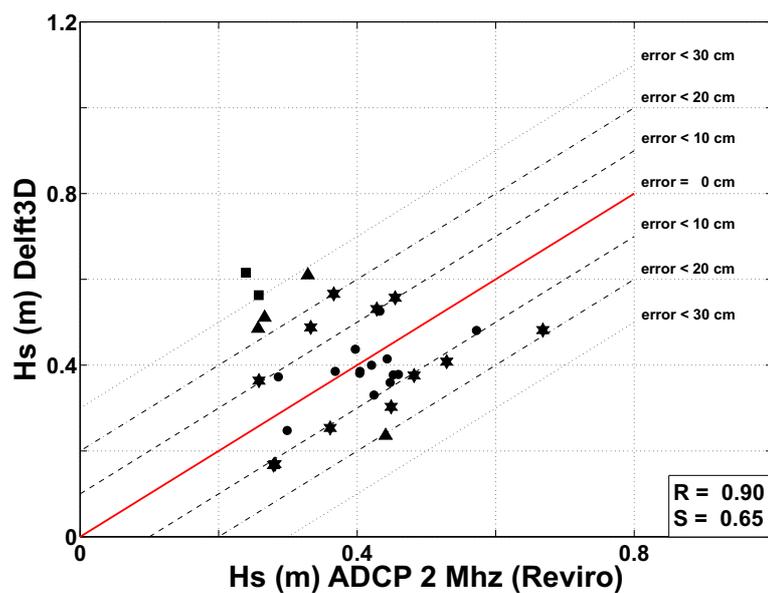


Figura 6.9: En rojo, altura de ola medida por el ADCP fondeado en  $I_1$  junto a la Boya Reviro. En negro, la altura de ola obtenida en la simulación número 65

## 6. Modelo numérico I: Aplicación, calibración y validación



$ H_s^{Delft} - H_s^{Reviro} $	Valor
< 10 cm	44 %
< 20 cm	82 %
< 30 cm	95 %
$\geq 30$ cm	5 %

Tabla 6.2: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 3.2

Figura 6.10: Porcentajes. Periodo 3.2

El ajuste que se produce en este periodo de tiempo tiene un valor adicional al resto debido a la baja altura de ola que se tiene durante los tres días de duración. Esto hace que el ajuste sea mucho más difícil ya que el valor de altura de ola se ve mucho más afectado por todo tipo de fluctuaciones.

Se obtienen valores de  $R = 0.90$  y  $SKILL = 0.65$ , consiguiendo que el 80 % de los valores tenga un error menor de 20 cm en la altura de ola.

Los parámetros del modelo numérico a modificar para un periodo de mareas vivas son:

<b>Wave</b>
-------------

### GRID

#### ■ Resolución espectral

##### ● Malla exterior

- Número de direcciones: 72
- Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 37

##### ● Malla interior

- Número de direcciones: 36
- Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 24

### FRONTERA

#### ■ Orientación

- Tipo: Orientación
- Orientación de la frontera: Oeste

### PARÁMETROS FÍSICOS

#### ■ Rotura inducida por el fondo:

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

#### ■ Interacciones triádicas no lineales:

- Alpha: 0.1
- Beta: 9

#### ■ Fricción del fondo:

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.02

#### ■ Difracción:

## 6. Modelo numérico I: Aplicación, calibración y validación

---

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

### ARCHIVO WAVECON

- **"ms":** 1 (Dispersión 5.9º)

<b>Flow</b>
-------------

### DOMINIO

- **Parámetros del grid**
  - Latitud: 36.25 grados decimales
  - Orientación: 0
  - Número de capas: 1

### PERIODO DE TIEMPO

- **Periodo de tiempo**
  - Fecha de referencia: Se introduce el año, mes y día de inicio, sin horas.
  - Tiempo de inicio: Se introduce el año, mes, día y hora de inicio
  - Tiempo de finalizado: Se introduce el año, mes, día y hora de finalizado

### PROCESOS

- **Físicos**
  - Viento: ✓
  - Oleaje: ✓
  - Online DELFT3D-WAVE: ✓

### CONDICIONES INICIALES

- **Nivel del agua:** Primer valor de la columna de nivel de agua del archivo que contiene los estados de mar de entrada a propagar "wavecon"

## FRONTERA

### ▪ Definición del contorno por coordenadas M y N

M1=244	N1=245
M2=5	N1=245

Tabla 6.3: Definición de la frontera en coordenadas del grid

### ▪ Condiciones del flow

- Tipo de frontera abierta: Nivel del agua
- Reflexión del parámetro alfa: 0
- Tipo de forzamiento: Marea astronómica, cuyos armónicos medidos mediante un mareógrafo colocado en el río San Pedro son:

Nombre	Amplitud (m)	Fase (°)
NU2	0.040132	46.9
L2	0.019875	74.02
T2	0.021461	84.16
R2	0.005943	68.41
K2	0.105847	80.41
MN4	0.012574	117.71
M4	0.028158	160.34
MS4	0.013229	229.81

Tabla 6.4: Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz

## PARÁMETROS FÍSICOS

### • Constantes

- Constantes
  - ◇ Gravedad:  $9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
  - ◇ Densidad agua:  $1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
  - ◇ Densidad aire:  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
  - ◇ Coeficiente de arrastre por viento: Coeficiente / Velocidad
    - A: 0.003 / 0
    - B: 0.00723 / 100
    - C: 0.00723 / 100
- Rugosidad
  - ◇ Fórmula: Chezy

- ◇ Valores: U: 80 V: 60
- ◇ Fórmula de las tensiones debido al forzamiento del oleaje: Bijker
- Viscosidad
  - ◇ Uniforme:  $25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Viento: Se carga el archivo con los datos de viento

### MONITORIZACIÓN

Se añaden los puntos de control/observación dónde se quieren obtener los resultados de la simulación.

### SALIDA

- **Almacenamiento**

Hay dos columna diferentes

- Store map results
  - Fecha de inicio
  - Fecha de finalización
  - Intervalo: 120 minutos (Cada cuanto tiempo el programa saca los datos, cada dos horas ya que el instrumento ADCP da un dato cada dos horas)
  - History interval: 120 minutos
- Store communication file
  - Fecha de inicio
  - Fecha de finalización
  - Intervalo: 60 minutos (Cada cuanto tiempo se tiene un estado de mar de entrada al programa, cada hora)
  - Restart interval: 1440 minutos

6.4.2. Mareas muertas

Tres de los periodos de tiempo definidos coinciden con ciclos de mareas muertas.

6.4.2.1. Periodo 2

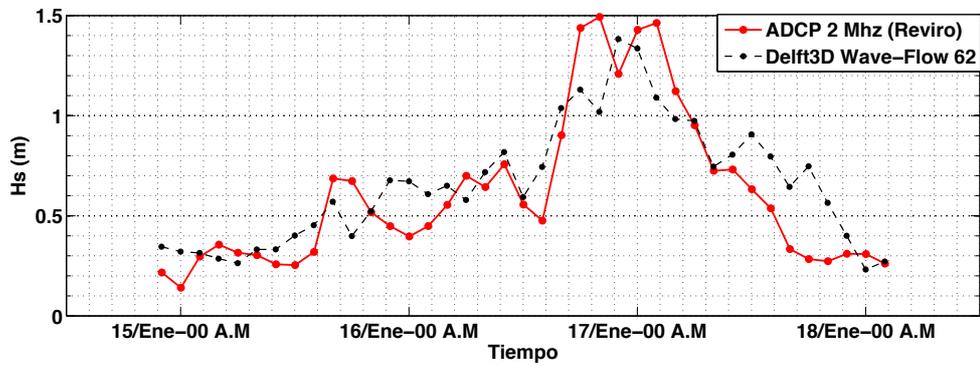


Figura 6.11: En rojo, altura de ola medida por el ADCP fondeado en  $I_1$  junto a la Boya Reviro. En negro, la altura de ola obtenida en la simulación número 62

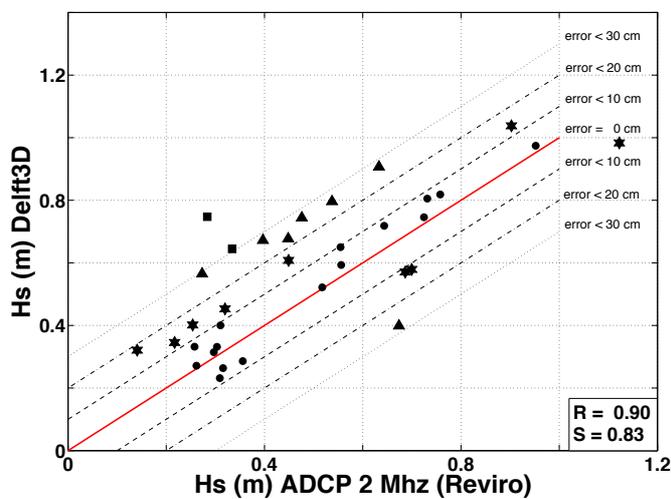


Tabla 6.5: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 2

$ H_S^{Delft} - H_S^{Reviro} $	Valor
< 10 cm	41 %
< 20 cm	79 %
< 30 cm	97 %
$\geq 30$ cm	3 %

Figura 6.12: Porcentajes. Periodo 2

6.4.2.2. Periodo 4

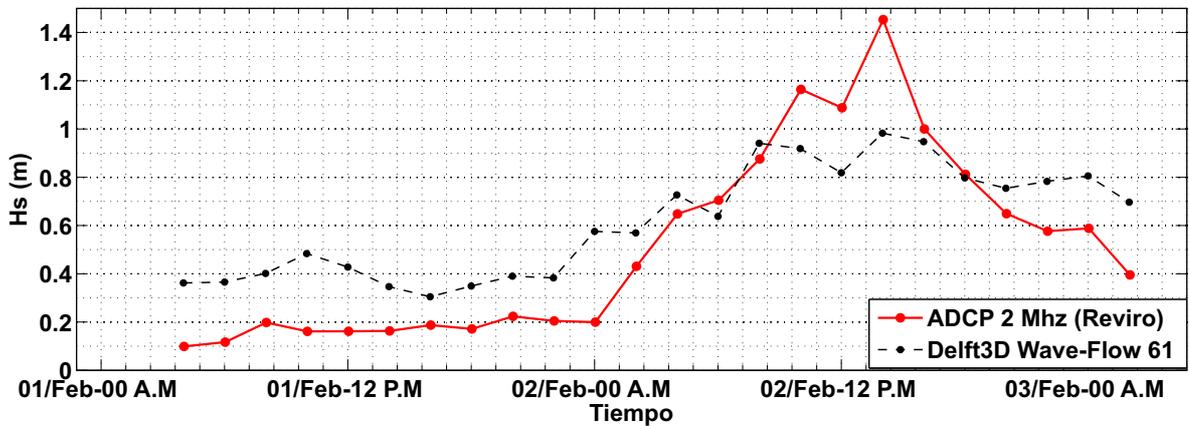
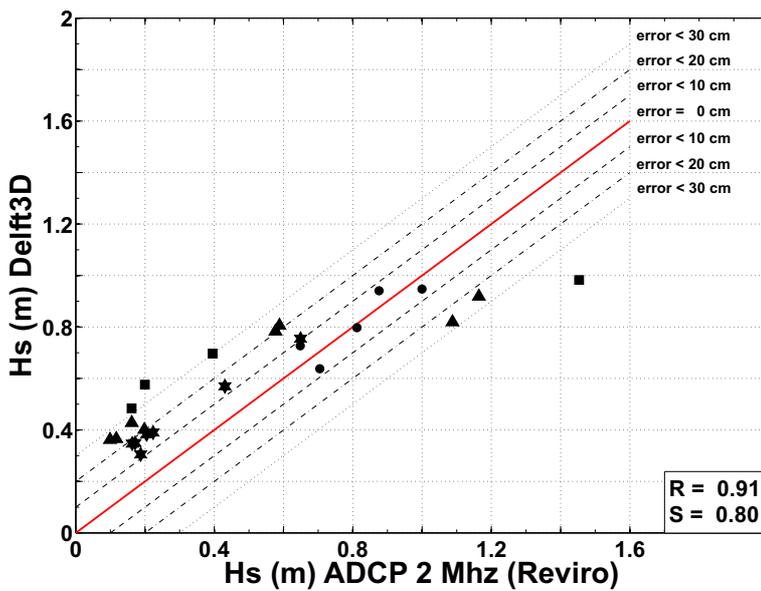


Figura 6.13: En rojo, altura de ola medida por el ADCP fondeado en  $I_1$  junto a la Boya Reviro. En negro, la altura de ola obtenida en la simulación número 61



$ H_s^{Delft} - H_s^{Reviro} $	Valor
< 10 cm	21 %
< 20 cm	50 %
< 30 cm	83 %
$\geq 30$ cm	17 %

Tabla 6.6: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 4

Figura 6.14: Porcentajes. Periodo 4

Este último periodo se utilizó para validar los parámetros fijados en los periodos anteriores. Se obtiene unos valores de ajuste de:  $R = 0.91$  y  $SKILL = 0.80$ .

Los parámetros del modelo numérico a modificar para un periodo de mareas muertas son:

<b>Wave</b>
-------------

### GRID

#### ▪ Resolución espectral

- **Malla exterior**
  - Número de direcciones: 72
  - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
  - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
  - Número de divisiones de frecuencia: 37
- **Malla interior**
  - Número de direcciones: 36
  - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
  - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
  - Número de divisiones de frecuencia: 24

### FRONTERA

#### ▪ Orientación

- Tipo: Orientación
- Orientación de la frontera: Oeste

### PARÁMETROS FÍSICOS

#### ▪ Rotura inducida por el fondo:

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

#### ▪ Interacciones triádicas no lineales:

- Alpha: 0.1  $\rightarrow$  0.5  $\rightarrow$  1.2 <sup>1</sup>
- Beta: 9

#### ▪ Fricción del fondo:

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.002

---

<sup>1</sup>Éste es un parámetro delicado debido a la gran inestabilidad que conlleva el modificarlo. El mejor ajuste se obtiene con el valor de Alpha de 1.2, sin embargo, en muchos casos ocurre que la simulación se detiene en mitad por culpa de modificar dicho parámetro. Lo más recomendable es empezar poniendo el valor de 1.2, si la simulación falla, bajarlo a 0.5 y si no a 0.1.

- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

### ARCHIVO WAVECON

- **"ms":** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

<b>Flow</b>
-------------

### DOMINIO

- **Parámetros del grid**
  - Latitud: 36.25 grados decimales
  - Orientación: 0
  - Número de capas: 1

### PERIODO DE TIEMPO

- **Periodo de tiempo**
  - Fecha de referencia: Se introduce el año, mes y día de inicio, sin horas.
  - Tiempo de inicio: Se introduce el año, mes, día y hora de inicio
  - Tiempo de finalizado: Se introduce el año, mes, día y hora de finalizado

### PROCESOS

- **Físicos**
  - Viento: ✓
  - Oleaje: ✓
  - Online DELFT3D-WAVE: ✓

### CONDICIONES INICIALES

- **Nivel del agua:** Primer valor de la columna de nivel de agua del archivo que contiene los estados de mar de entrada a propagar "wavecon"

## FRONTERA

### ■ Definición del contorno por coordenadas M y N

M1=244	N1=245
M2=5	N1=245

Tabla 6.7: Definición de la frontera en coordenadas del grid

### ■ Condiciones del flow

- Tipo de frontera abierta: Nivel del agua
- Reflexión del parámetro alfa: 0
- Tipo de forzamiento: Marea astronómica, cuyos armónicos medidos mediante un mareógrafo colocado en el río San Pedro son:

Nombre	Amplitud (m)	Fase (°)
NU2	0.040132	46.9
L2	0.019875	74.02
T2	0.021461	84.16
R2	0.005943	68.41
K2	0.105847	80.41
MN4	0.012574	117.71
M4	0.028158	160.34
MS4	0.013229	229.81

Tabla 6.8: Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz

## PARÁMETROS FÍSICOS

### • Constantes

- Constantes
  - ◇ Gravedad:  $9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
  - ◇ Densidad agua:  $1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
  - ◇ Densidad aire:  $1 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
  - ◇ Coeficiente de arrastre por viento: Coeficiente / Velocidad
    - A: 0.005 / 0
    - B: 0.00723 / 100
    - C: 0.00723 / 100
- Rugosidad
  - ◇ Fórmula: Chezy

- ◇ Valores: U: 80 V: 60
- ◇ Fórmula de las tensiones debido al forzamiento del oleaje: Grant et al.
- Viscosidad
  - ◇ Uniforme:  $25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Viento: Se carga el archivo con los datos de viento

### MONITORIZACIÓN

Se añaden los puntos de control/observación dónde se quieren obtener los resultados de la simulación.

### SALIDA

- **Almacenamiento**

Hay dos columna diferentes

- Store map results
  - Fecha de inicio
  - Fecha de finalización
  - Intervalo: 120 minutos (Cada cuanto tiempo el programa saca los datos, cada dos horas ya que el instrumento ADCP da un dato cada dos horas)
  - History interval: 120 minutos
- Store communication file
  - Fecha de inicio
  - Fecha de finalización
  - Intervalo: 60 minutos (Cada cuanto tiempo se tiene un estado de mar de entrada al programa, cada hora)
  - Restart interval: 1440 minutos

## 6.5. Parámetros Calibrados

### 6.5.1. Mareas Vivas

<b>Wave</b>
-------------

#### PARÁMETROS FÍSICOS

- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.02
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

<b>Flow</b>
-------------

#### PARÁMETROS FÍSICOS

- **Constantes**
  - Constantes
    - Coeficiente de arrastre por viento: Coeficiente / Velocidad
      - A: 0.003 / 0
      - B: 0.00723 / 100
      - C: 0.00723 / 100
  - Rugosidad
    - Fórmula: Chezy
    - Valores: U: 80 V: 60
    - Fórmula de las tensiones debido al forzamiento del oleaje: Bijker
  - Viscosidad
    - Uniforme:  $25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

### 6.5.2. Mareas Muertas

#### Wave

#### PARÁMETROS FÍSICOS

- Rotura inducida por el fondo:
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- Interacciones triádicas no lineales:
  - Alpha: 0.1 → 0.5 → 1.2 <sup>2</sup>
  - Beta: 9
- Fricción del fondo:
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- Difracción:
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- Decrestamiento: Van der Westhuysen

#### Flow

#### PARÁMETROS FÍSICOS

- Constantes
  - Constantes
    - Gravedad: 9.81  $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
    - Densidad agua: 1000  $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
    - Densidad aire: 1  $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
    - Coeficiente de arrastre por viento: Coeficiente / Velocidad

---

<sup>2</sup>Éste es un parámetro delicado debido a la gran inestabilidad que conlleva el modificarlo. El mejor ajuste se obtiene con el valor de Alpha de 1.2, sin embargo, en muchos casos ocurre que la simulación se detiene en mitad por culpa de modificar dicho parámetro. Lo más recomendable es empezar poniendo el valor de 1.2, si la simulación falla, bajarlo a 0.5 y si no a 0.1.

A: 0.005 / 0

B: 0.00723 / 100

C: 0.00723 / 100

- Rugosidad
  - Fórmula: Chezy
  - Valores: U: 80    V: 60
  - Fórmula de las tensiones debido al forzamiento del oleaje: Grant et al.
- Viscosidad
  - Uniforme:  $25 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

### 6.6. Validación del modelo

Para la validación del modelo el periodo de tiempo empleado es:

- **Periodo 3.1:** 2012 03 01 00 a 2012 03 03 18

#### 6.6.0.1. Periodo 3.1

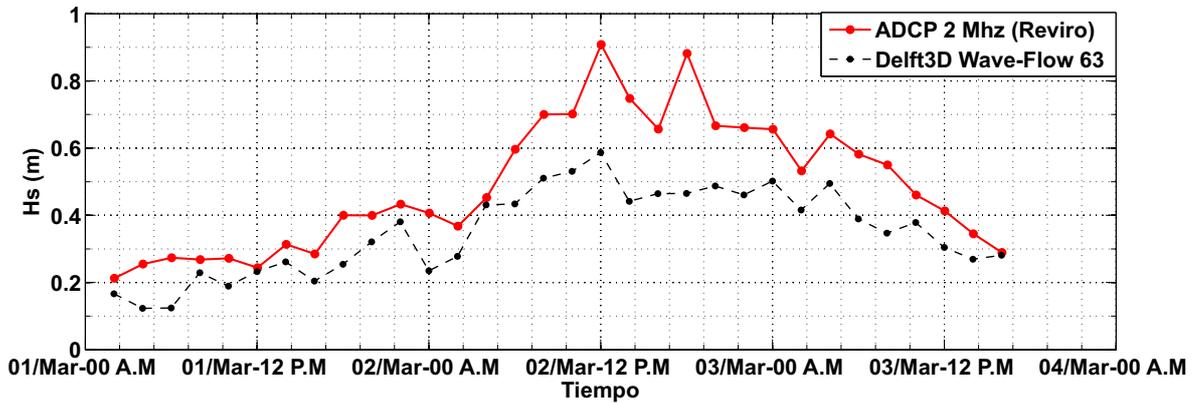


Figura 6.15: En rojo, altura de ola medida por el ADCP fondeado en  $I_1$  junto a la Boya Reviro. En negro, la altura de ola obtenida en la simulación número 63

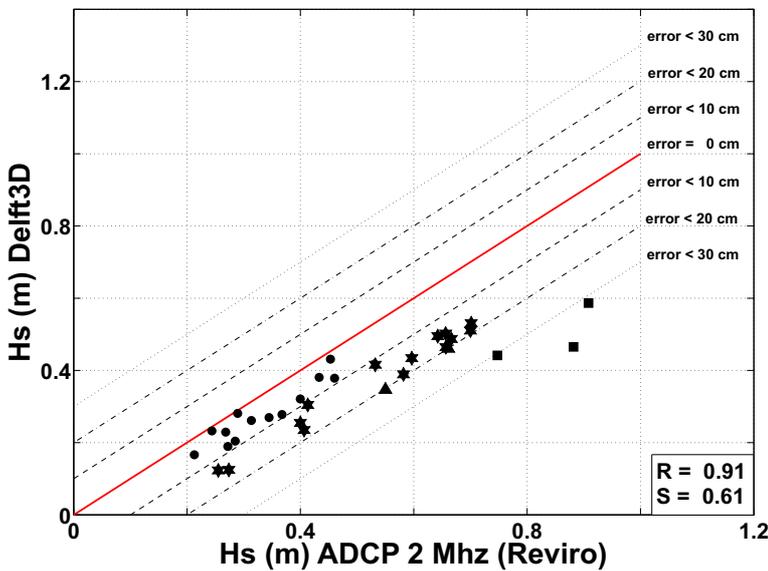


Tabla 6.9: Gráfico de dispersión  $H_{Delft} - H_{Reviro}$ . Periodo 3.1

$ H_s^{Delft} - H_s^{Reviro} $	Valor
< 10 cm	41 %
< 20 cm	85 %
< 30 cm	91 %
$\geq 30$ cm	9 %

Figura 6.16: Porcentajes. Periodo 3.1

Se observa que la validación es correcta al obtener unos valores de ajuste de 0.9 para el R y 0.83 para el Skill.



## Capítulo 7

# Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

### 7.1. Análisis del régimen medio

Se ha analizado el régimen medio sobre cada escenario por separado y después se ha comparado el escenario 2 (nueva terminal) con el escenario 1 (situación actual) y el 3 (nueva terminal más dragado) con el 1. Dentro de cada uno se distinguen dos sectores: Sector playa de Valdelagrana y sector Canal de navegación.

#### 7.1.1. Escenario 1: Situación actual

##### 7.1.1.1. Sector Valdelagrana



Figura 7.1: Puntos de control sector Valdelagrana SC 1.

Se han tomado seis puntos de control para la obtención de resultados, de los cuales sólo emplearemos cuatro debido a que la proximidad entre ellos hace que los resultados sean muy similares. Únicamente se emplearán los seis puntos en el cálculo de la Resultante Media Anual.

### Histogramas

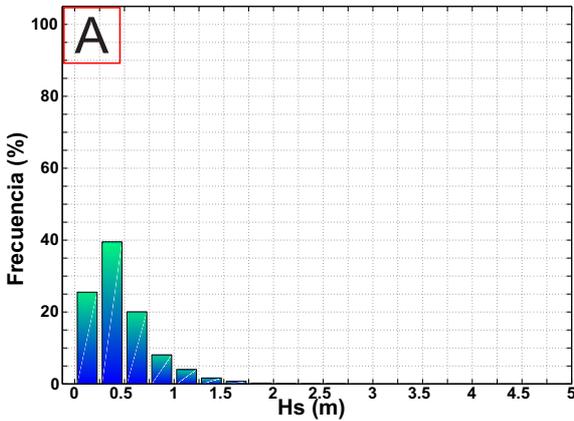


Figura 7.2: Histograma. P.Control A (SC1)

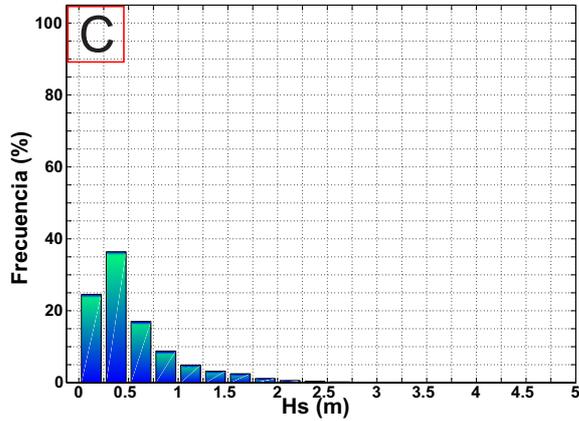


Figura 7.3: Histograma. P.Control C (SC1)

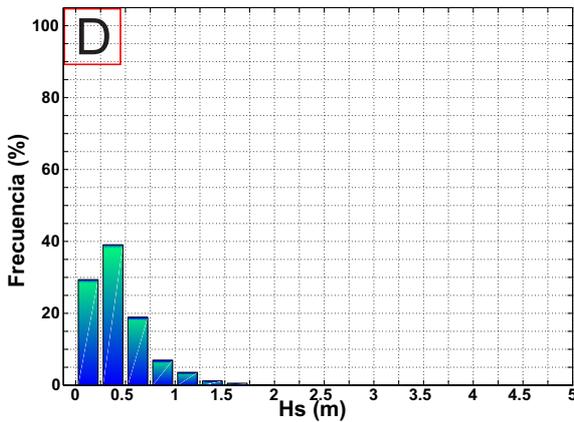


Figura 7.4: Histograma. P.Control D (SC1)

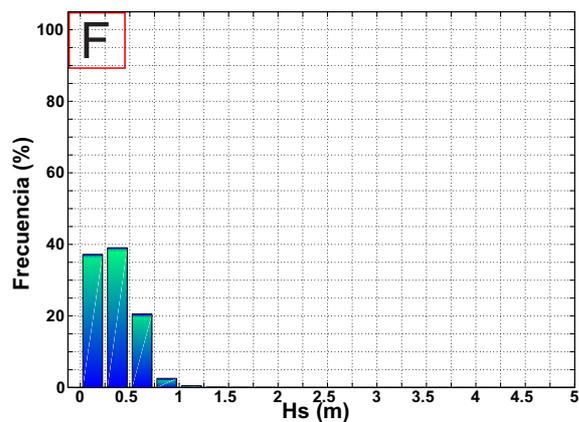


Figura 7.5: Histograma. P.Control F (SC1)

Las alturas de ola dominantes a lo largo de toda la playa de Valdelagrana son las comprendidas entre 0.25 y 0.5 m, un 40% del total, seguidas de las menores de 0.25 m y en tercer lugar las comprendidas entre 0.5 y 0.75 m. El 85% del total de oleaje son olas menores de 0.75 m.

Conforme se va avanzando desde el punto A hacia el F las olas de menor altura [0-0.75] m se hacen más frecuentes, mientras que las alturas de ola mayores aparecen menos, llegando incluso a desaparecer en el punto de control F.

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

### Rosa de Oleaje

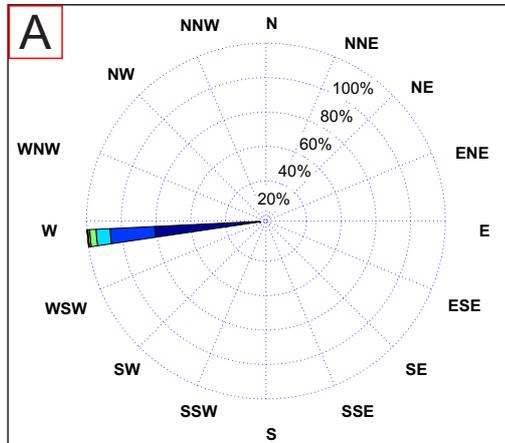


Figura 7.6: Rosa Oleaje. P.Control A (SC1)

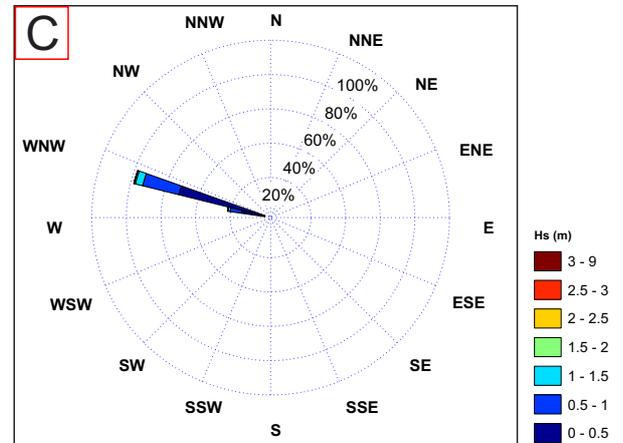


Figura 7.7: Rosa Oleaje. P.Control C (SC1)

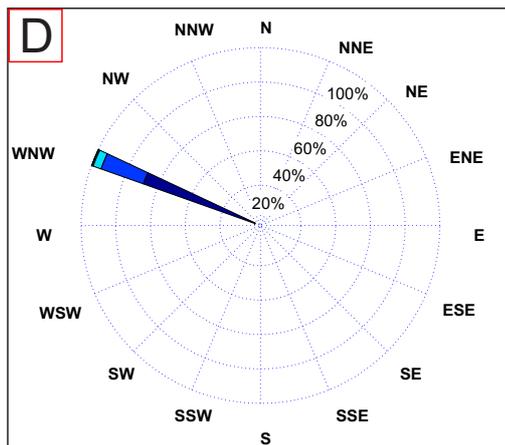


Figura 7.8: Rosa Oleaje. P.Control D (SC1)

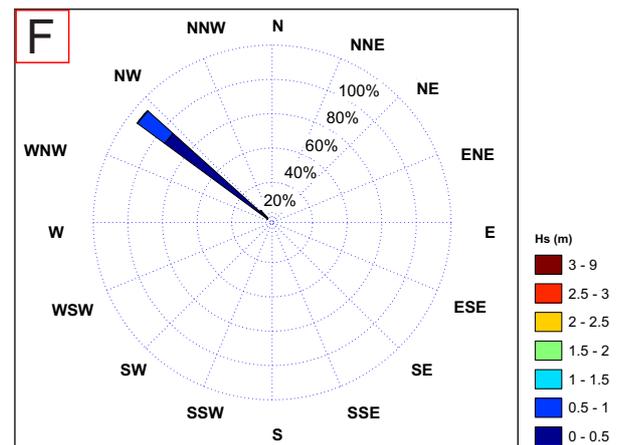


Figura 7.9: Rosa Oleaje. P.Control F (SC1)

Para cada punto de control la mayor parte del oleaje procede de una dirección única. En el punto situado más al norte la procedencia es prácticamente oeste y conforme se desciende por la playa dicha dirección tiende hacia el noroeste.

Función de densidad de Weibull

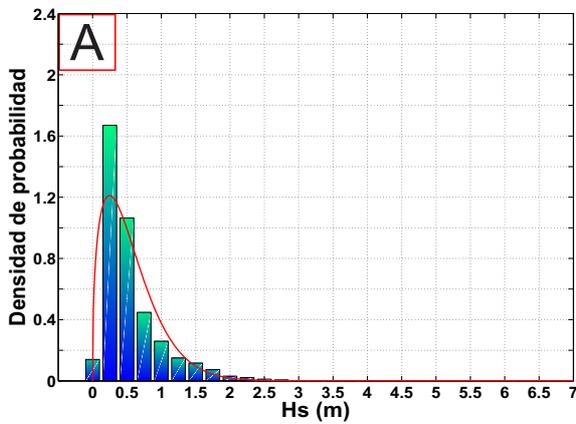


Figura 7.10: F.Densidad. P.Control A (SC1)

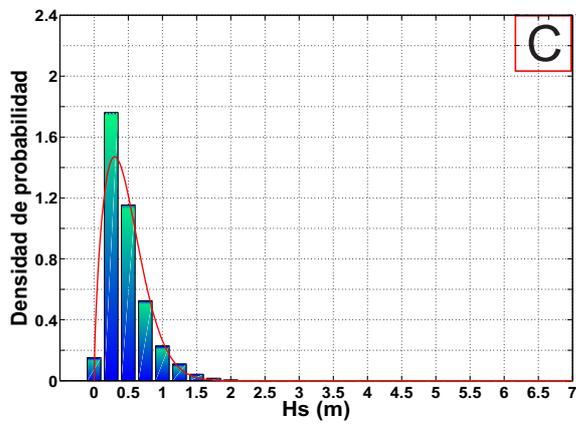


Figura 7.11: F.Densidad. P.Control C (SC1)

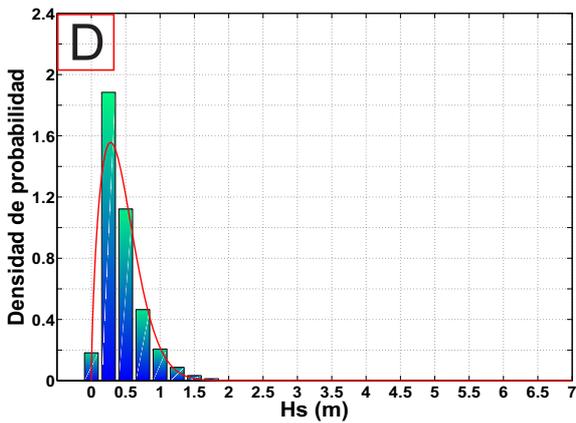


Figura 7.12: F.Densidad. P.Control D (SC1)

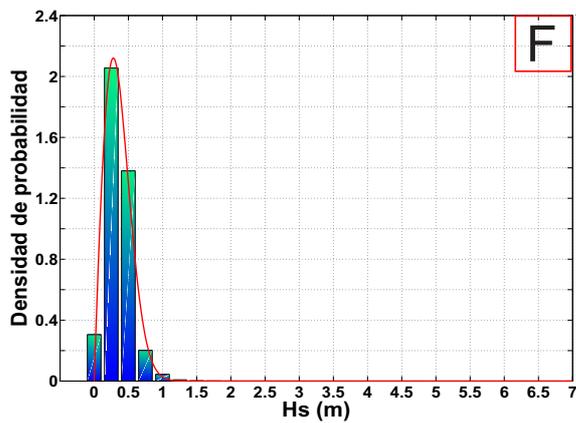


Figura 7.13: F.Densidad. P.Control F (SC1)

Se observa el mismo fenómeno que el observado en los histogramas. En el punto de control A la función de densidad es más ancha en la base y su pico es menos alto, mientras que en el F ocurre todo lo contrario una base muy estrecha pero un valor máximo elevado. El rango de alturas de ola se reduce pasando de [0 - 1.5] m en el punto A hasta [0 - 0.75] m en el punto F. Las alturas de ola más bajas se hacen más frecuentes mientras que las olas de mayor elevación desaparecen.

Resultante media anual

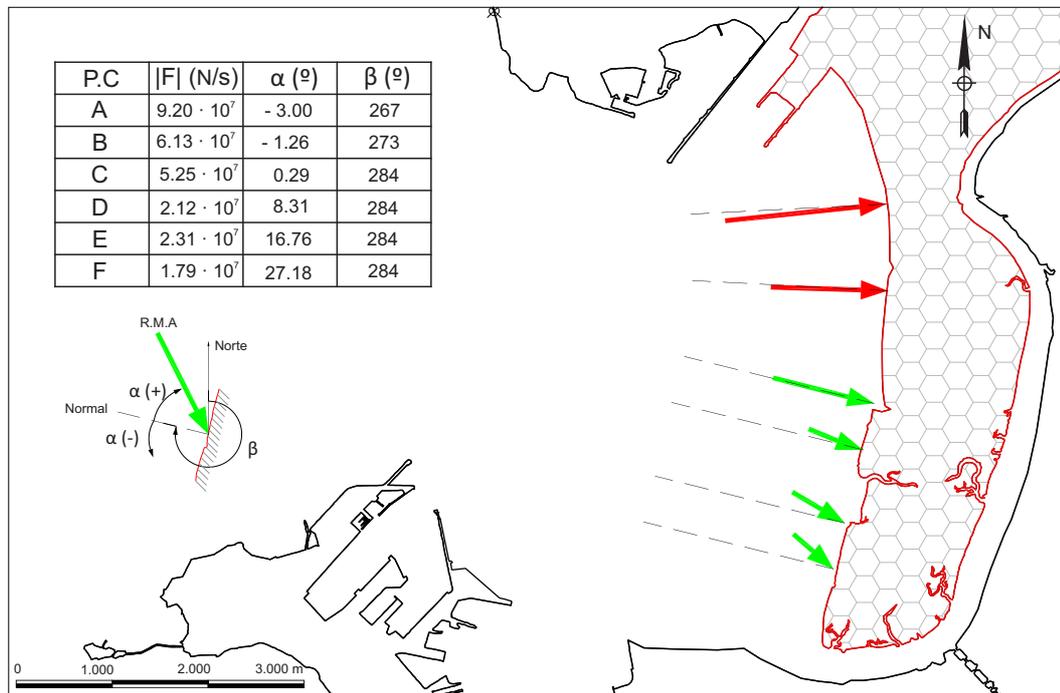


Figura 7.14: Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC1)

Se calcula la resultante media anual (RMA) del oleaje a lo largo de la playa de Valdelagrana. Ésta es un vector que permite obtener el flujo medio de energía del oleaje y del cual interesa conocer su módulo y dirección. El módulo indica en que zonas el oleaje está aportando más energía y en cuales menos. Si al comparar el módulo de la RMA de un escenario a otro, éste aumenta, querrá decir que el oleaje pasa a aportar más energía en dicho punto.

A la hora de comparar los escenarios hay que ver si la resultante media anual varía su módulo en algún punto de control, esto indicaría que el oleaje aporta una mayor o menor energía en dicho punto. Y también la variación de la dirección de un escenario a otro. Un fuerte cambio en la dirección del vector quiere decir que la costa tratará de ponerse perpendicular a dicha dirección para estar en equilibrio de nuevo lo cual puede tener consecuencias negativas.

Se define la normal a la costa en cada punto de control. La dirección del vector RMA viene dada como un ángulo " $\alpha$ " respecto a la normal que previamente se haya fijado. Dicho ángulo puede ser positivo o negativo indicando si el vector RMA queda por encima o por debajo de la normal (Véase el criterio de signos en la figura 7.150).

---

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

---

La formulación empleada es la siguiente:

$$f = E C_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{c}{2} \frac{1 + 2kh}{\sinh 2kh} \quad (7.1)$$

donde:

$E$ : Energía.

$C_g$ : Celeridad de grupo.

$\rho$ : Densidad del agua de mar:  $1025 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

$g$ : 9.81

$H$ : Altura de ola significativa.

$c$ : Velocidad

$k$ : Número de onda, se obtiene a partir de la ecuación de la dispersión.

$h$ : Profundidad.

$$\begin{aligned} f_x &= f \sin\left(\frac{\alpha \pi}{180}\right) \\ f_y &= f \cos\left(\frac{\alpha \pi}{180}\right) \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad \text{Módulo Resultante Media Anual} \quad (7.3)$$

$$\gamma = \text{arctg}\left(\frac{f_y}{f_x}\right) \frac{180}{\pi} \rightarrow \alpha \quad (7.4)$$

Siendo:

$\gamma$ : Dirección de la RMA medida desde el norte en sentido horario.

$\alpha$ : Dirección de la RMA medida desde la normal previamente fijada.

En la figura 7.150 se ve que los dos vectores situados más al norte (de color rojo) tienen un ángulo  $\alpha$  negativo, eso quiere decir que el oleaje en esos puntos favorece un transporte de sedimento hacia arriba, mientras que en el resto ocurre todo lo contrario, produciendo un transporte de sedimento hacia abajo (de color verde). Los vectores situados en la zona superior de la playa tienen un módulo mayor y tienden a ser perpendiculares a la línea de costa. Esta perpendicularidad indica que la línea de costa está en equilibrio en la zona norte. Conforme se desciende hacia el sur de Valdelagrana los vectores van reduciendo su módulo y aumentan su ángulo respecto a la normal haciendo que esta zona de la desembocadura del río San Pedro tienda a avanzar y crecer para colocarse perpendicular a la dirección de los vectores de la RMA buscando su posición de equilibrio.

7.1.1.2. Sector canal de navegación

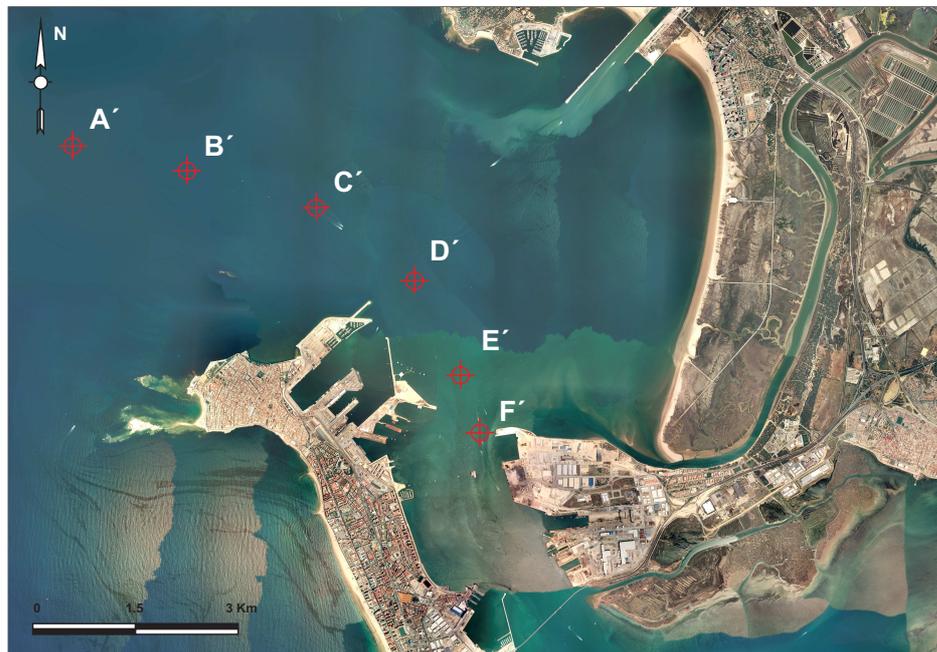


Figura 7.15: Puntos de control sector canal de navegación SC 1.

En el segundo sector dentro del primer escenario se analiza la influencia de las actuaciones en los seis puntos de control.

Histogramas

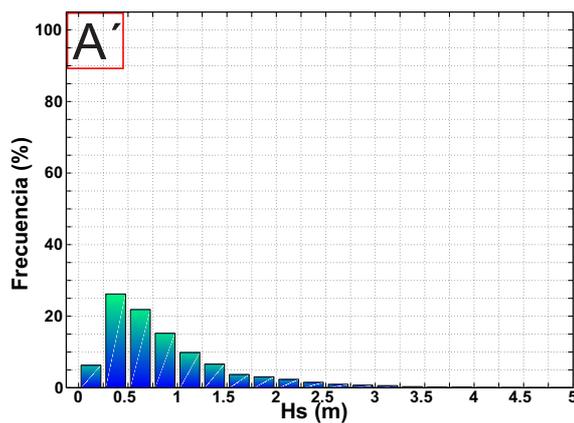


Figura 7.16: Histograma. P.Control A' (SC1)

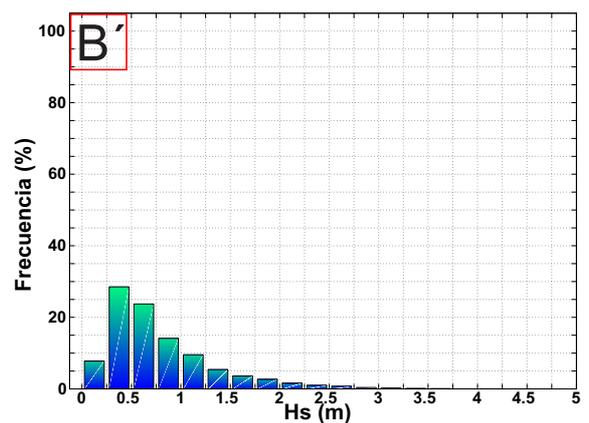


Figura 7.17: Histograma. P.Control B' (SC1)

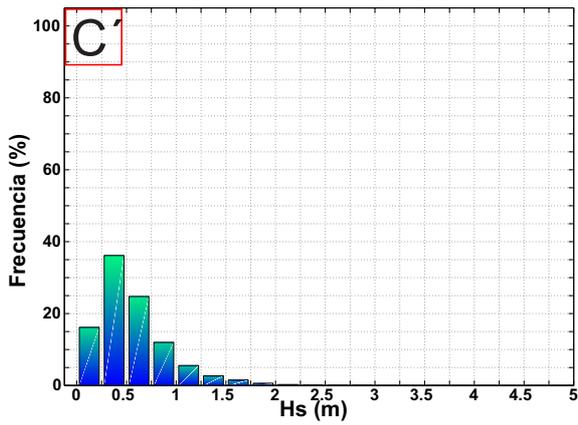


Figura 7.18: Histograma. P.Control C' (SC1)

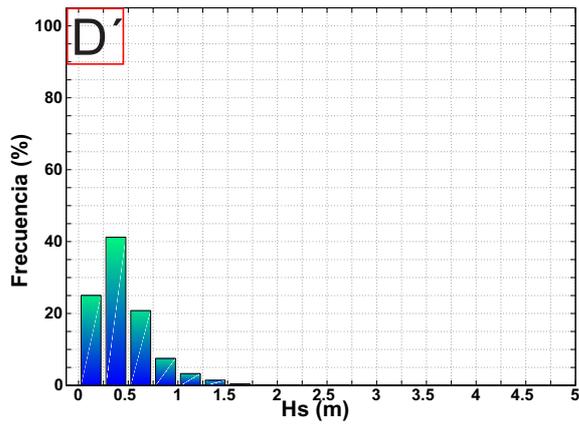


Figura 7.19: Histograma. P.Control D' (SC1)

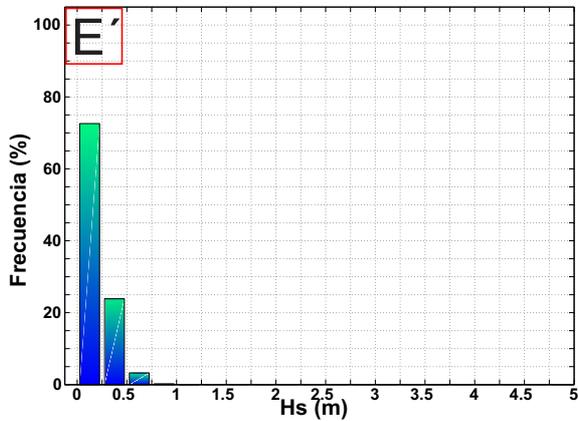


Figura 7.20: Histograma. P.Control E' (SC1)

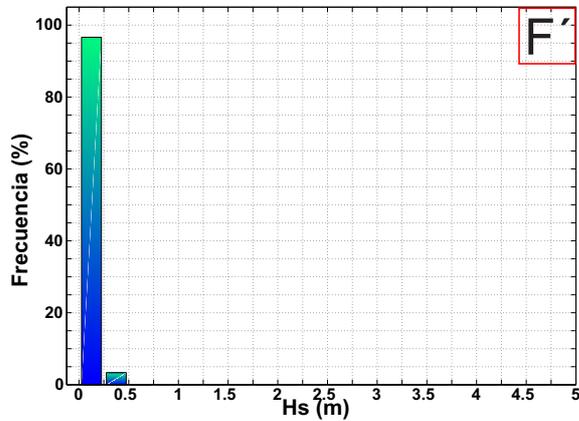


Figura 7.21: Histograma. P.Control F' (SC1)

Se observa una disminución de la altura de ola a medida que se avanza por el canal de navegación hacia el Puerto de Cádiz. En los primeros puntos de control las alturas de ola  $< 0.25$  m son muy poco frecuentes (5%), mientras que las comprendidas entre  $[0.25-1.25]$  tienen una frecuencia mayor. Se observan registros de alturas de ola máximos de hasta 3 metros. En los puntos de control más próximos al Puerto de Cádiz los histogramas toman una forma distinta, mayor frecuencia de alturas de ola más bajas hasta llegar al último punto de control donde casi todo el oleaje es  $< 0.25$  m.

Rosa de Oleaje

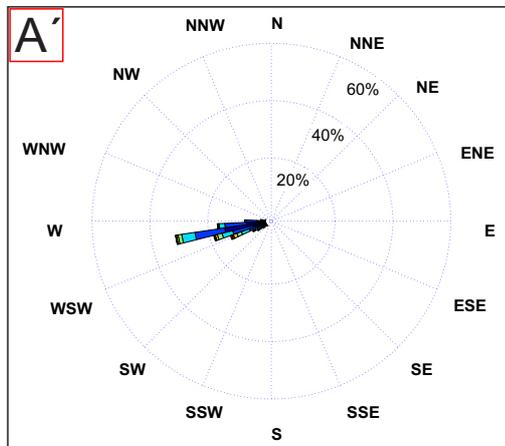


Figura 7.22: Rosa Oleaje. P.Control A' (SC1)

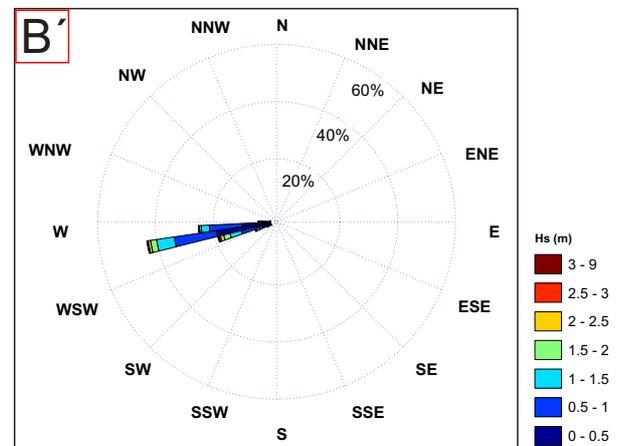


Figura 7.23: Rosa Oleaje. P.Control B' (SC1)

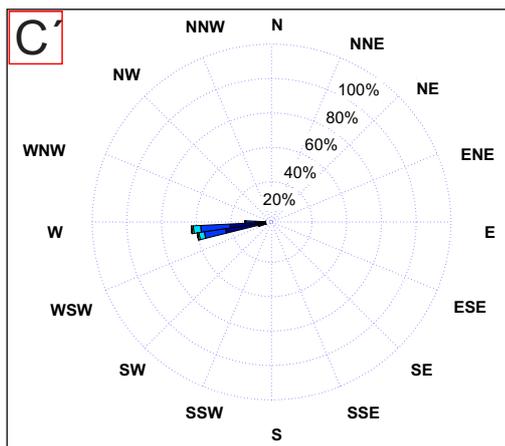


Figura 7.24: Rosa Oleaje. P.Control C' (SC1)

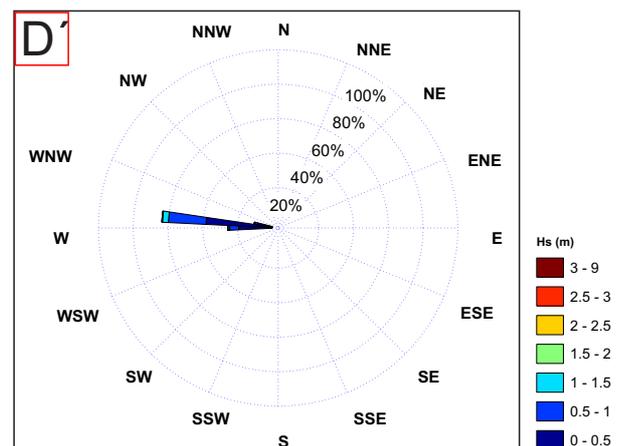


Figura 7.25: Rosa Oleaje. P.Control D' (SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

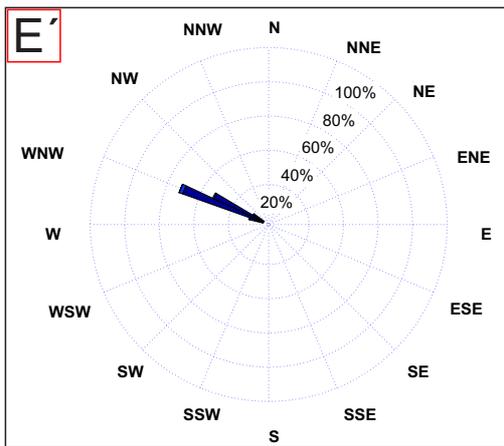


Figura 7.26: Rosa Oleaje. P.Control E' (SC1)

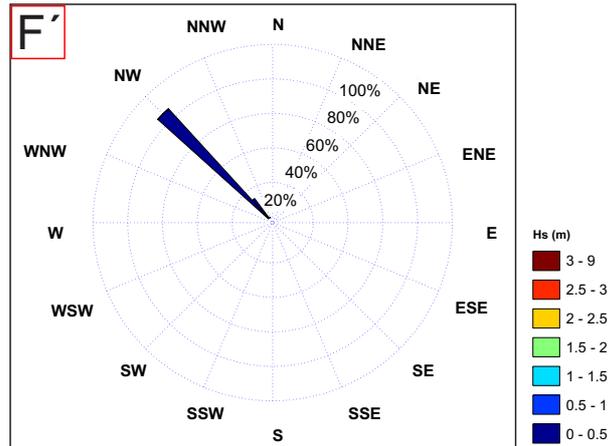


Figura 7.27: Rosa Oleaje. P.Control F' (SC1)

en los puntos de control más internos de la Bahía las direcciones de procedencia de oleaje son muy unidireccionales, la procedencia del oleaje medio de todo un año medio está comprendido en un sector de entre 8-16 grados.

En los puntos de control más externos (A', B' y C') se observan alturas de ola de hasta 3 m. Mientras que en el resto, éstas van disminuyendo hasta el punto más interno (F') dónde la altura de ola máxima no supera los 0.25 m, lo mismo que se observó en los histogramas.

Función de densidad de Weibull

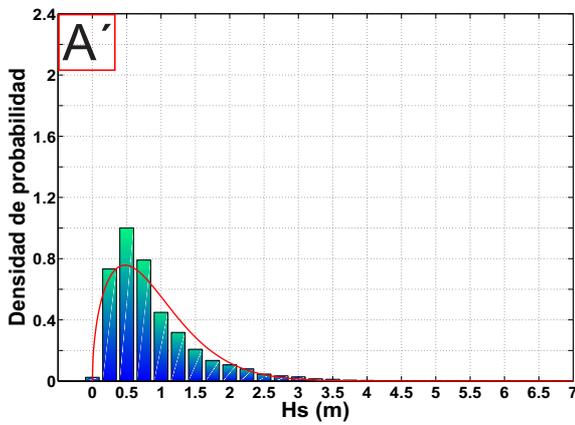


Figura 7.28: F. densidad. P.Control A' SC1

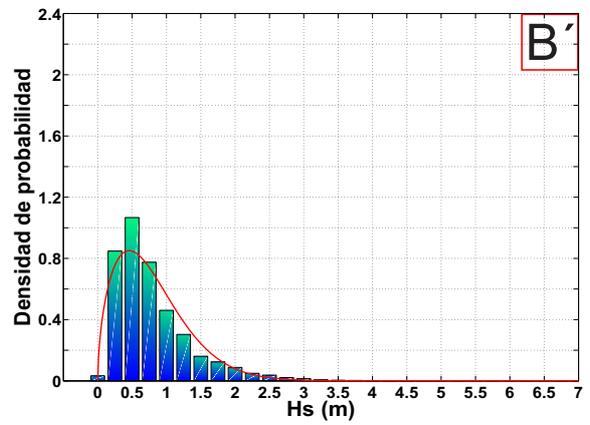


Figura 7.29: F. densidad. P.Control B' SC1

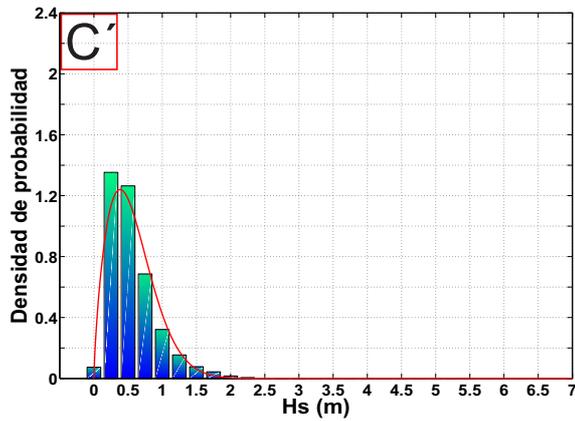


Figura 7.30: F. densidad. P.Control C' SC1

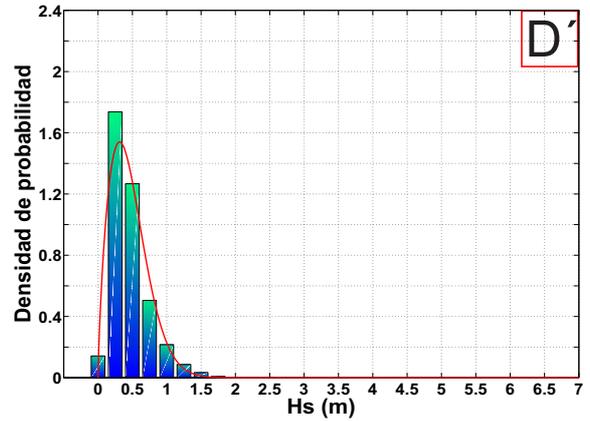


Figura 7.31: F. densidad. P.Control D' SC1

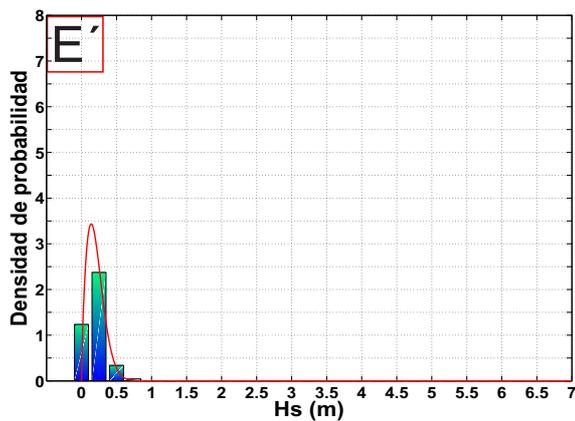


Figura 7.32: F. densidad. P.Control E' SC1

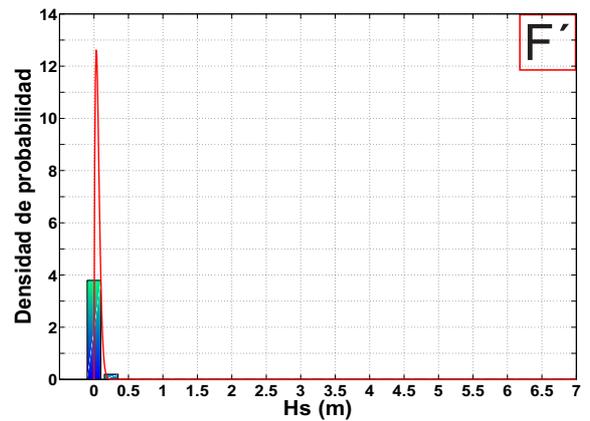


Figura 7.33: F. densidad. P.Control F' SC1

La evolución de la función de densidad, pasa de ser ancha y de poca altura en el punto de control A' a ser estrecha y picuda en el punto F'. Mientras que en los puntos de control

externos el rango de alturas de ola llega hasta los 3 m, en los puntos de control internos no excede de los 0.25 m.

**Resultante media anual**

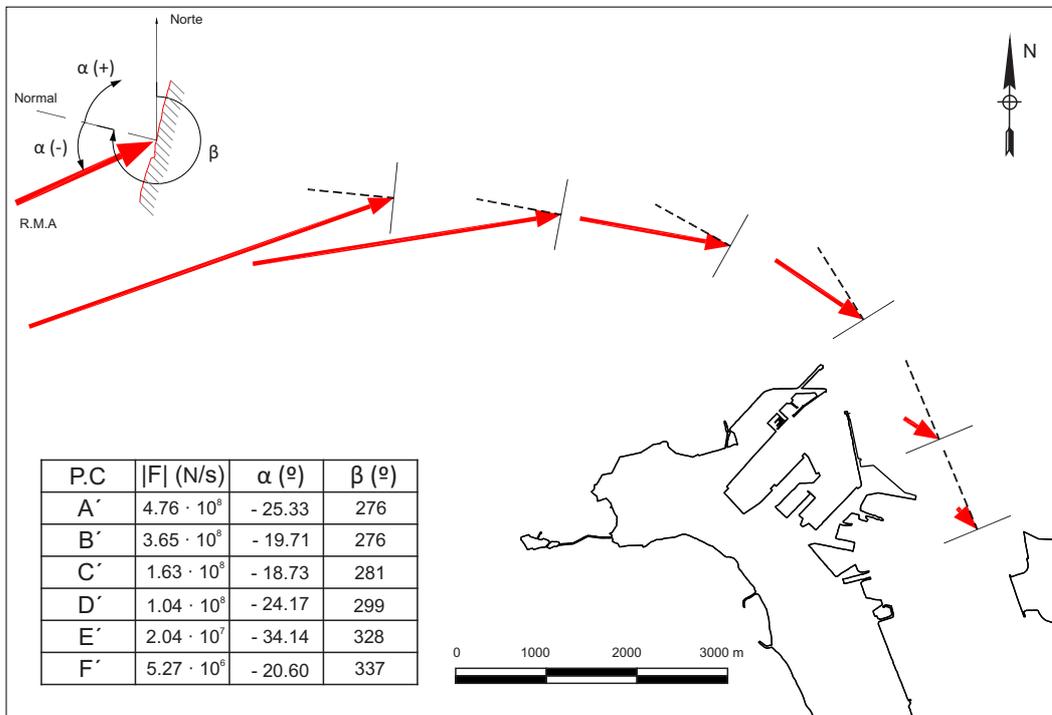


Figura 7.34: Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC1)

Se ha representado la resultante media anual en seis puntos de control a lo largo del canal de navegación para analizar como varía ésta conforme se aproxima hacia la zona de la terminal. El resultado es que el módulo de dicho vector se va reduciendo hasta dos ordenes de magnitud y su dirección oscila entre 20 y 35 grados respecto a la normal en cada punto de control.

Operatividad

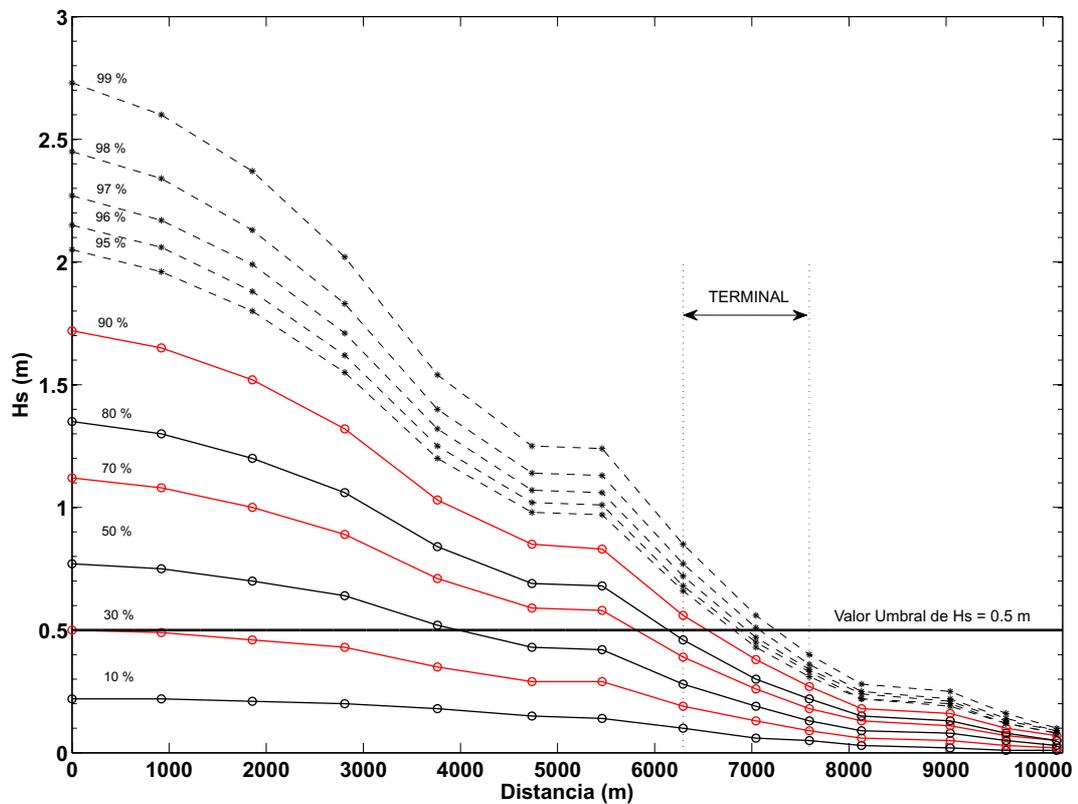


Figura 7.35: Gráfico de operatividad. Terminal sin ampliación Puerto de Cádiz (SC1)

Para el cálculo de las curvas de operatividad se han tomado 14 puntos a lo largo del canal de navegación en los que se ha calculado en cada uno de ellos la función de distribución de Weibull para obtener la altura de ola que solamente es superada un: 10, 30, 50, 70, 80, 90, 95, 96, 97, 98 y 99 por ciento de veces en un año medio. Uniendo dichos puntos se obtienen las curvas.

Conjuntamente se ha representado la zona de la nueva terminal y el valor umbral de altura de ola que delimita la operatividad en la nueva terminal del puerto. Para el cálculo de este valor se ha tomado la tabla 8.1 de la ROM 3.1-99 (Recomendaciones para Obras Marítimas) en donde se especifican las condiciones límites de operación de buques en muelles y panatales. Habría que diferenciar tres situaciones: Atraque de buques, Paralización operaciones de carga y descarga y permanencia de buques en muelle. Pero debido a que la nueva terminal es de contenedores, la única limitación que se impone a buques portacontenedores es de 0.5 m para el apartado de operaciones de carga y descarga.

Dentro de los límites de la terminal se ha de ver la curva más restrictiva que corta la línea horizontal de altura de ola umbral. Para este escenario uno, el corte se produce con la curva del 83%, lo que quiere decir que:

---

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

---

$$\begin{aligned} \frac{83}{100} = \frac{N \text{ horas}}{365} &\Rightarrow N \text{ horas} = 302 \frac{\text{días SI se puede operar}}{ao} \quad (74\%) \Rightarrow \\ &\Rightarrow N \text{ horas} = 63 \frac{\text{días NO se puede operar}}{ao} \end{aligned} \quad (7.5)$$

Para el escenario 1 (situación actual), el número de horas al año en las que la terminal está operativa es de 302 h (74%).

### 7.1.2. Escenario 2: Nueva terminal

En este segundo escenario la nueva terminal ya está ampliada, pero el canal de navegación aún sigue en sus estado original, sin realizar el dragado.

#### 7.1.2.1. Sector Valdelagrana



Figura 7.36: Puntos de control sector Valdelagrana SC 2.

Histogramas

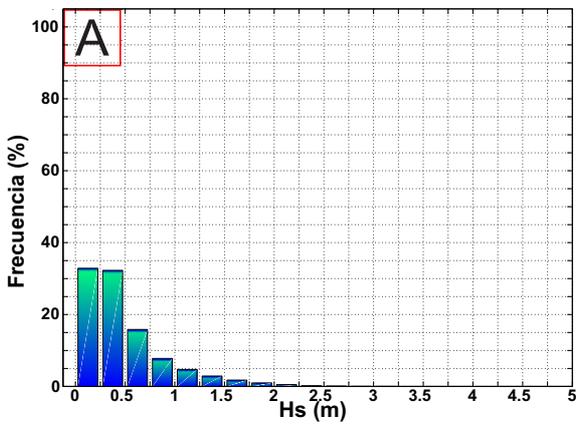


Figura 7.37: Histograma. P.Control A (SC2)

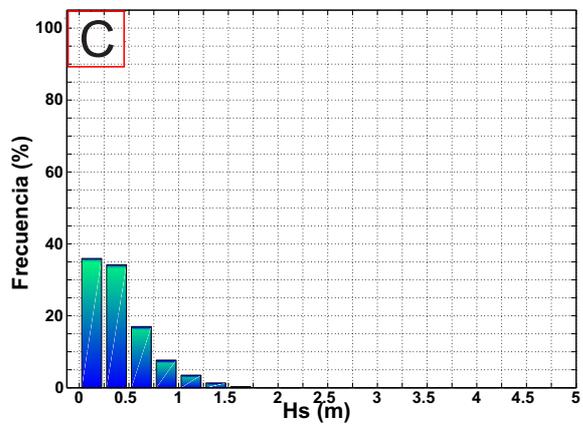


Figura 7.38: Histograma. P.Control C (SC2)

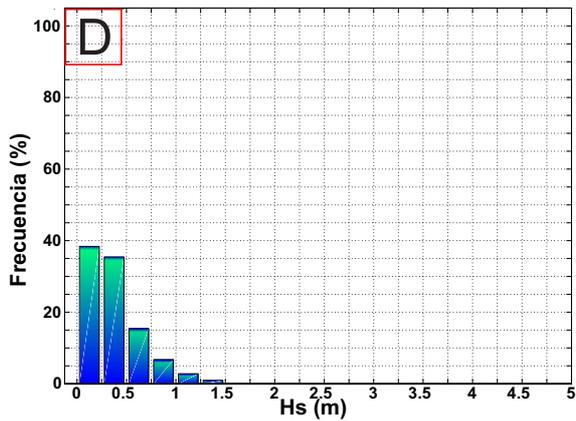


Figura 7.39: Histograma. P.Control D (SC2)

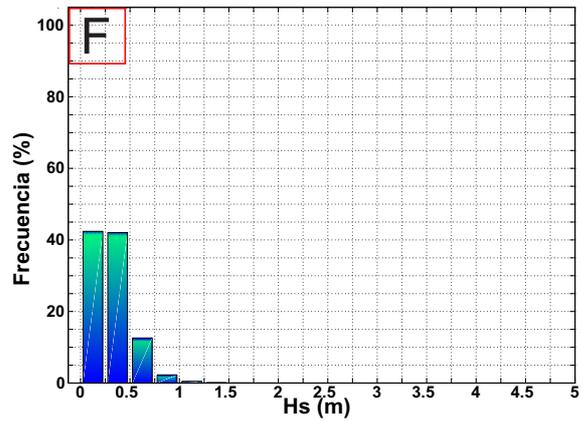


Figura 7.40: Histograma. P.Control F (SC2)

Se observa una disminución de las alturas de ola mayores en los puntos situados más al sur de la playa de Valdelagrana respecto a los situados más al norte. Mientras que las alturas de ola más bajas se hacen más frecuentes.

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

### Rosa de Oleaje

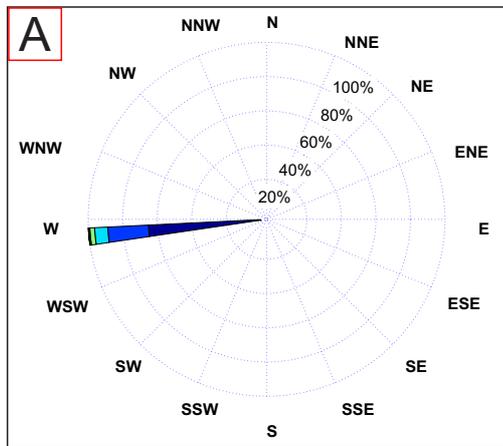


Figura 7.41: Rosa Oleaje. P.Control A (SC2)

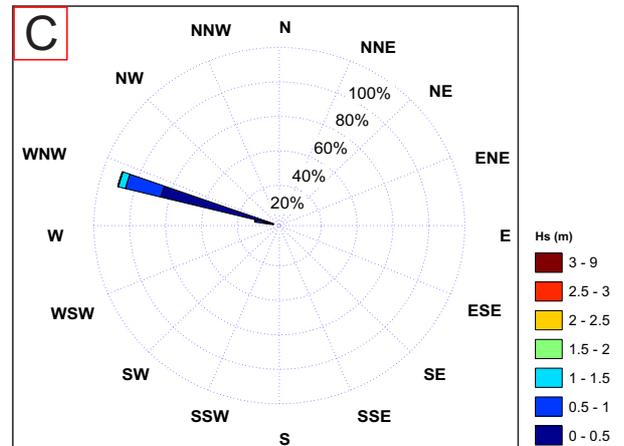


Figura 7.42: Rosa Oleaje. P.Control C (SC2)

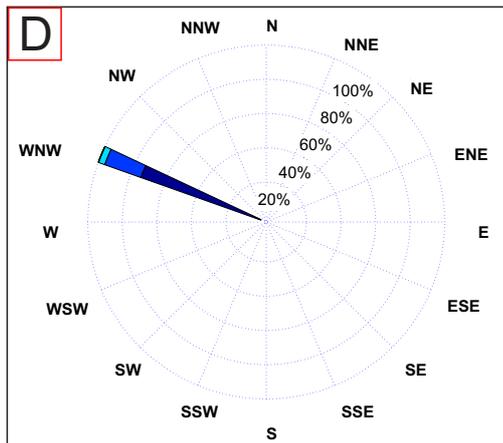


Figura 7.43: Rosa Oleaje. P.Control D (SC2)

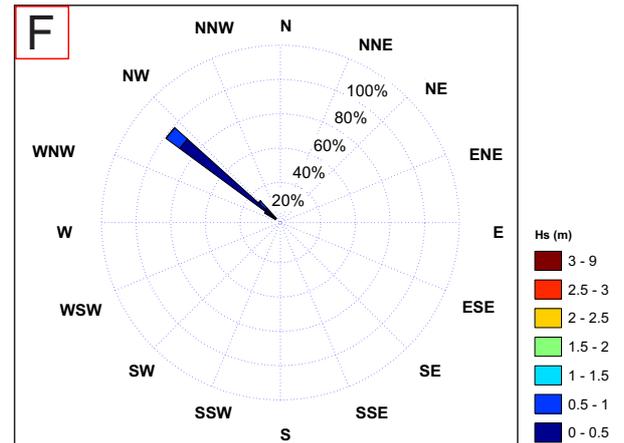


Figura 7.44: Rosa Oleaje. P.Control F (SC2)

Unicidad de direcciones de procedencia del oleaje dentro de un mismo punto de control. Hacia el sur de Valdelagrana las direcciones tienden cada vez más hacia el noroeste.

Función de densidad de Weibull

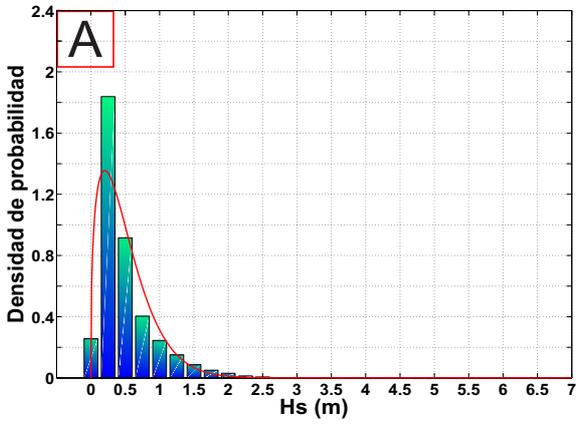


Figura 7.45: F. Densidad. P.Control A (SC2)

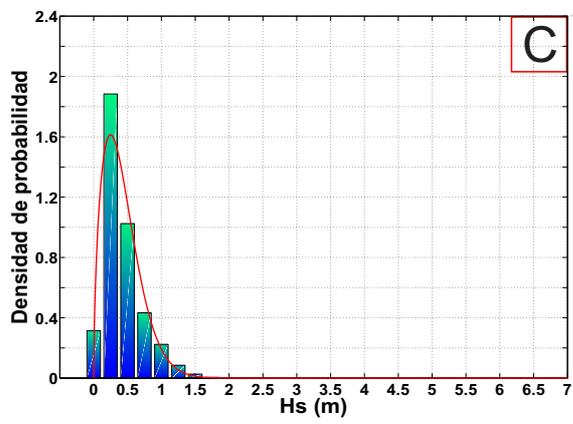


Figura 7.46: F. Densidad. P.Control C (SC2)

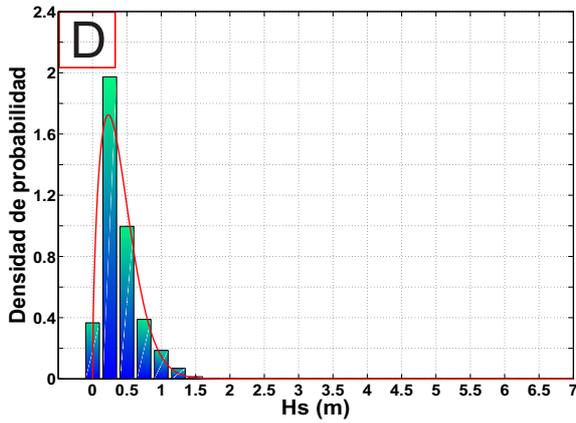


Figura 7.47: F. Densidad. D.Control A (SC2)

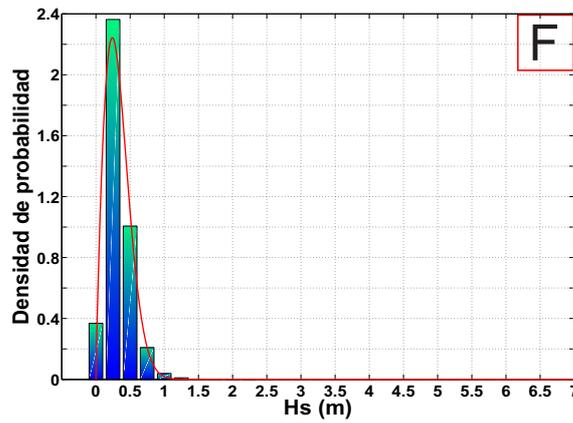


Figura 7.48: F. Densidad. P.Control F (SC2)

En el primer punto de control (A) se observa como todo el oleaje está comprendido entre los [0-2] m, mientras que en el último (F) se concentra entre [0-0.75] m.

Resultante media anual

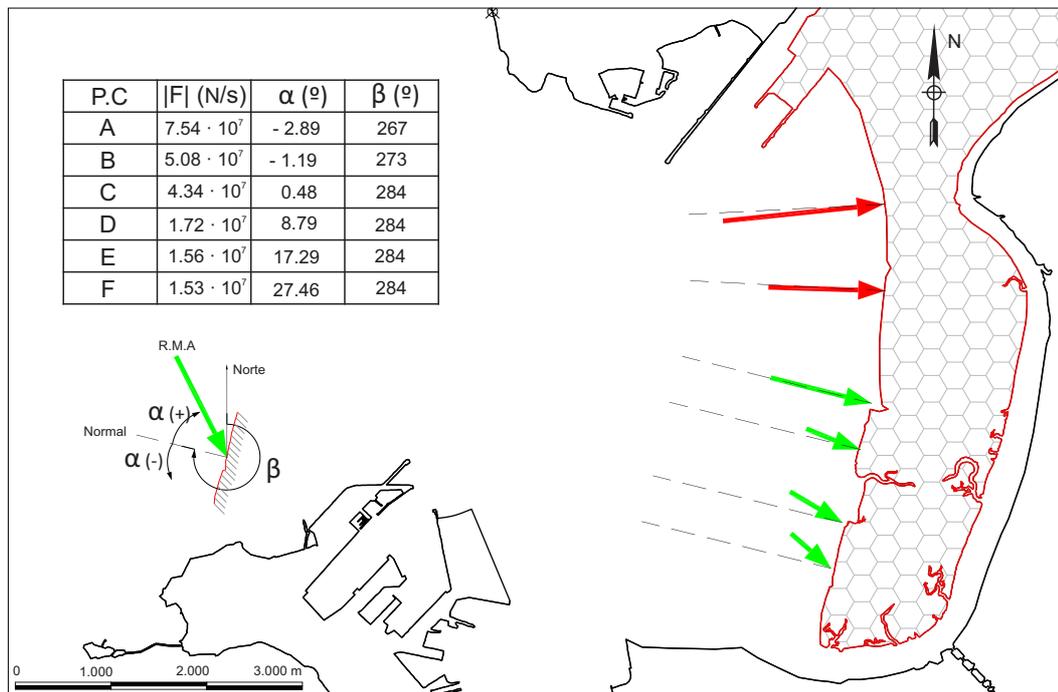


Figura 7.49: Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC2)

Se mantiene la tendencia de módulos mayores en la zona norte y disminuyendo progresivamente hacia el sur a la vez que la inclinación con respecto a la normal también aumenta hacia el sur.

7.1.2.2. Sector canal de navegación



Figura 7.50: Puntos de control sector canal de navegación SC 2

Histogramas

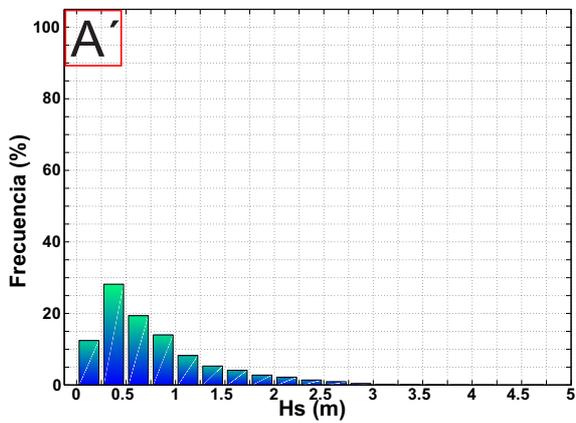


Figura 7.51: Histograma. P.Control A' (SC2)

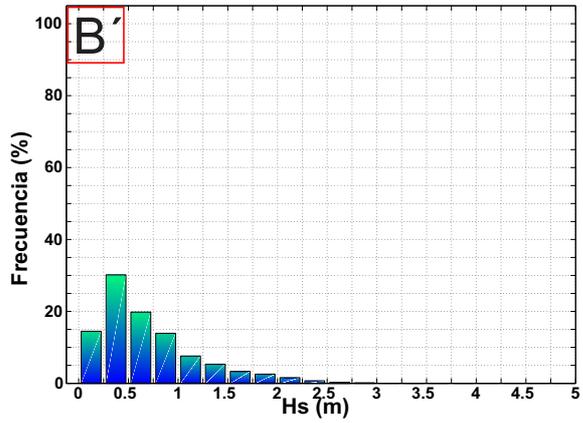


Figura 7.52: Histograma. P.Control B' (SC2)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

---

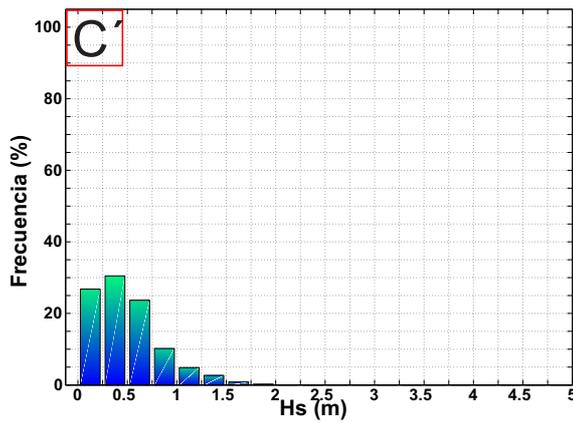


Figura 7.53: Histograma. P.Control C' (SC2)

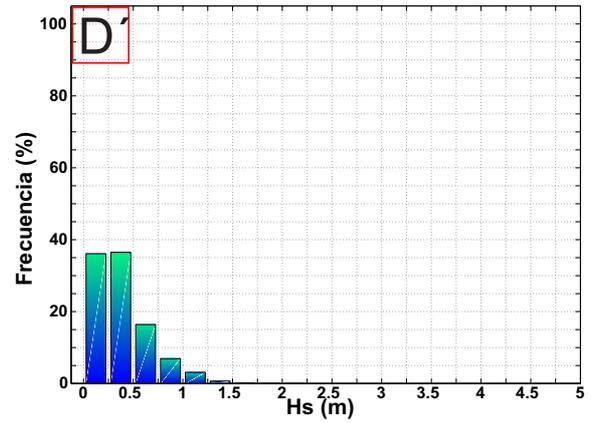


Figura 7.54: Histograma. P.Control D' (SC2)

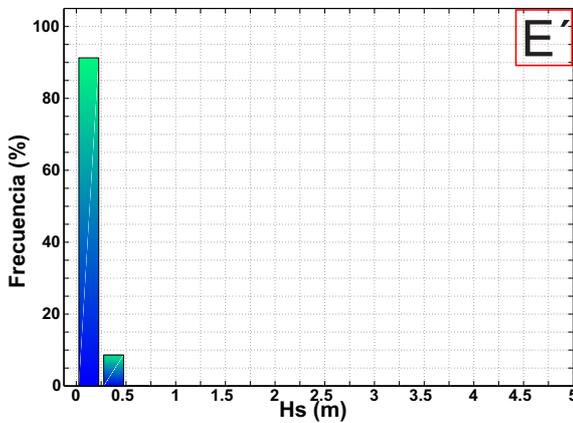


Figura 7.55: Histograma. P.Control E' (SC2)

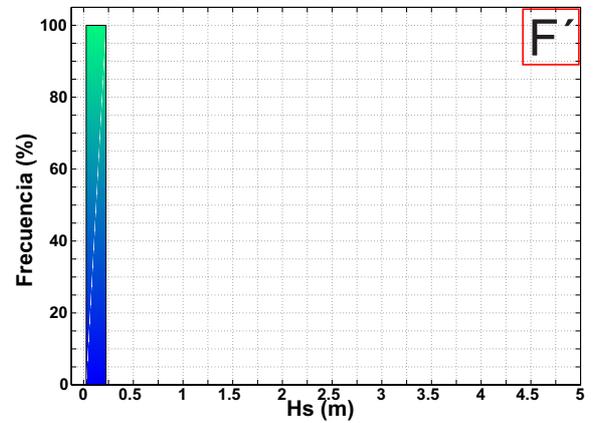


Figura 7.56: Histograma. P.Control F' (SC2)

Rosa de Oleaje

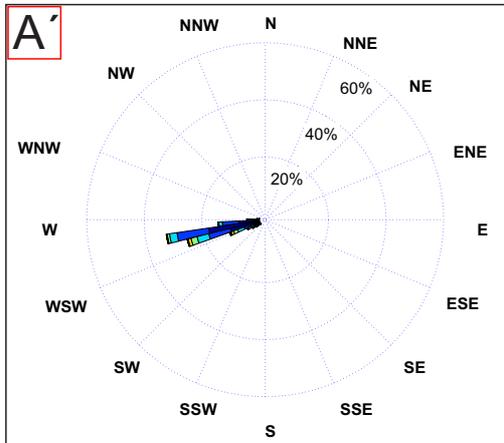


Figura 7.57: Rosa Oleaje. P.Control A' (SC2)

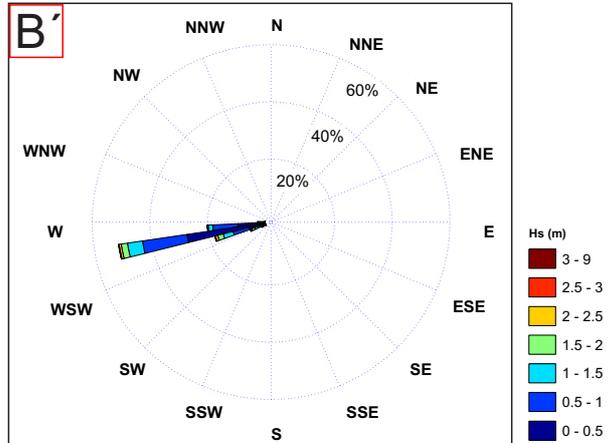


Figura 7.58: Rosa Oleaje. P.Control B' (SC2)

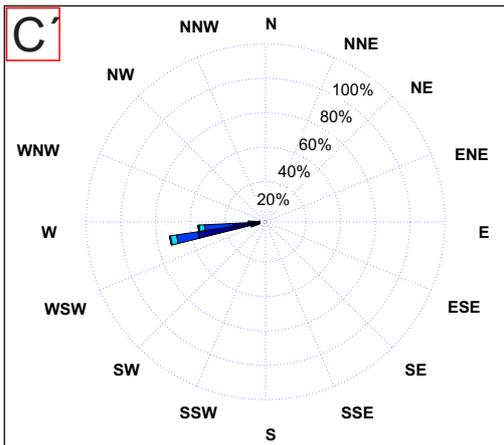


Figura 7.59: Rosa Oleaje. P.Control C' (SC2)

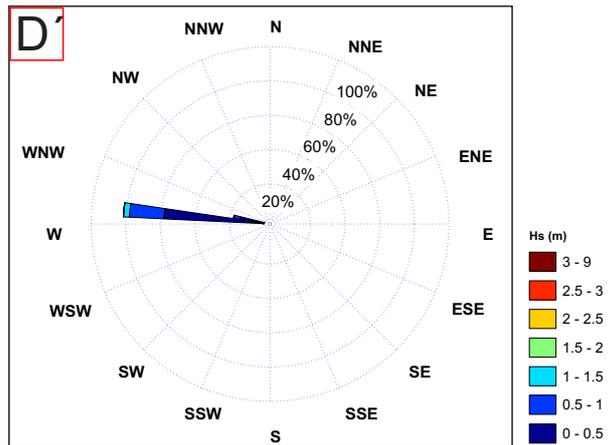


Figura 7.60: Rosa Oleaje. P.Control D' (SC2)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

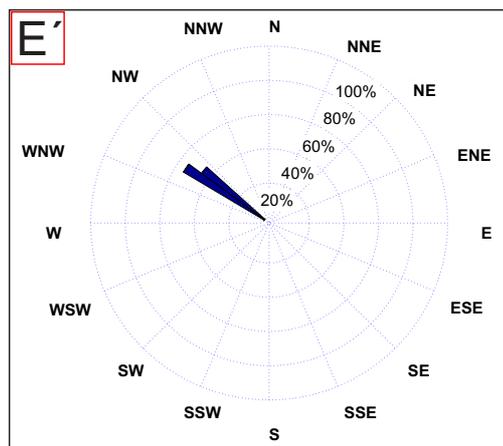


Figura 7.61: Rosa Oleaje. P.Control E' (SC2)

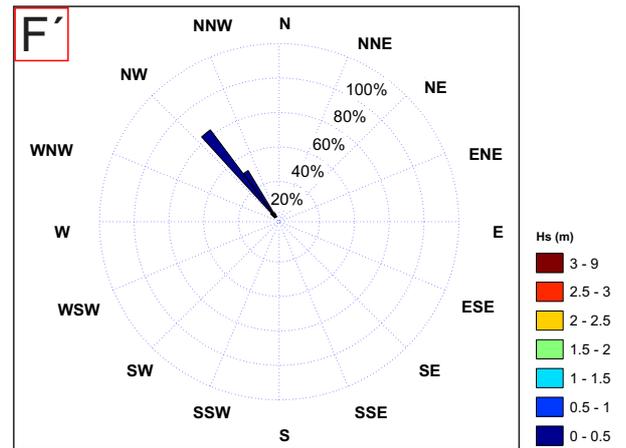


Figura 7.62: Rosa Oleaje. P.Control F' (SC2)

Las alturas de ola son mayores en la zona exterior del canal (puntos de control A', B' y C') y las direcciones varían desde el oeste hacia noroeste conforme los puntos de control se adentran en la Bahía acercándose a la nueva terminal.

Función de densidad de Weibull

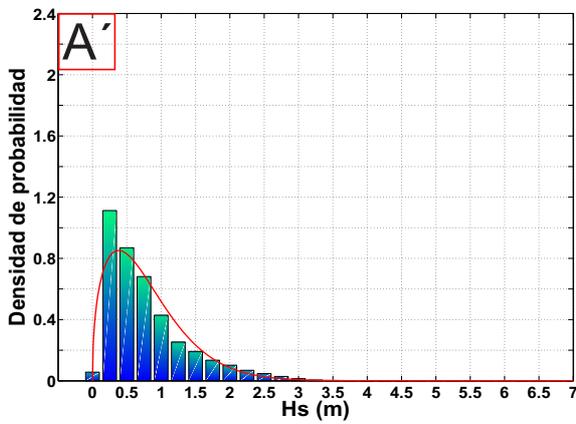


Figura 7.63: F. Densidad. P.Control A' (SC2)

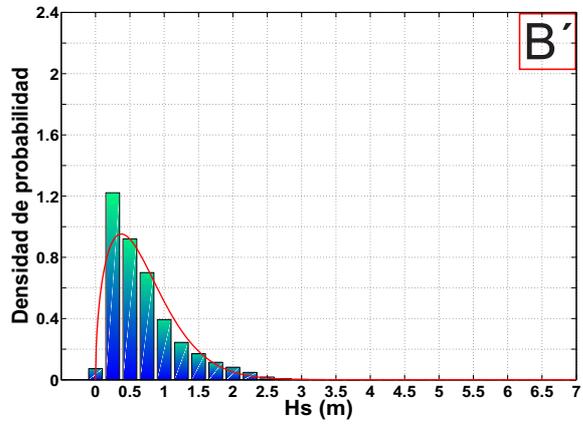


Figura 7.64: F. Densidad. P.Control B' (SC2)

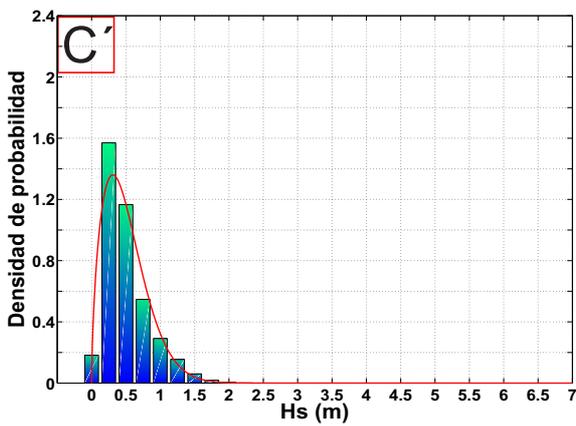


Figura 7.65: F. Densidad. P.Control C' (SC2)

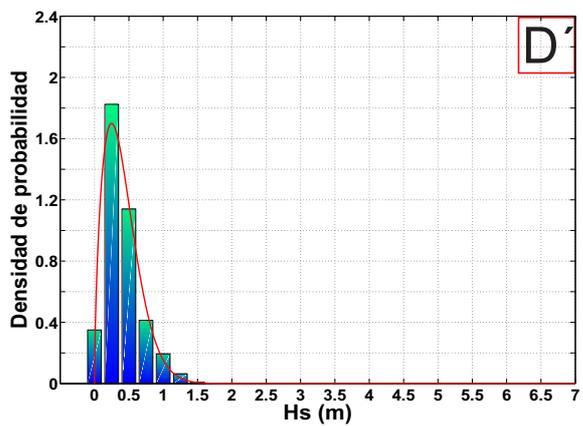


Figura 7.66: F. Densidad. P.Control D' (SC2)

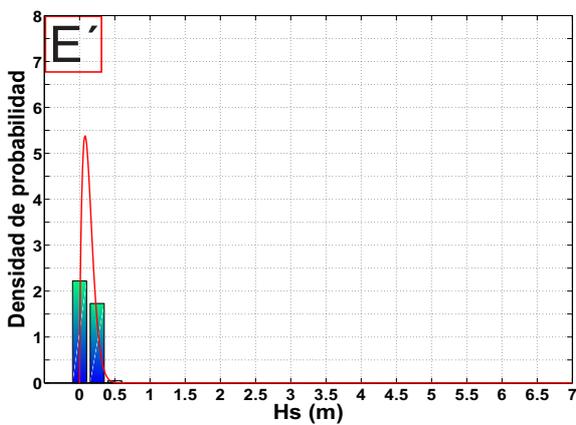


Figura 7.67: F. Densidad. P.Control E' (SC2)

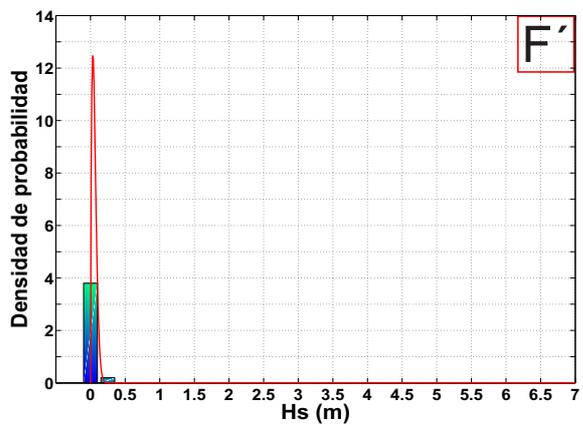


Figura 7.68: F. Densidad. P.Control F' (SC2)

Estas figuras junto con los histogramas permiten conocer la evolución de la altura de ola

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

a medida se recorre el canal de navegación del Puerto de Cádiz.

En los puntos de control (A' y B') se observa una distribución de oleaje característica de zonas abiertas con oleajes entre [0-3] m. En los siguientes puntos de control (C' y D') la altura de ola máxima que se alcanza ya es la mitad, 1.5 m a la vez que el pico de densidad de probabilidad máxima crece. En los puntos (E' y F'), el fenómeno se dispara, siendo la altura de ola máxima alcanzada de 0.5 en E' y 0.25 m en el punto F'. Y el máximo de la gráfica de función de densidad tiende hacia el infinito.

### Resultante media anual

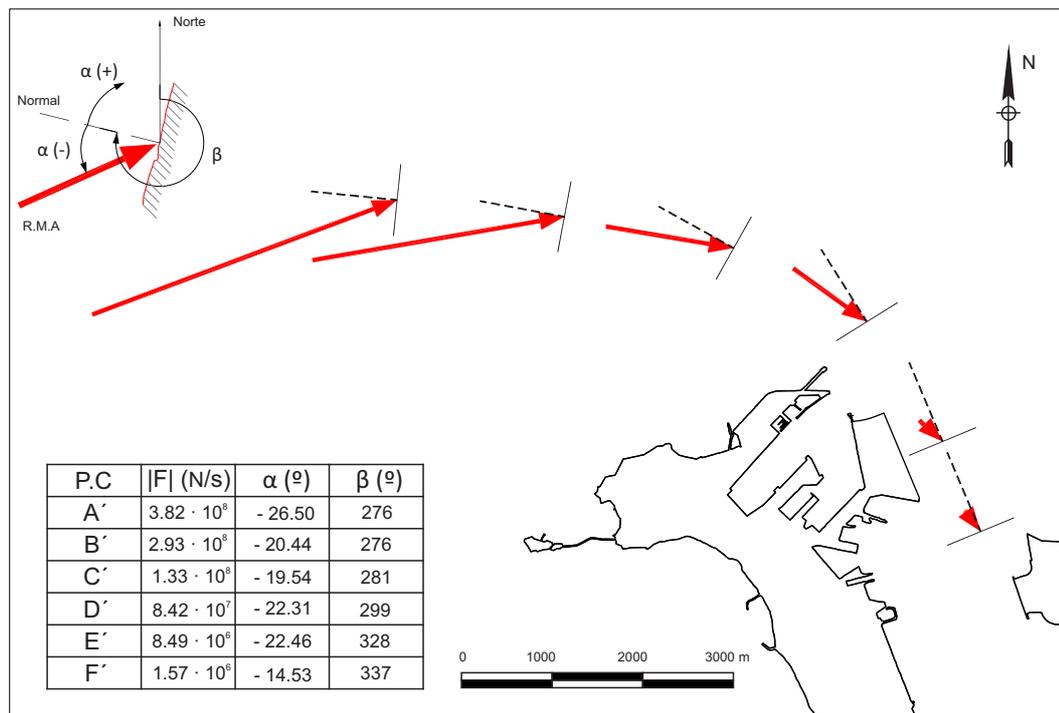


Figura 7.69: Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC2)

Operatividad

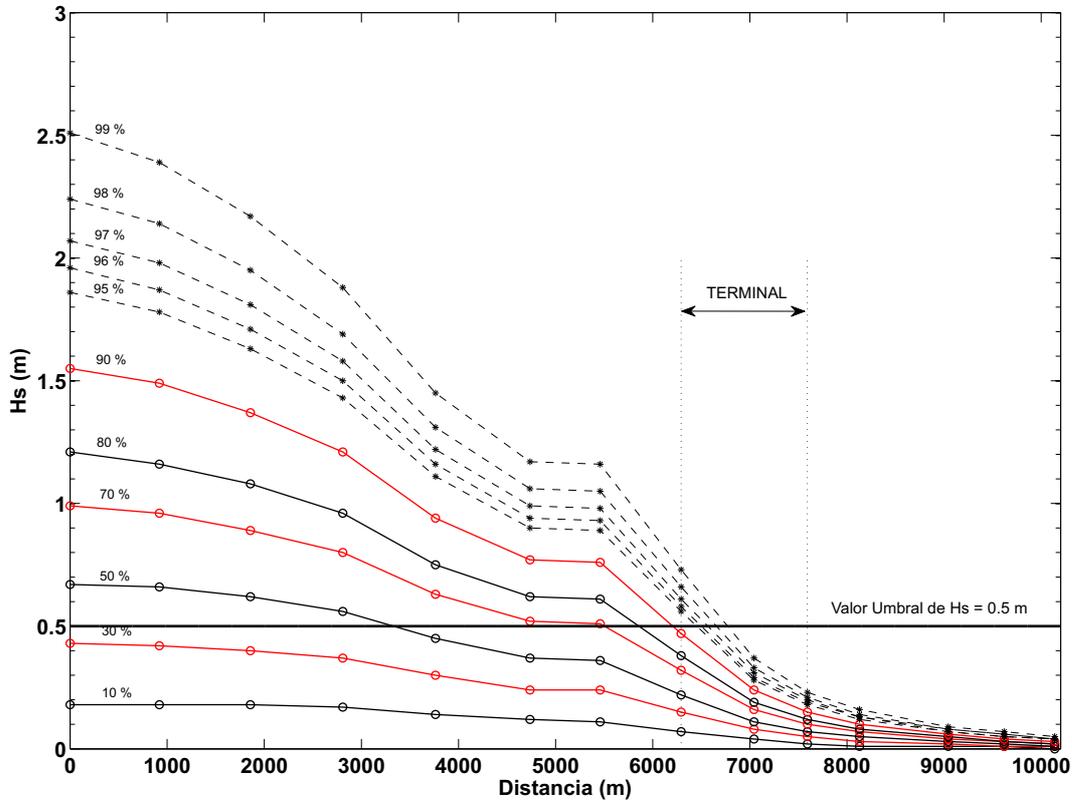


Figura 7.70: Gráfico de operatividad. Terminal ampliada Puerto de Cádiz (SC2)

En el segundo escenario, con la nueva terminal ampliada, pero sin realizar el dragado, hay una mejora de la operatividad para las operaciones de carga y descarga de contenedores. El punto de corte se produce con la línea del 91 %, la altura de ola umbral de 0.5 metros solamente es superada un nueve por ciento de las veces al año.

$$\begin{aligned}
 \frac{91}{100} &= \frac{N \text{ horas}}{365} \Rightarrow N \text{ horas} = 332 \frac{\text{días SI se puede operar}}{ao} (90\%) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow N \text{ horas} = 33 \frac{\text{días NO se puede operar}}{ao}
 \end{aligned}
 \tag{7.6}$$

La mejora de la operatividad en la nueva terminal de contenedores es del 8 %.

### 7.1.3. Escenario 3: Nueva terminal + dragado

#### 7.1.3.1. Sector Valdelagrana

Este escenario se compone de la nueva terminal ampliada y el dragado del canal de navegación. Esta es la situación final una vez terminen las obras del Puerto de Cádiz.

Se analizará para cada uno de los dos sectores: Valdelagrana y Canal de navegación, los histogramas, rosas de oleaje, función de densidad de probabilidad y resultante media anual.



Figura 7.71: Puntos de control sector Valdelagrana SC 3

Histogramas

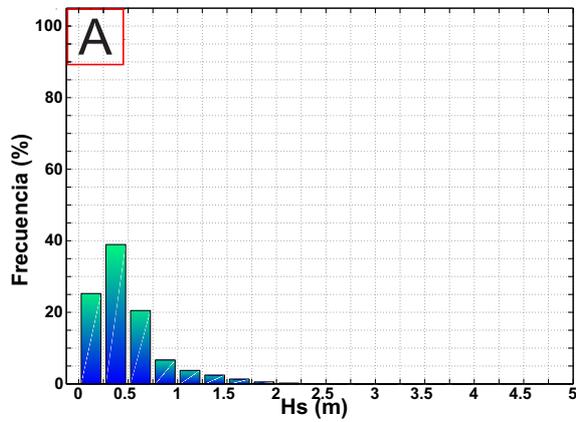


Figura 7.72: Histograma. P.Control A (SC3)

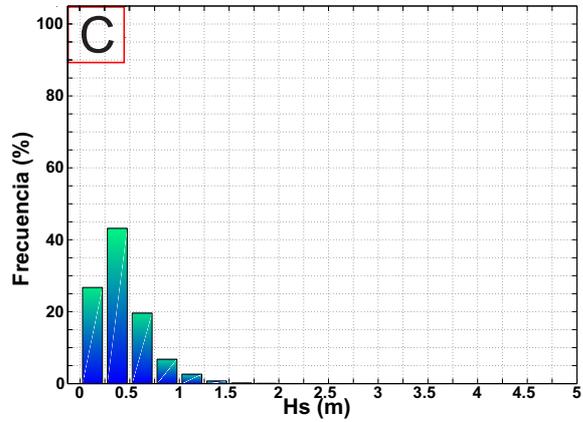


Figura 7.73: Histograma. P.Control C (SC3)

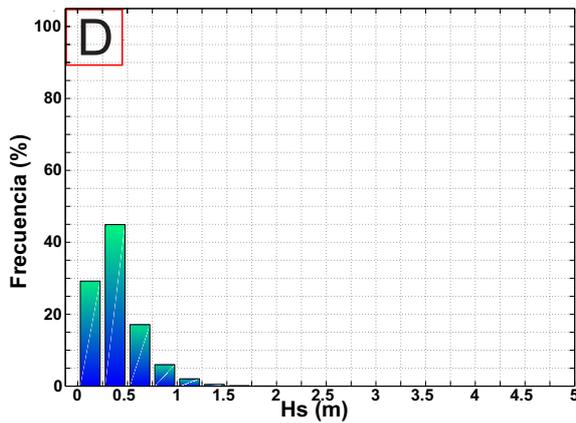


Figura 7.74: Histograma. P.Control D (SC3)

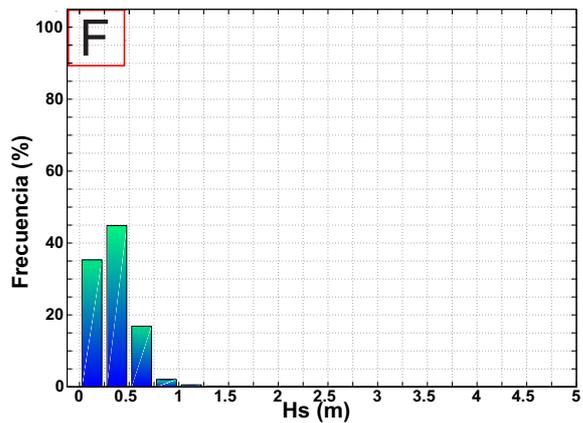


Figura 7.75: Histograma. P.Control F (SC3)

Los cuatro histogramas presentan una forma muy similar. La distribución de alturas de ola no cambia de forma considerable a lo largo de la playa. Las alturas de ola más frecuentes son las comprendidas entre  $[0.25 - 0.5]$  m y la altura de ola máxima se sitúa entorno a los 1.5 m.

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

### Rosa de Oleaje

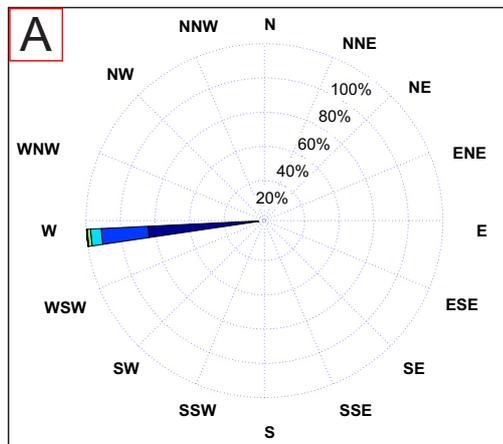


Figura 7.76: Rosa Oleaje. P.Control A (SC3)

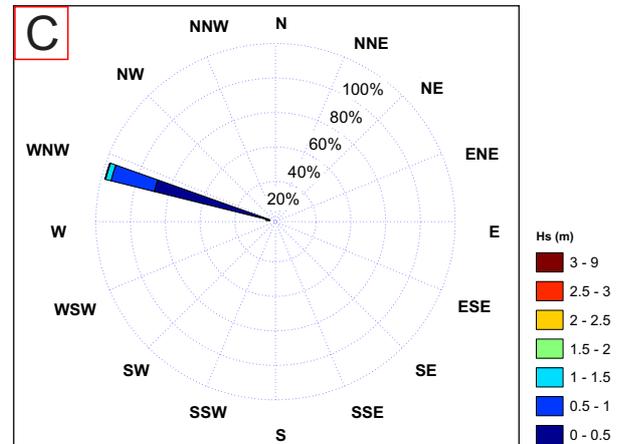


Figura 7.77: Rosa Oleaje. P.Control C (SC3)

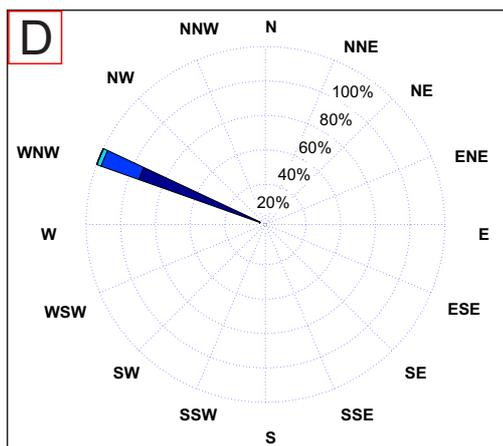


Figura 7.78: Rosa Oleaje. P.Control D (SC3)

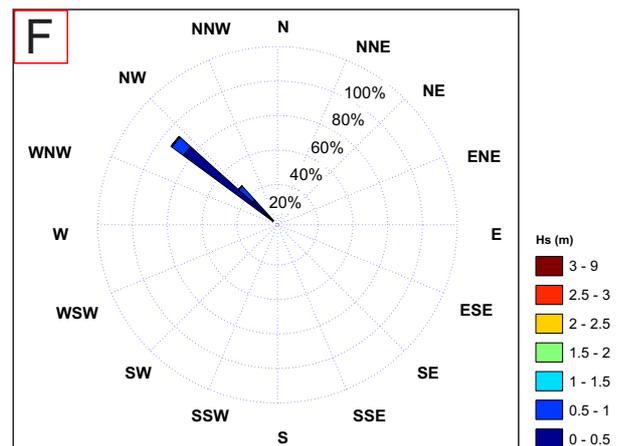


Figura 7.79: Rosa Oleaje. P.Control F (SC3)

Las rosas de oleaje mantienen el mismo patrón que en los escenarios anteriores. Un rango pequeño de direcciones de procedencia para cada punto de control ( $\approx 16$ ) que varían desde Oeste en el punto de control A hacia Noroeste en el F.

Función de densidad de Weibull

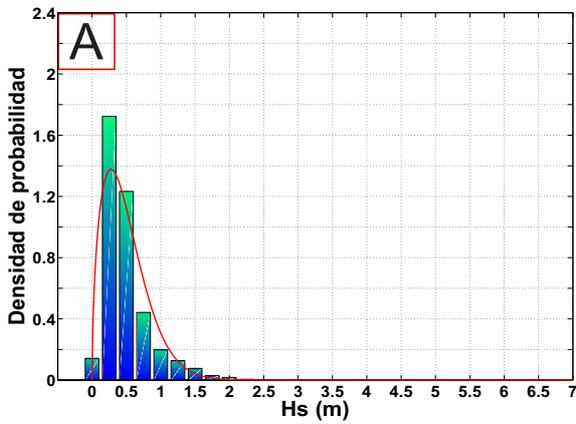


Figura 7.80: F. densidad. P. Control A (SC3)

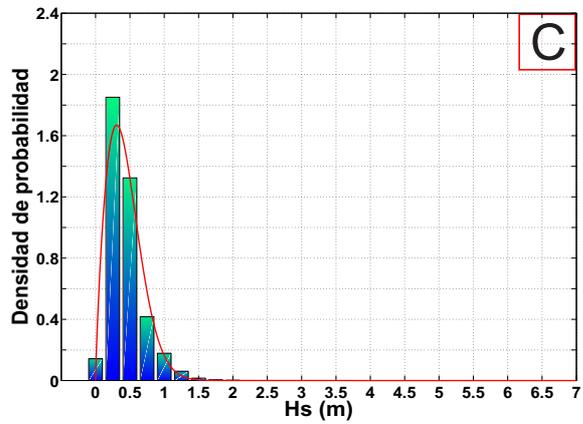


Figura 7.81: F. densidad. P. Control C (SC3)

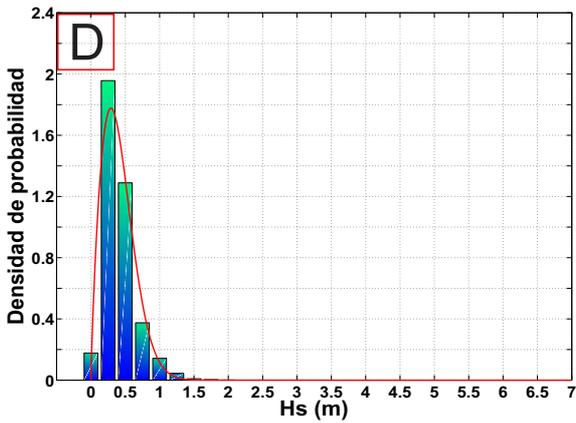


Figura 7.82: F. densidad. P. Control D (SC3)

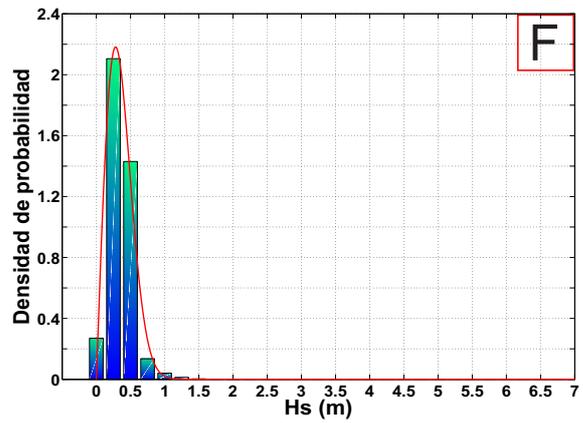


Figura 7.83: F. densidad. P. Control F (SC3)

Entre los puntos A' y el F' no hay un cambio tan brusco como en los otros escenarios. La altura de ola máxima es casi igual en todos los puntos de control y el máximo de la función de densidad no se dispara en los puntos de control finales.

Resultante media anual

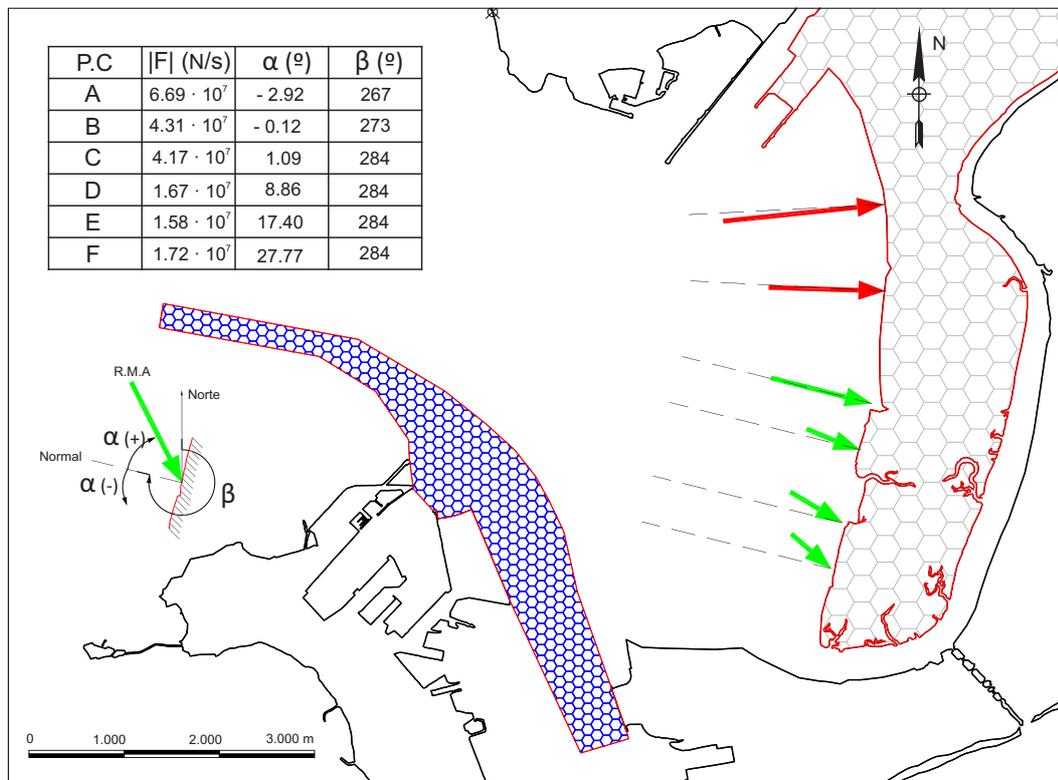


Figura 7.84: Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC3)

Conclusiones similares a los escenarios 1 y 2.

7.1.3.2. Sector canal de navegación

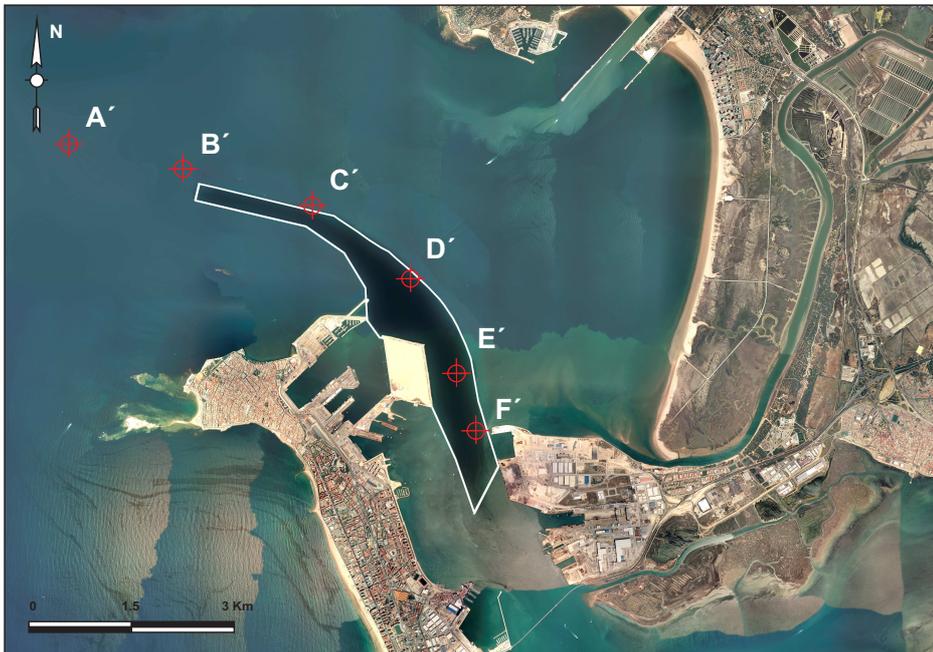


Figura 7.85: Puntos de control sector canal de navegación SC 3

Histogramas

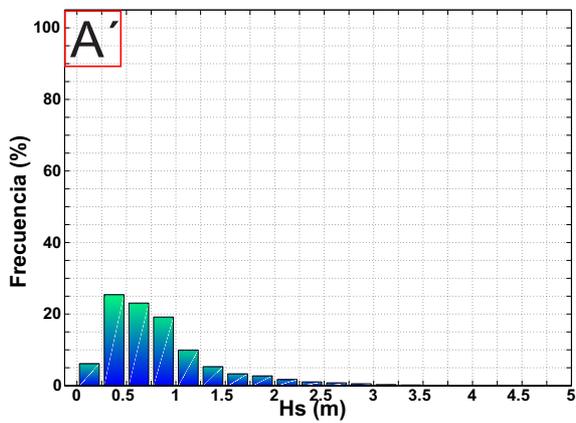


Figura 7.86: Histograma. P.Control A' (SC3)

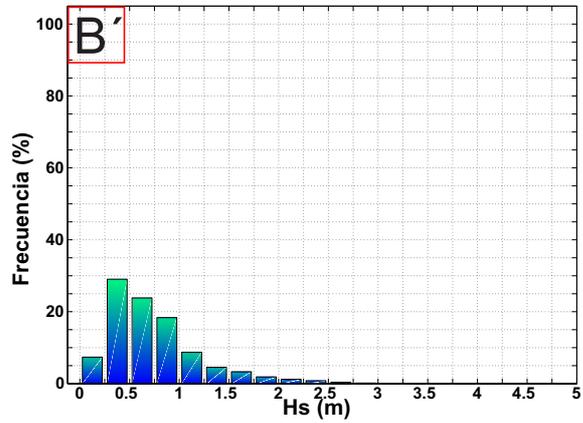


Figura 7.87: Histograma. P.Control B' (SC3)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

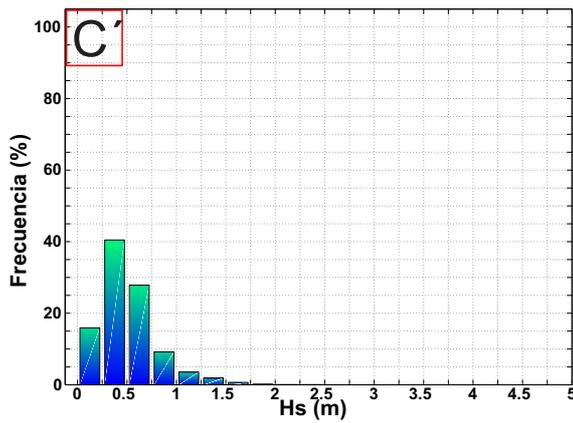


Figura 7.88: Histograma. P.Control C' (SC3)

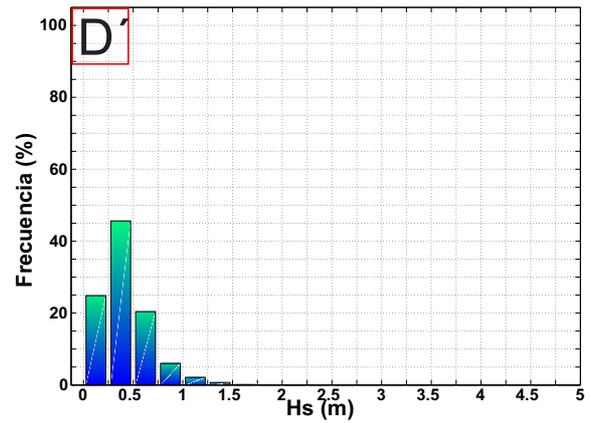


Figura 7.89: Histograma. P.Control D' (SC3)

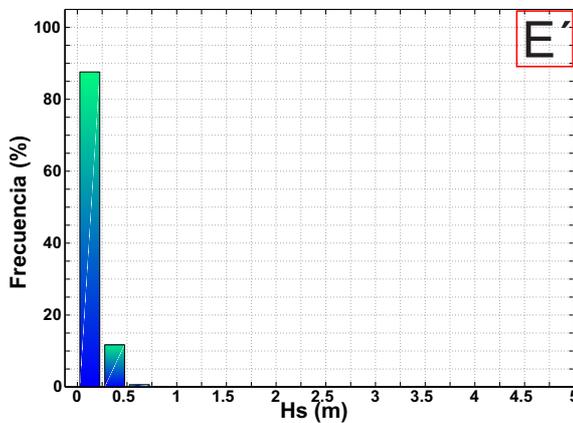


Figura 7.90: Histograma. P.Control E' (SC3)

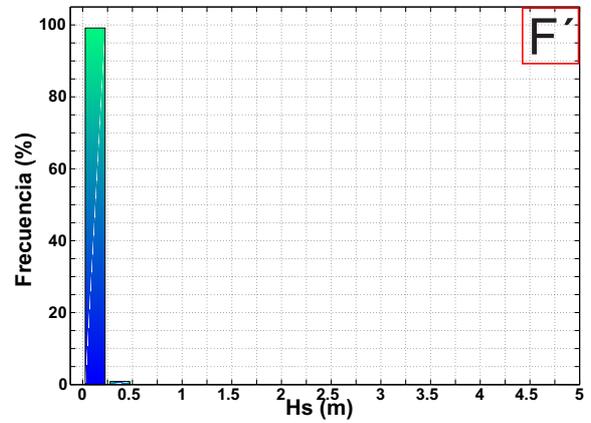


Figura 7.91: Histograma. P.Control F' (SC3)

Aquí los histogramas sí varían de un punto de control a otro. En los primeros, el rango de oleaje alcanza los 3 m de altura con una frecuencia máxima del 25% que se alcanza para olas de [0.25 - 0.5] m, mientras que en los puntos de control finales el 90% del oleaje es <0.25 m.

Rosa de Oleaje

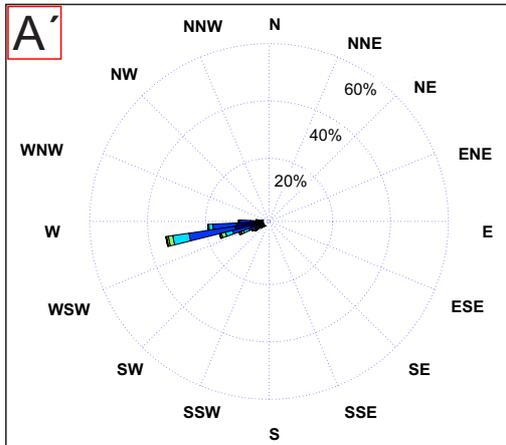


Figura 7.92: Rosa Oleaje. P.Control A' (SC3)

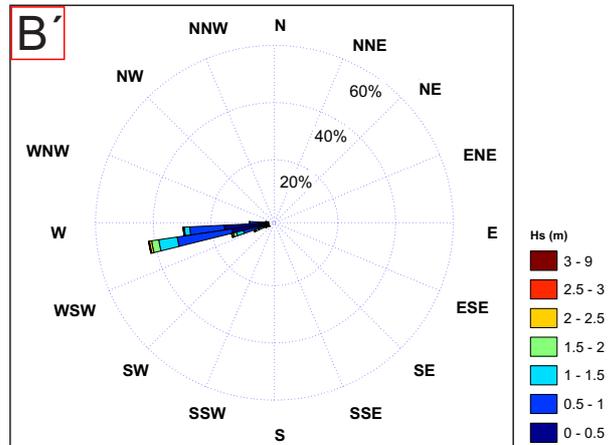


Figura 7.93: Rosa Oleaje. P.Control B' (SC3)

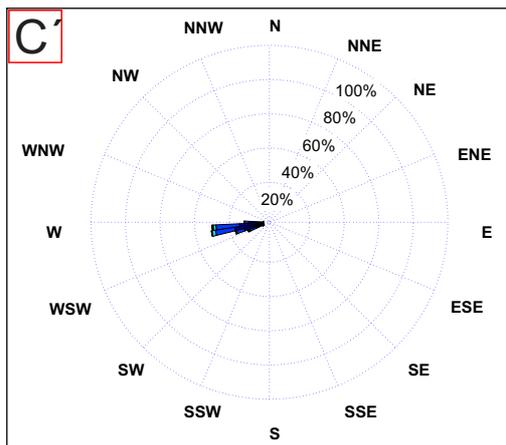


Figura 7.94: Rosa Oleaje. P.Control C' (SC3)

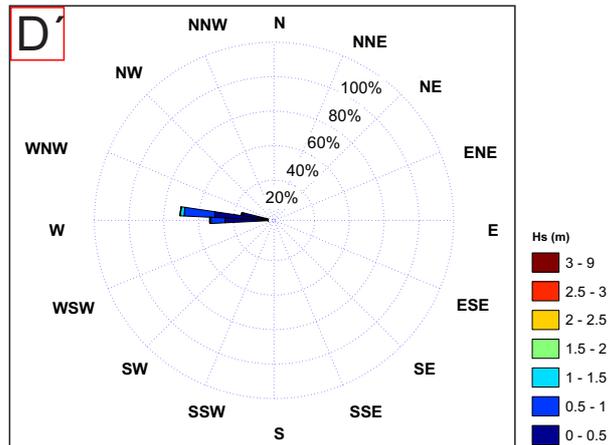


Figura 7.95: Rosa Oleaje. P.Control D' (SC3)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

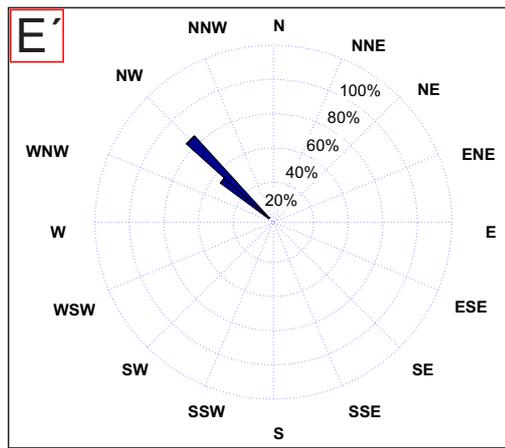


Figura 7.96: Rosa Oleaje. P.Control E' (SC3)

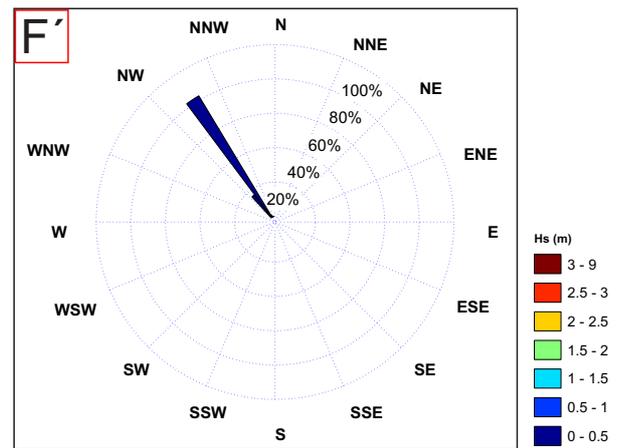


Figura 7.97: Rosa Oleaje. P.Control F' (SC3)

Mismas conclusiones que en los escenarios anteriores.

### Función de densidad de Weibull

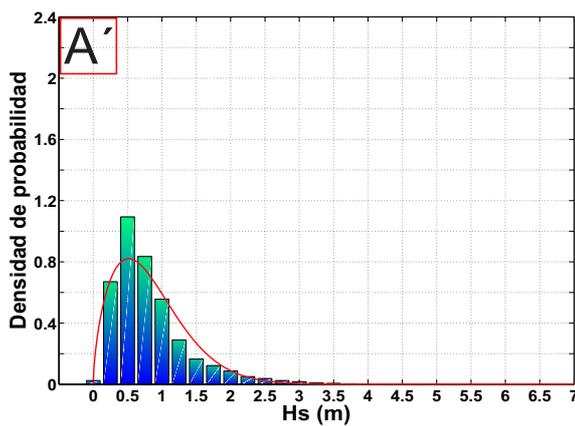


Figura 7.98: F. densidad. P. Control A' (SC3)

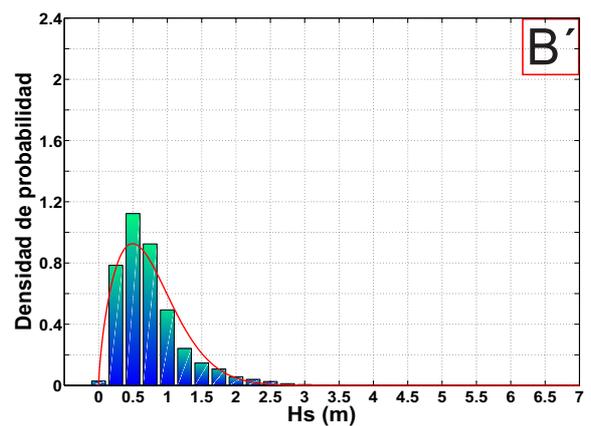


Figura 7.99: F. densidad. P. Control B' (SC3)

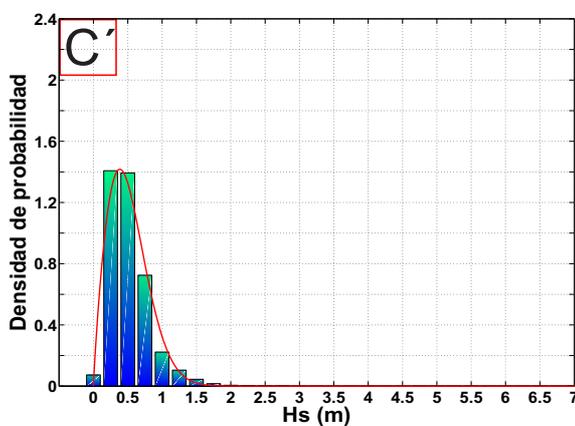


Figura 7.100: F. densidad. P. Control C' (SC3)

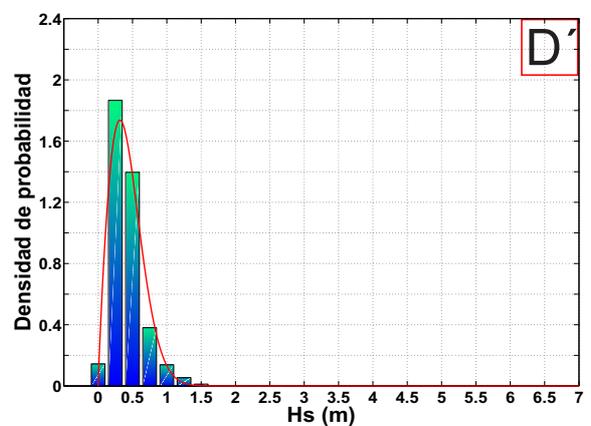


Figura 7.101: F. densidad. P. Control D' (SC3)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

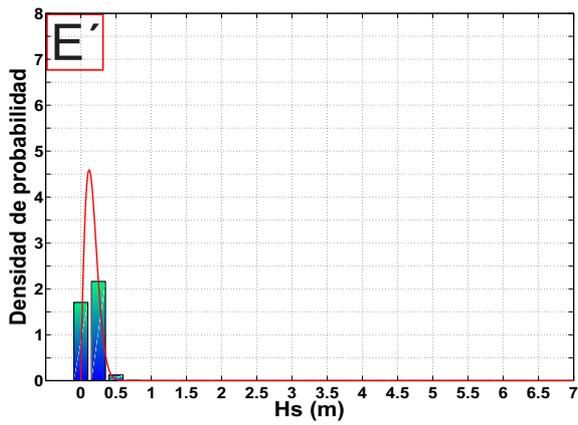


Figura 7.102: F. densidad. P. Control E' (SC3)

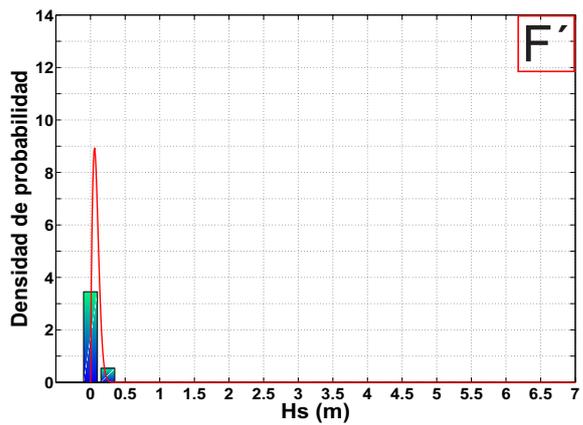


Figura 7.103: F. densidad. P. Control F' (SC3)

Mayor rango de alturas de ola al principio que se va reduciendo a un único rango entre [0 - 0.25] m en los puntos de control finales situados cerca de la nueva terminal.

### Resultante media anual

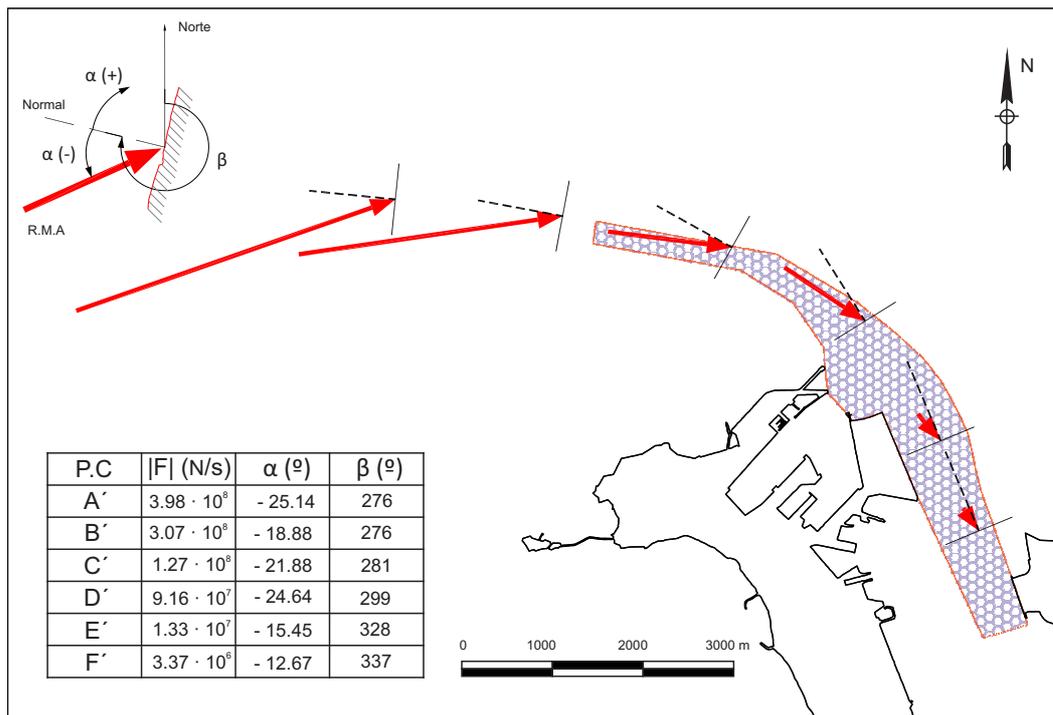


Figura 7.104: Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC3)

Mismas conclusiones que en los escenarios uno y dos.

Operatividad

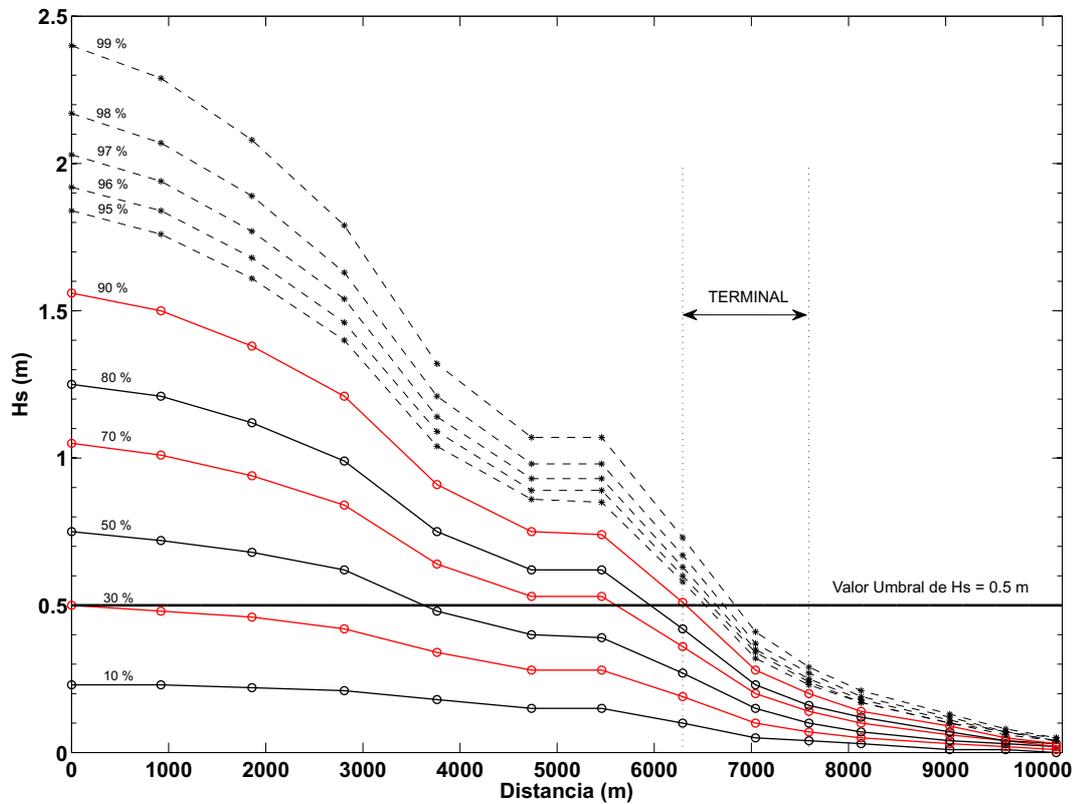


Figura 7.105: Gráfico de operatividad. Terminal ampliada Puerto de Cádiz (SC3)

La realización del dragado no afecta apenas a la operatividad de la nueva terminal. En el escenario 2 (sólo ampliación de la terminal) el corte de la altura de ola umbral era con la curva del 91 %, ahora, con el dragado realizado, el corte es con la del 90 %. Lo que se traduce en:

$$\begin{aligned} \frac{90}{100} &= \frac{N \text{ horas}}{365} \Rightarrow N \text{ horas} = 328 \frac{\text{días SI se puede operar}}{ao} \quad (89\%) \Rightarrow \\ &\Rightarrow N \text{ horas} = 37 \frac{\text{días NO se puede operar}}{ao} \end{aligned} \quad (7.7)$$

La mejora de la operatividad en la nueva terminal de contenedores es del 7 %.

7.1.4. Escenario 2 vs Escenario 1

Hasta ahora se han analizado cada uno de los escenarios por separado, sus histogramas, rosas de oleaje, función de densidad de Weibull y resultante media anual. Pero lo interesante es poder comparar estos resultados entre los diferentes escenarios mediante la técnica de superposición. Así se verá de forma clara la influencia de las actuaciones sobre la hidrodinámica de la Bahía.

7.1.4.1. Sector Valdelagrana

Histogramas

Se comparan los histogramas del escenario 2 con los del escenario 1 para la playa de Valdelagrana:

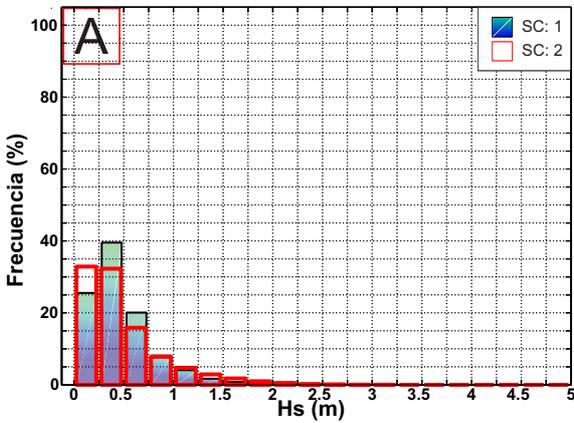


Figura 7.106: Hist. P.Control A (SC2 vs SC1)

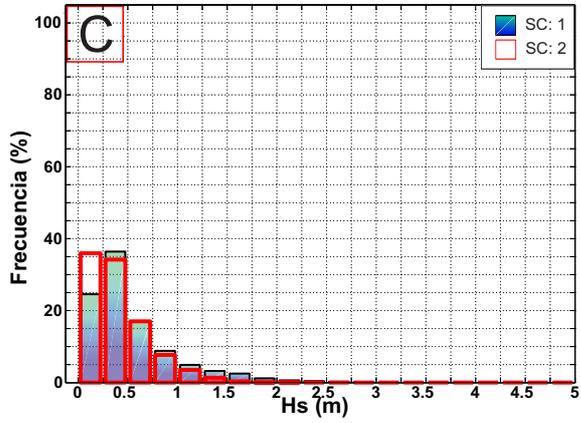


Figura 7.107: Hist. P.Control C (SC2 vs SC1)

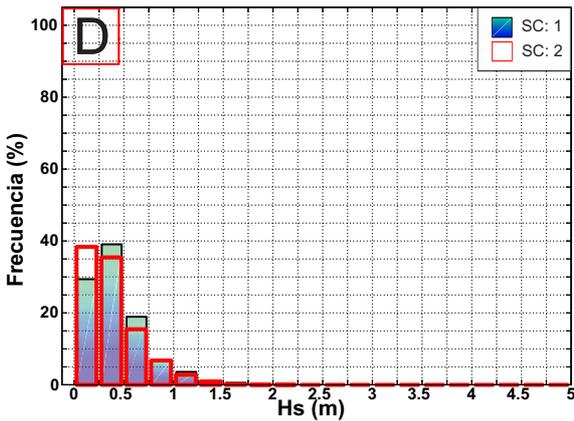


Figura 7.108: Hist. P.Control D (SC2 vs SC1)

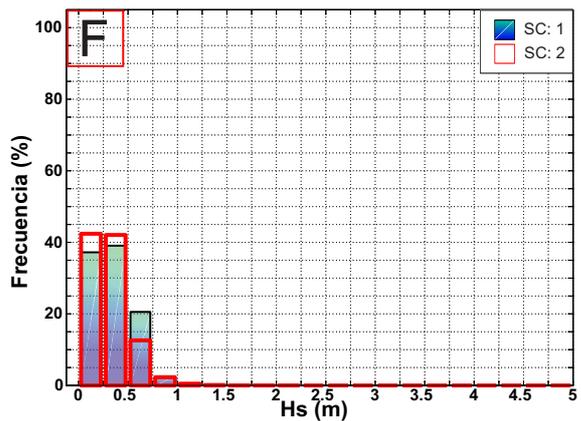


Figura 7.109: Hist. P.Control F (SC2 vs SC1)

Se representan con el borde negro y fondo a color los histogramas del escenario 1, sobre ellos los histogramas del escenario 2 sin fondo y con un borde rojo para dar un mayor contraste. Se ve como en los cuatro puntos de control las alturas de ola menores de 0.25 m se hacen más frecuentes al ampliar la terminal (escenario 2), mientras que el resto de alturas de

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

ola disminuyen su frecuencia.

Con la ampliación de la terminal se reduce la altura del oleaje que alcanza la playa de Valdelagrana, reduciéndose la tasa de energía por parte del oleaje para movilizar sedimento y producir una modificación de dicho tramo de litoral.

### Rosa de Oleaje

Se comparan las rosas de oleaje del escenario 2 con los del escenario 1 para la playa de Valdelagrana:

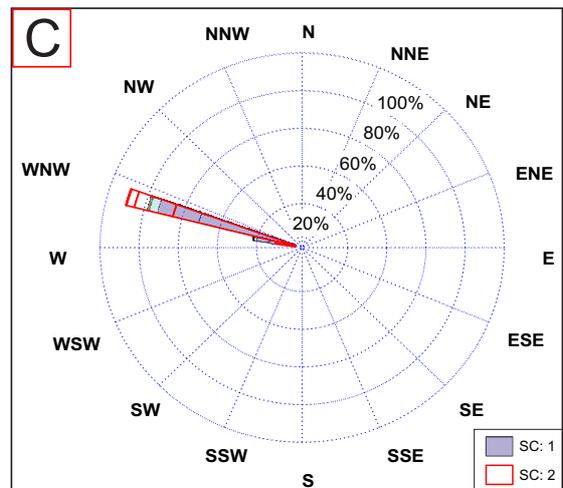
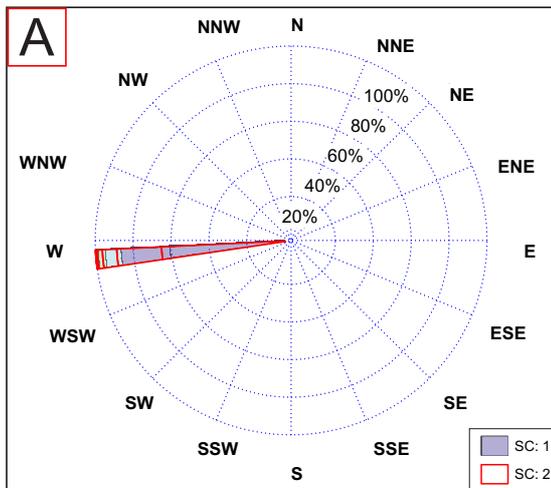


Figura 7.110: Rosa O. P.Control A (SC2 vs SC1) Figura 7.111: Rosa O. P.Control C (SC2 vs SC1)

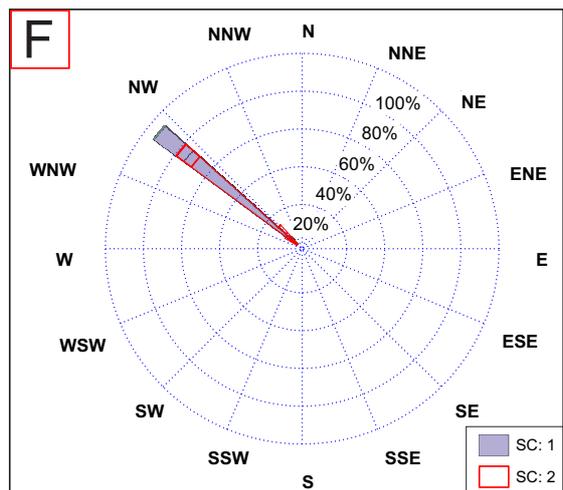
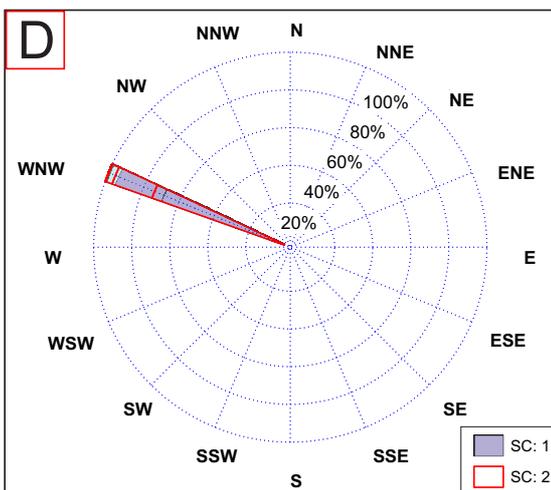


Figura 7.112: Rosa O. P.Control D (SC2 vs SC1) Figura 7.113: Rosa O. P.Control F (SC2 vs SC1)

La ampliación de la nueva terminal de contenedores no modifica las direcciones del oleaje a lo largo de la playa de Valdelagrana, aunque si reduce las alturas de ola.

Función de densidad de Weibull

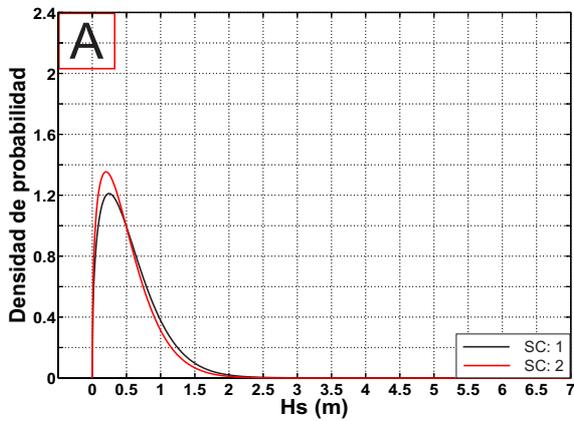


Figura 7.114: F.dens. P. Control A (SC2 vs SC1)

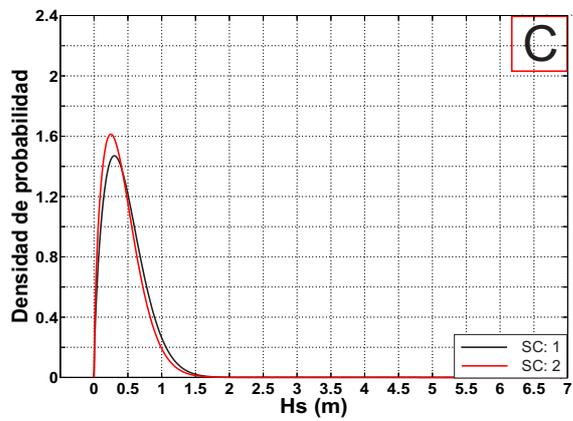


Figura 7.115: F.dens. P. Control C (SC2 vs SC1)

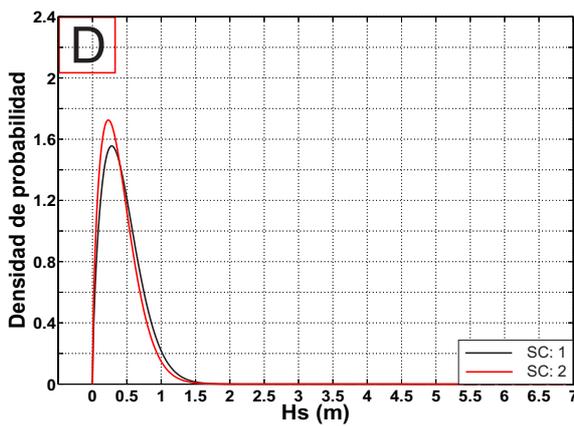


Figura 7.116: F.dens. P. Control D (SC2 vs SC1)

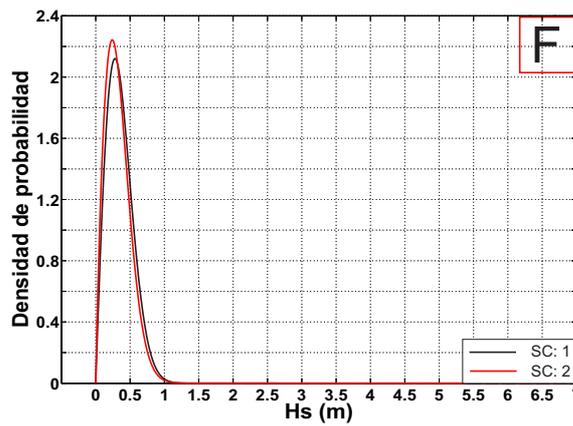


Figura 7.117: F.dens. P. Control F (SC2 vs SC1)

Las funciones de densidad de weibull muestran como en todos los puntos de control se observa para el escenario 2 una mayor frecuencia de las alturas de ola más pequeñas (<0.25 m.) y una menos frecuencia de las alturas de ola a partir de los 0.5 m. Se ratifica el hecho de que a Valdelagrana llegan olas de menor altura con la construcción de la nueva terminal.

Resultante media anual

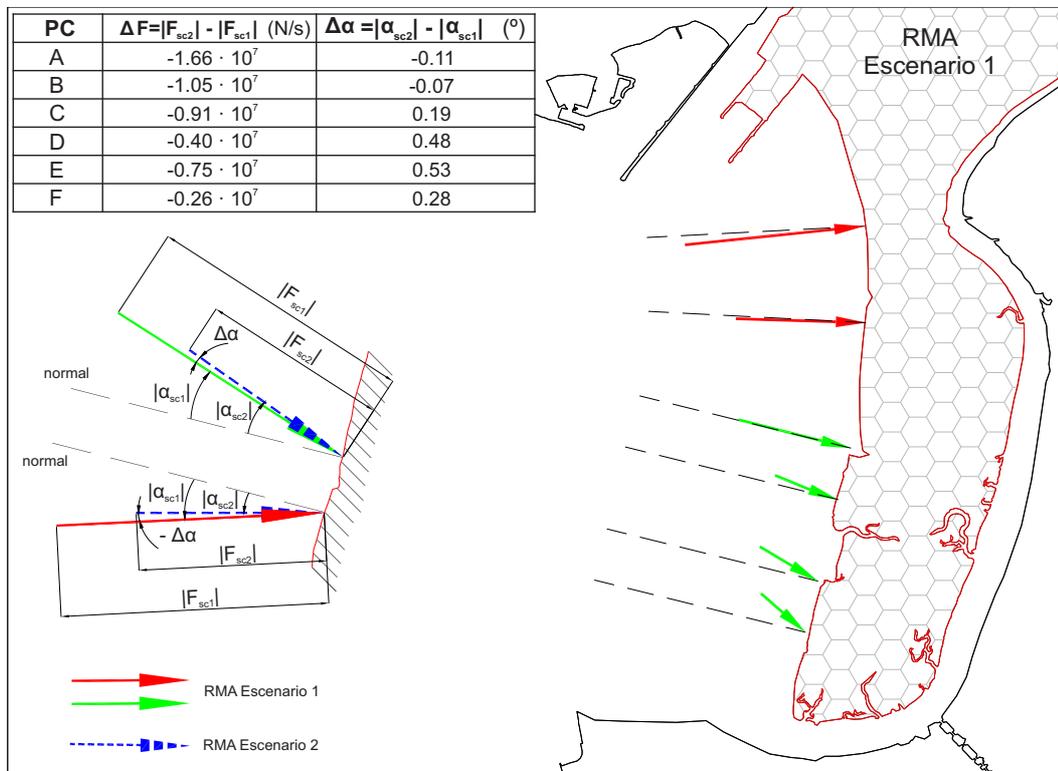


Figura 7.118: Resultante media anual. Sector Valdellagrana (SC2 vs SC1)

La variación de la resultante media anual entre escenarios es uno de los resultados más importantes de este proyecto. Es el mejor indicador de como influye la nueva terminal en la dinámica de la playa de Valdellagrana.

En los histogramas y en las funciones de densidad de Weibull se observó que las alturas de ola que llegaban a la playa de Valdellagrana se hacían menores con la construcción de la terminal y en las rosas de oleaje quedó reflejado que las direcciones de procedencia no sufrían cambios.

En la figura 7.118 se observa como la RMA del escenario 2 respecto a la del 1 tiene variaciones de dirección menores de un grado en todos los puntos de control y su módulo disminuye.

Se puede afirmar que la modificación que supone la ampliación de la terminal de contenedores no tendrá consecuencias sobre la hidrodinámica de la playa de Valdellagrana ni la desembocadura del río San Pedro, ya que el oleaje incidirá con el mismo ángulo que lo estaba haciendo antes de la nueva terminal y con un módulo muy similar. La energía que las olas tienen para movilizar sedimento a lo largo de la playa se reducirá ligeramente debido a que lo hace el módulo de la resultante media anual.

7.1.4.2. Sector canal de navegación

Se comparan los resultados entre el escenario 1 y el 2 para el sector canal de navegación.

Histogramas

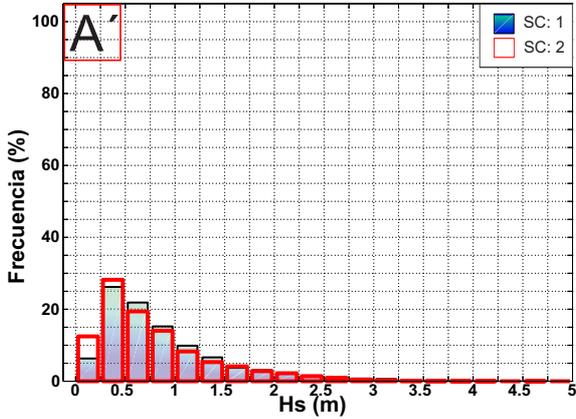


Figura 7.119: Hist. P.Control A' (SC2 vs SC1)

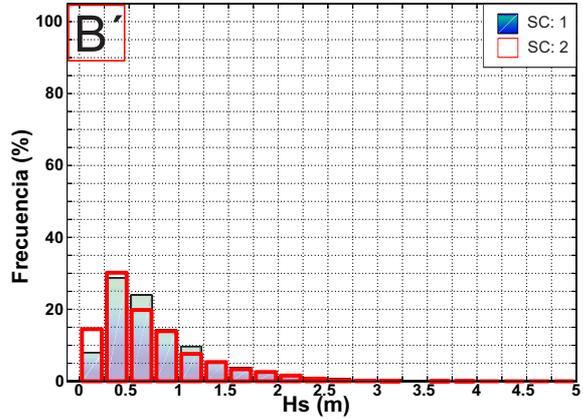


Figura 7.120: Hist. P.Control B' (SC2 vs SC1)

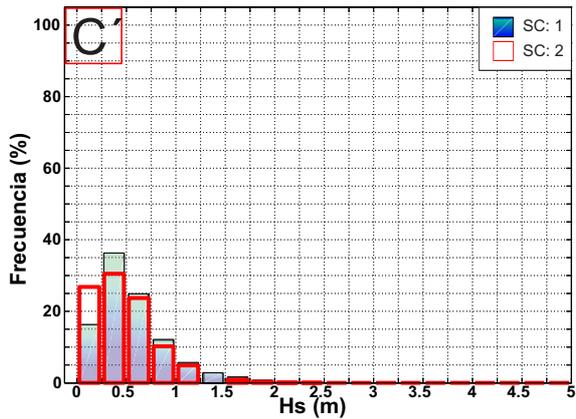


Figura 7.121: Hist. P.Control C' (SC2 vs SC1)

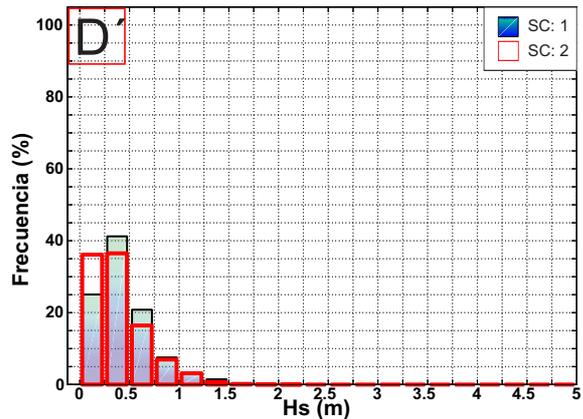


Figura 7.122: Hist. P.Control D' (SC2 vs SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

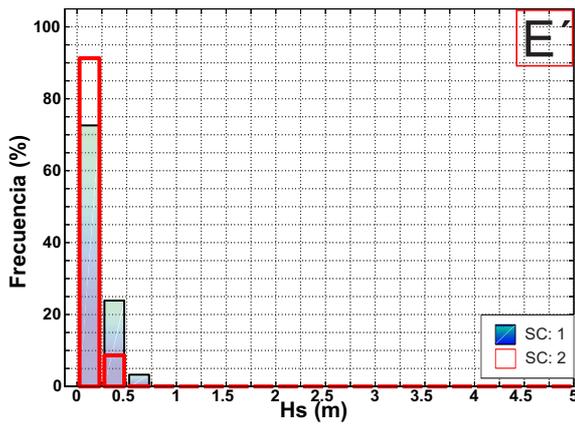


Figura 7.123: Hist. P.Control E' (SC2 vs SC1)

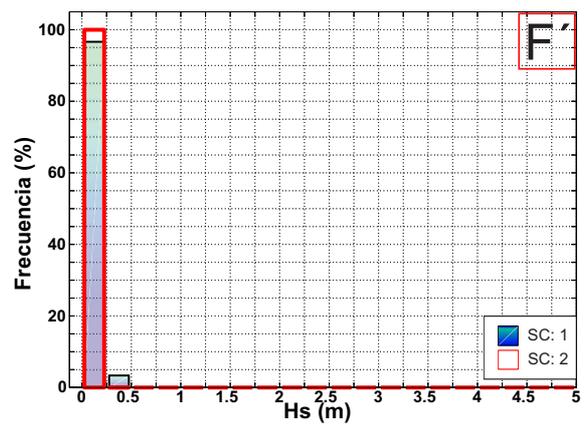


Figura 7.124: Hist. P.Control F' (SC2 vs SC1)

Para los puntos de control más externos (A' y B') se observa que los dos histogramas son muy similares. A medida que los puntos de control se acercan a la zona más interna de la Bahía, el rango de alturas de ola se reduce a [0 - 0.5] m para los dos escenarios, pero en el escenario 2 esta reducción es más acentuada como se observa en las figuras.

La ampliación de la terminal de contenedores produce que las alturas de ola se reduzcan al llegar a sus proximidades.

### Rosa de Oleaje

Se comparan las rosas de oleaje entre el escenario 2 y el 1.

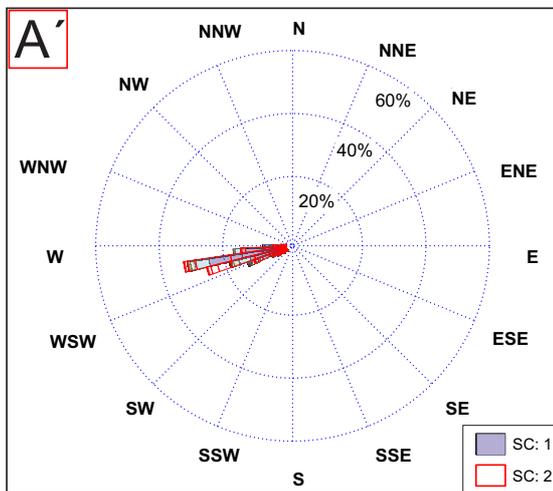


Figura 7.125: Rosa O. P.Control A' (SC2 vs SC1)

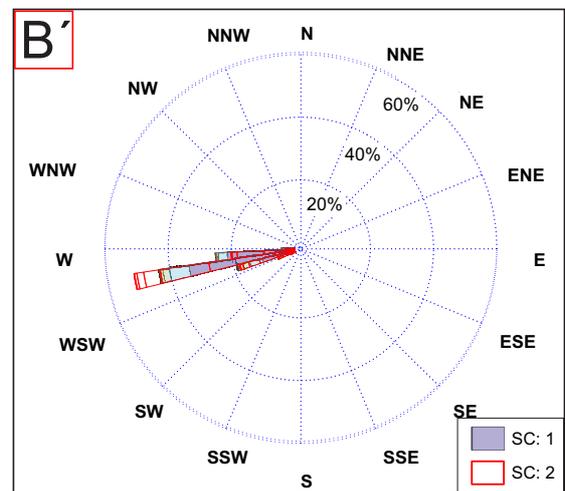


Figura 7.126: Rosa O. P.Control B' (SC2 vs SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

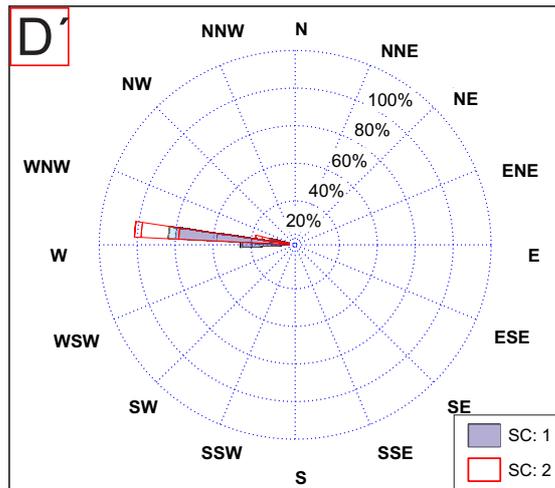
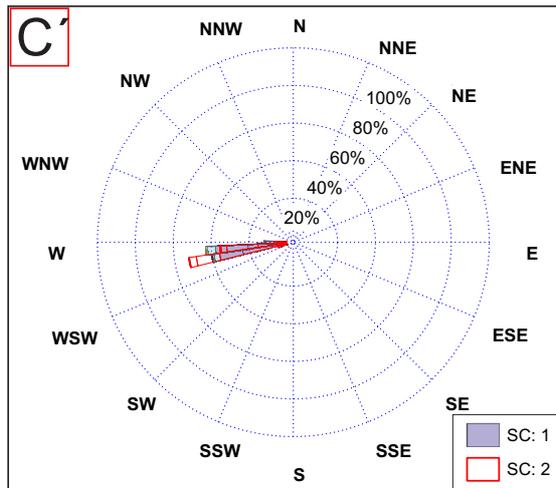


Figura 7.127: Rosa O. P.Control C' (SC2 vs SC1) Figura 7.128: Rosa O. P.Control D' (SC2 vs SC1)

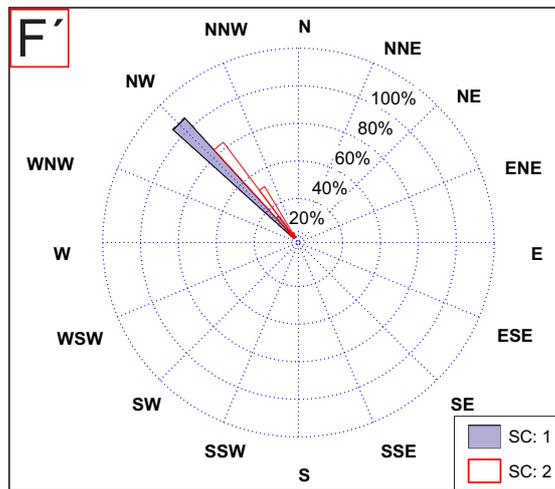
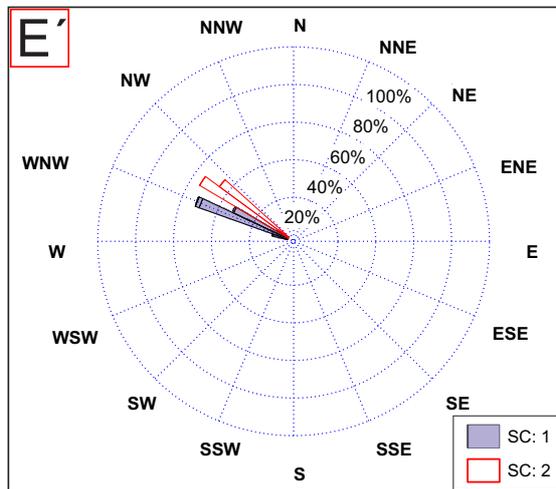


Figura 7.129: Rosa O. P.Control E' (SC2 vs SC1) Figura 7.130: Rosa O. P.Control F' (SC2 vs SC1)

En los puntos de control más externos (A', B' y C') no se nota el efecto de la nueva terminal ya que las direcciones de procedencia en dichos puntos son idénticas para el escenario 1 y para el 2. Sin embargo, en los tres puntos de control restantes existe una variación en las direcciones de procedencia del oleaje entre ambos escenarios, tendiendo las del escenario 2 más hacia el noroeste que las del escenario 1.

La nueva terminal produce un desplazamiento en la dirección de procedencia del oleaje hacia el noroeste.

Función de densidad de Weibull

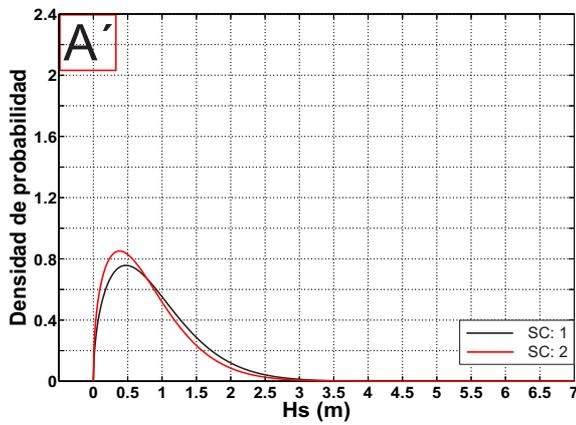


Figura 7.131: F.dens. P. Control A' (SC2 vs SC1)

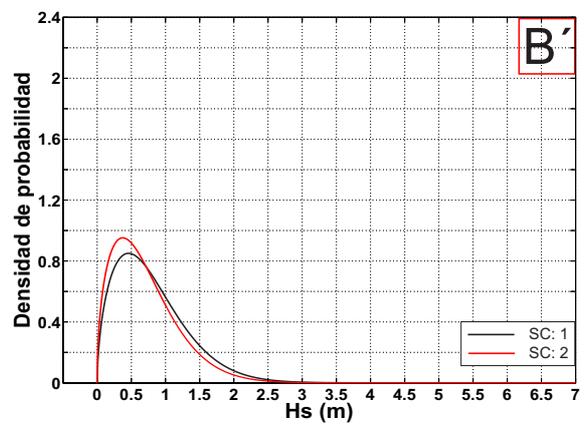


Figura 7.132: F.dens. P. Control B' (SC2 vs SC1)

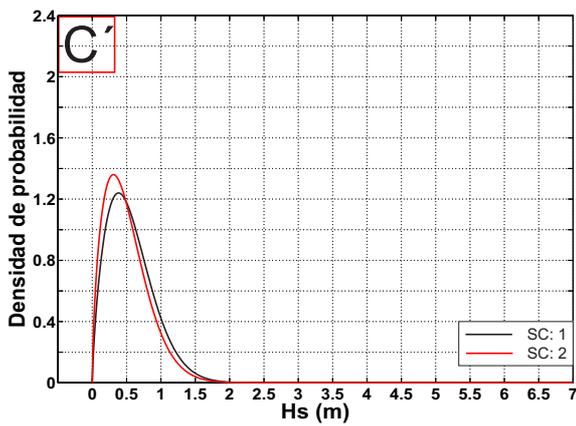


Figura 7.133: F.dens. P. Control C' (SC2 vs SC1)

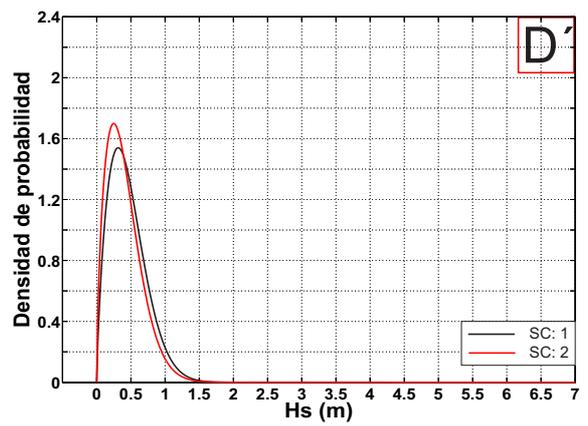


Figura 7.134: F.dens. P. Control D' (SC2 vs SC1)

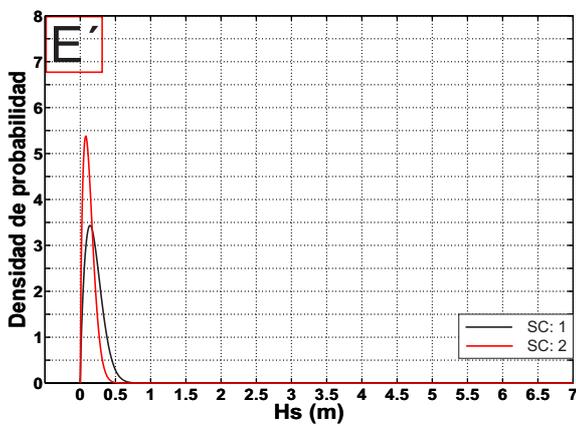


Figura 7.135: F.dens. P. Control E' (SC2 vs SC1)

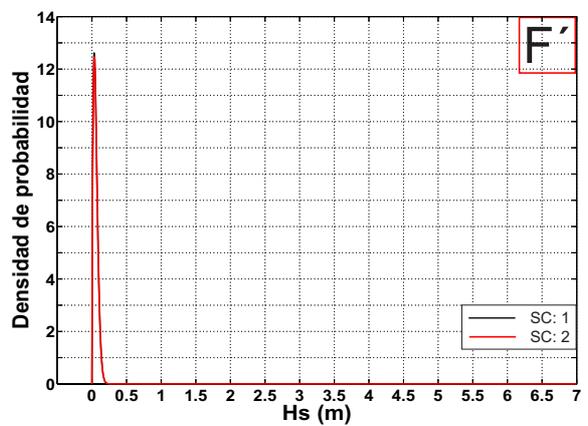


Figura 7.136: F.dens. P. Control F' (SC2 vs SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

Aumento de la frecuencia de olas de menor altura y disminución de la frecuencia de olas de mayor altura, en conclusión, las olas que llegan a los puntos de control son de menor altura en el escenario 2 que en el 1. Este fenómeno es menor en los primeros puntos de control que no están afectados por la nueva terminal mientras que los puntos de control internos si notan este efecto como se ve en las funciones de densidad de los puntos de control (D', E' y F')

### Resultante media anual

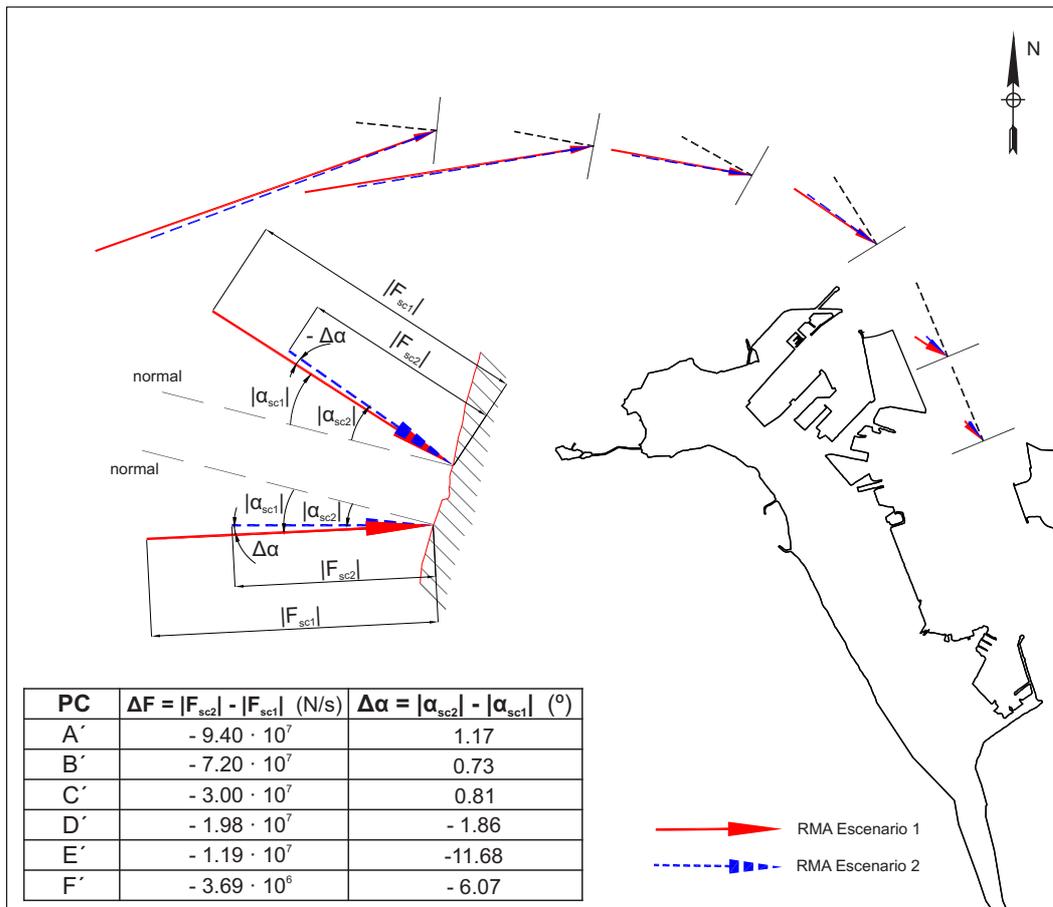


Figura 7.137: Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC2 vs SC1)

Los módulos de la resultante media anual (RMA) para el escenario 2 se reducen respecto a los del 1 a lo largo del canal de navegación debido a que las alturas de ola también lo hacen como se veía en los histogramas y funciones de densidad de weibull.

Las direcciones del vector RMA sufre variaciones menores de  $2^{\circ}$  en los cuatro primeros puntos de control debido a que la influencia de la ampliación de la terminal no llega a ellos. Para los dos puntos más cercanos a la terminal (E' y F') dicha variación pasa a ser 11 y  $6^{\circ}$  entre ambos escenarios como se observa en la figura 7.175.

### 7.1.5. Escenario 3 vs Escenario 1

Se realiza la comparación de los resultados obtenidos para el escenario 1 (situación actual) y para el escenario 3 (situación final de la Bahía: nueva terminal más dragado). Estos resultados reflejarán como se comportará el oleaje de la Bahía una vez las obras estén acabadas.

#### 7.1.5.1. Sector Valdelañana

##### Histogramas

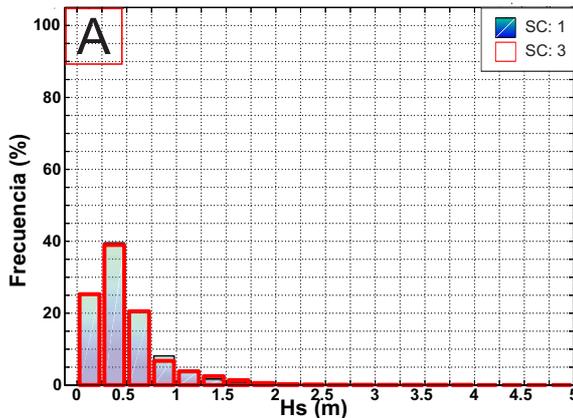


Figura 7.138: Hist. P.Control A (SC3 vs SC1)

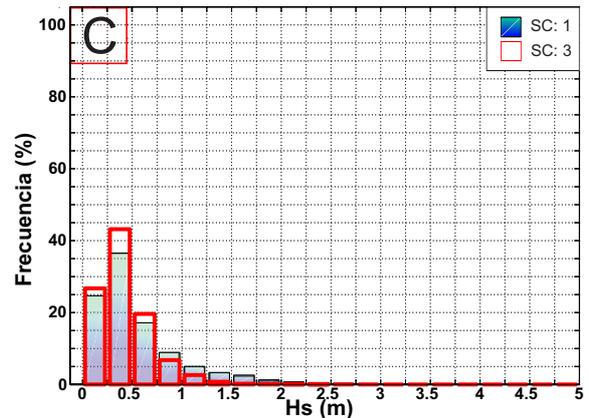


Figura 7.139: Hist. P.Control C (SC3 vs SC1)

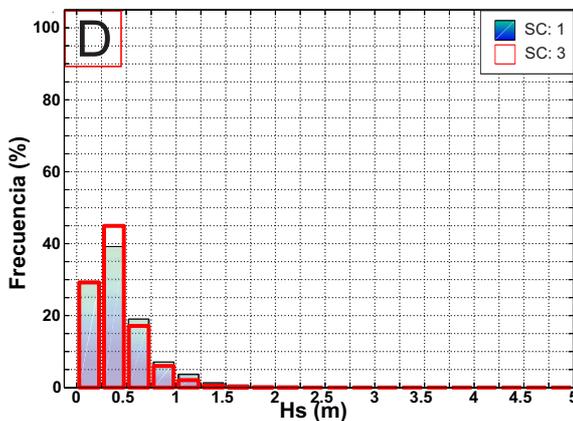


Figura 7.140: Hist. P.Control D (SC3 vs SC1)

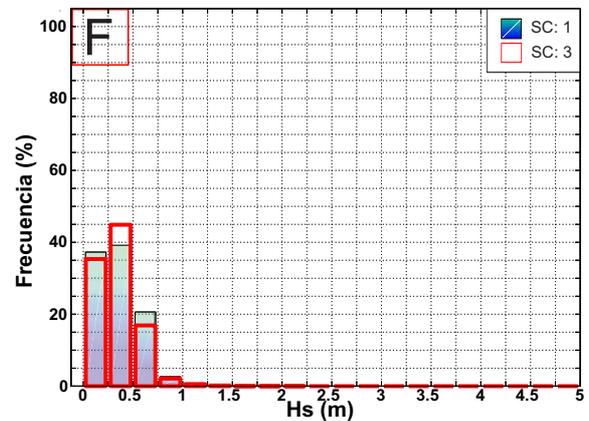


Figura 7.141: Hist. P.Control F (SC3 vs SC1)

Se representan con el borde negro y fondo a color los histogramas del escenario 1, sobre ellos los histogramas del escenario 2 sin fondo y con un borde rojo para dar un mayor contraste.

Se observa en las figuras que la diferencia entre los histogramas del escenario 1 y el 3 es menor que los del escenario 1 y el 2. De modo que una vez realizado el dragado y la ampliación de la terminal el comportamiento del oleaje sobre Valdelañana es más parecido a la situación actual (sin realizar las obras) que si sólo se amplía la terminal.

Rosa de Oleaje

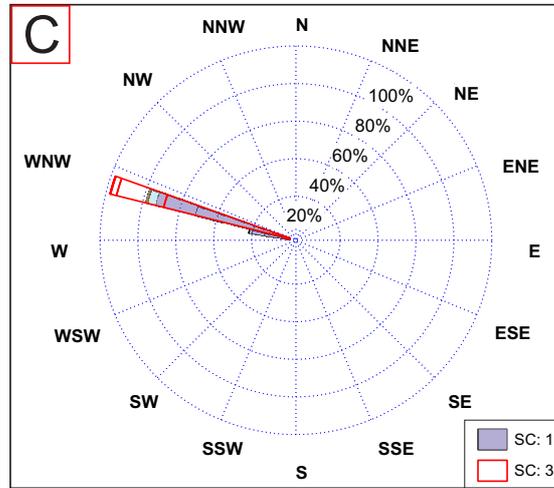
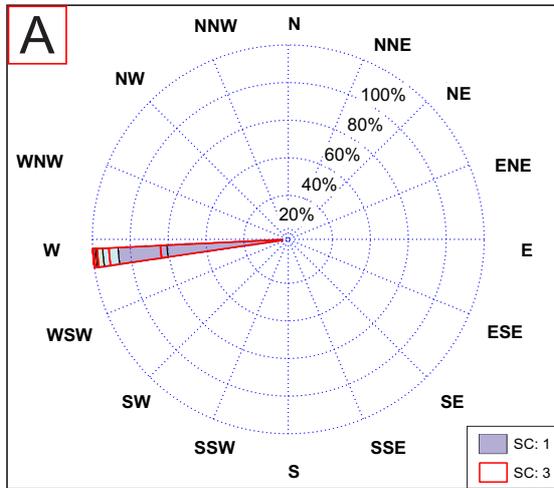


Figura 7.142: Rosa O. P.Control A (SC3 vs SC1)    Figura 7.143: Rosa O. P.Control C (SC3 vs SC1)

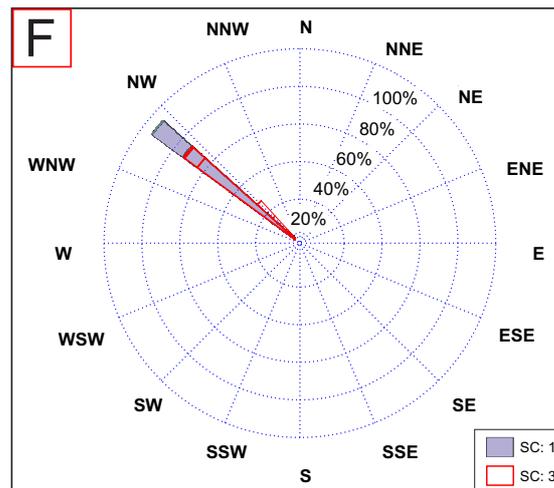
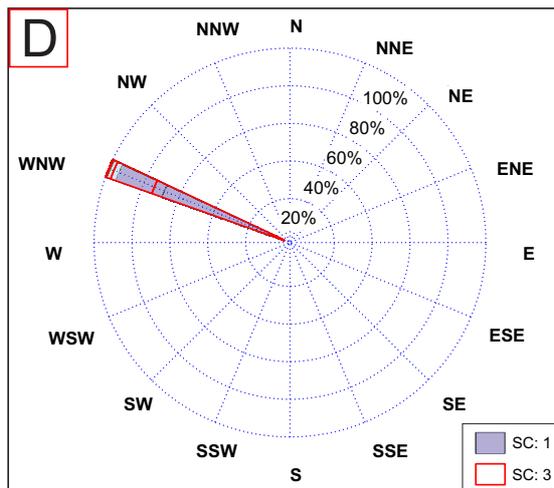


Figura 7.144: Rosa O. P.Control D (SC3 vs SC1)    Figura 7.145: Rosa O. P.Control F (SC3 vs SC1)

Observando las rosas de oleaje se ve que las direcciones de procedencia del oleaje no varían entre los escenarios 1 y 3, igual ocurría entre los escenarios 1 y 2.

Función de densidad de Weibull

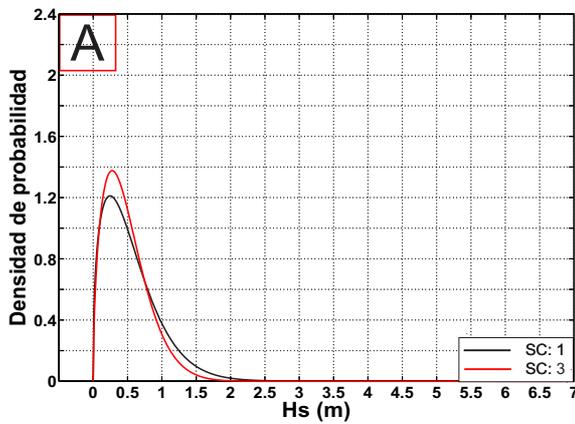


Figura 7.146: F.dens. P. Control A (SC3 vs SC1)

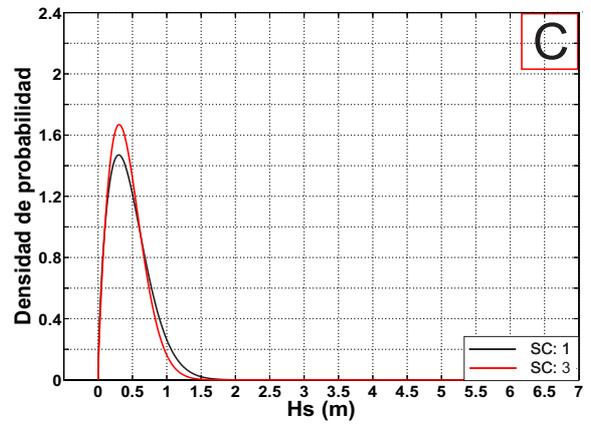


Figura 7.147: F.dens. P. Control C (SC3 vs SC1)

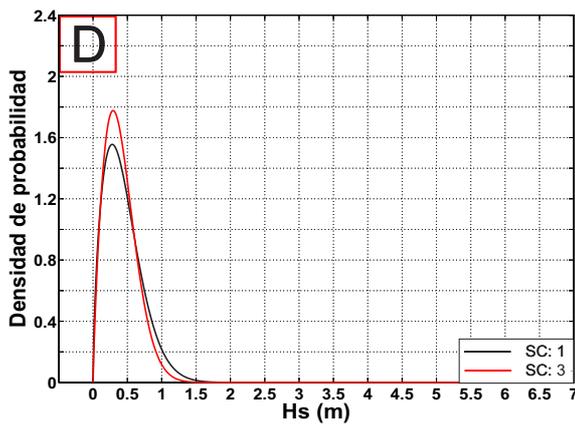


Figura 7.148: F.dens. P. Control D (SC3 vs SC1)

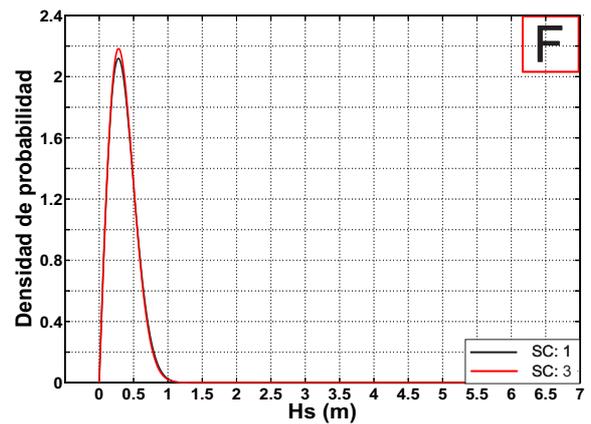


Figura 7.149: F.dens. P. Control F (SC3 vs SC1)

Las funciones de densidad de un escenario y otro son bastante similares hasta el punto de ser idénticas en el último punto de control situado más próximo a la desembocadura del río San Pedro.

Para explicar la diferencia entre ambos escenarios habría que dividir la función de densidad en tres tramos: un primer tramo comprendido entre 0 y 0.5 m. dónde la función de densidad crece para el escenario 3, es decir aumenta la probabilidad de ocurrencia de olas dentro de este rango en el escenario 3; un segundo tramo comprendido entre 0.5 m y 1 m. dónde ambas curvas se solapan y finalmente un último tramo de olas mayores de 1 m. dónde la función de densidad del escenario 3 queda por debajo de la del escenario 1, disminuyendo así su probabilidad de ocurrencia.

Resultante media anual

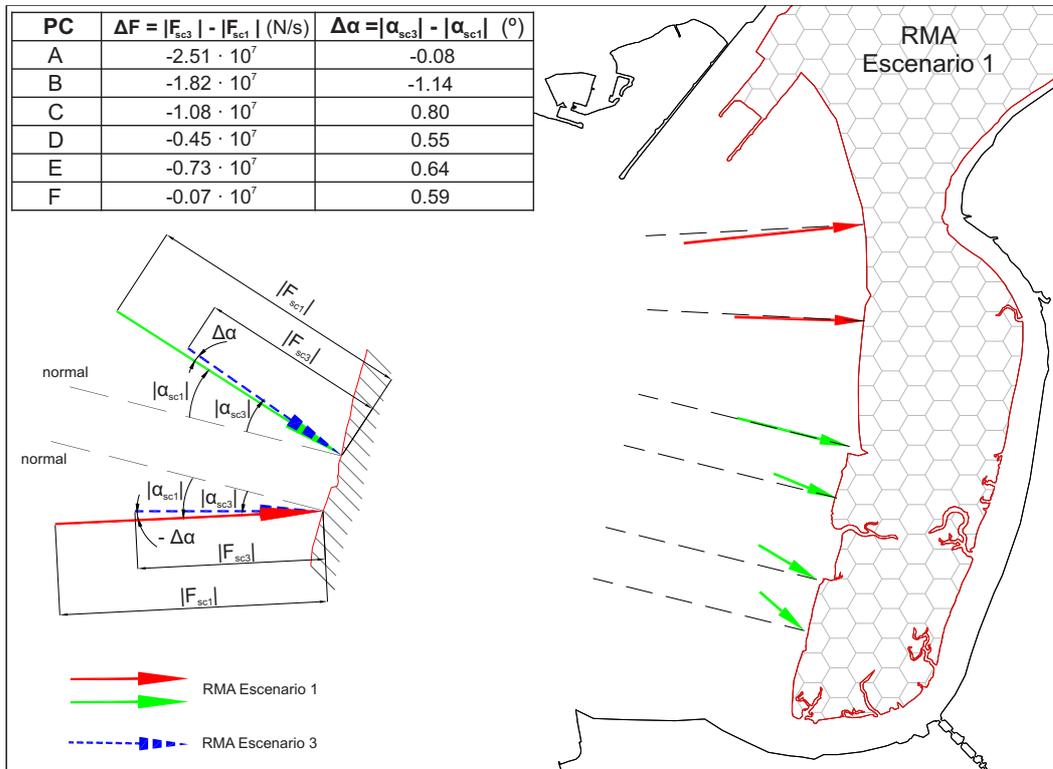


Figura 7.150: Resultante media anual. Sector Valdelagrana (SC3 vs SC1)

Lo más importante de la RMA es ver como varía su módulo y su dirección. El módulo se observa que se reduce en todos los puntos a lo largo de Valdelagrana, en mayor medida en los tres puntos situados más al norte (A, B y C) y prácticamente nada en los tres más al sur (D, E y F). La máxima variación entre las direcciones de la RMA del SC 1 y del SC 3 es de 1.14°, prácticamente nula.

A pesar de que el Puerto de Cádiz amplíe una de sus terminales, aumentado así la superficie de mar de la Bahía ocupada por el hombre y posteriormente realice un dragado a lo largo del canal de navegación, no se modifica la hidrodinámica en la playa de Valdelagrana ni en la desembocadura del río San Pedro, ya que la energía del oleaje allí (responsable del transporte de sedimento a lo largo de la playa) prácticamente no se ve afectada ni por la pequeña disminución del módulo de la RMA ni por la nula variación de su dirección.

7.1.5.2. Sector canal de navegación

Histogramas

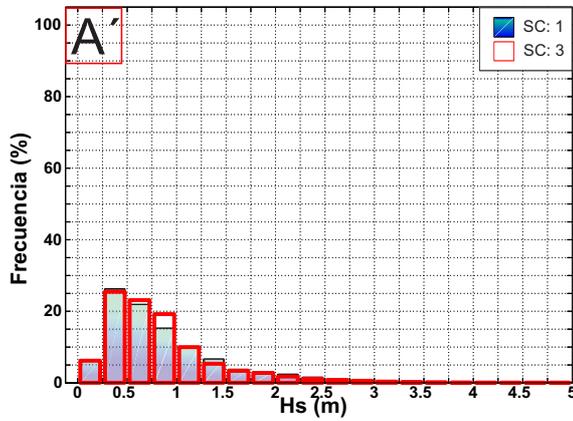


Figura 7.151: Hist. P.Control A' (SC3 vs SC1)

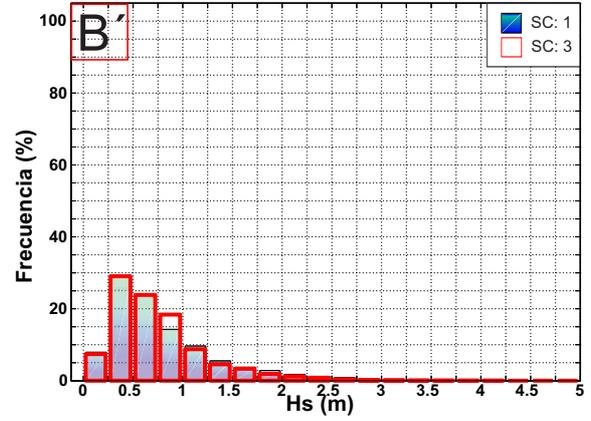


Figura 7.152: Hist. P.Control B' (SC3 vs SC1)

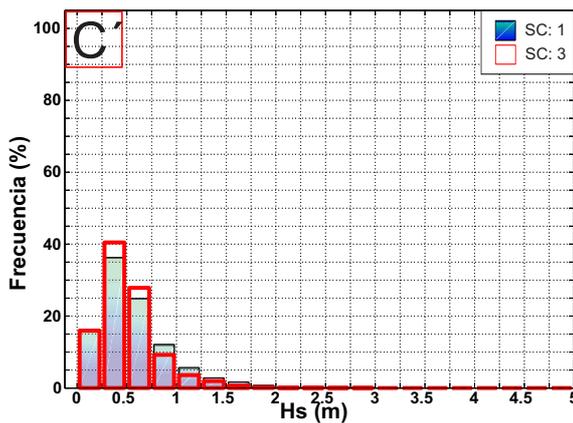


Figura 7.153: Hist. P.Control C' (SC3 vs SC1)

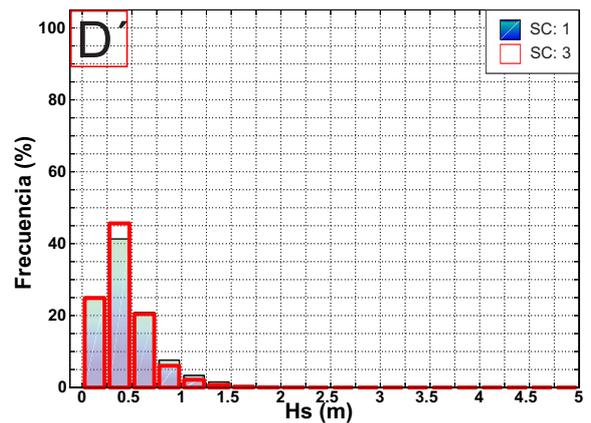


Figura 7.154: Hist. P.Control D' (SC3 vs SC1)

7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

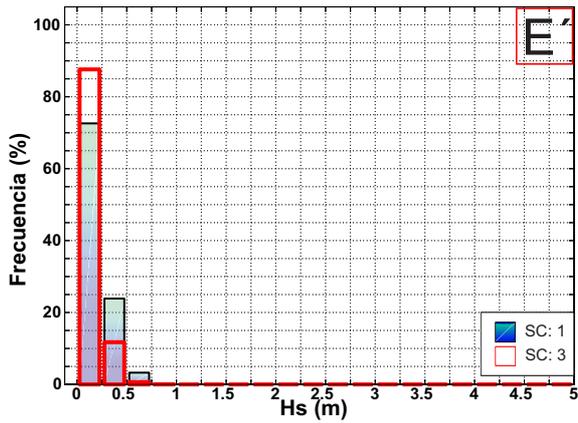


Figura 7.155: Hist. P.Control E' (SC3 vs SC1)

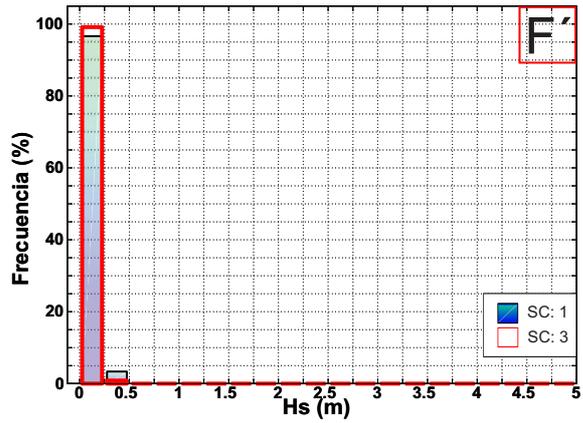


Figura 7.156: Hist. P.Control F' (SC3 vs SC1)

Se repite la similitud entre escenarios que se observaba en el sector de Valdelagrana, en todos los puntos de control a excepción del E', dónde las olas menores de 0.25 m. aumentan su frecuencia.

Es normal que sea E' el punto dónde las diferencias son mayores ya que se encuentra en el centro del dragado, justo enfrente de la nueva terminal.

Rosa de Oleaje

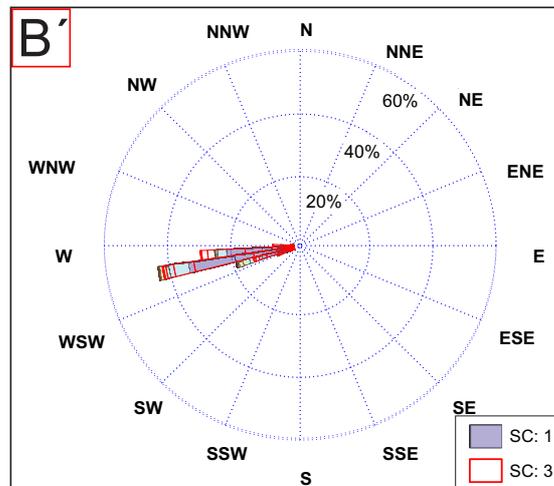
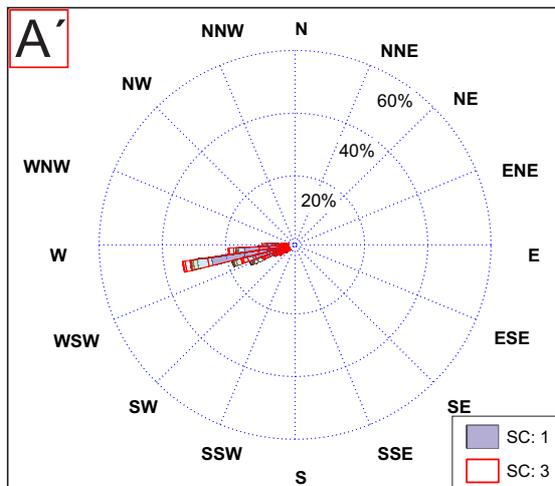


Figura 7.157: Rosa O. P.Control A' (SC3 vs SC1)

Figura 7.158: Rosa O. P.Control B' (SC3 vs SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

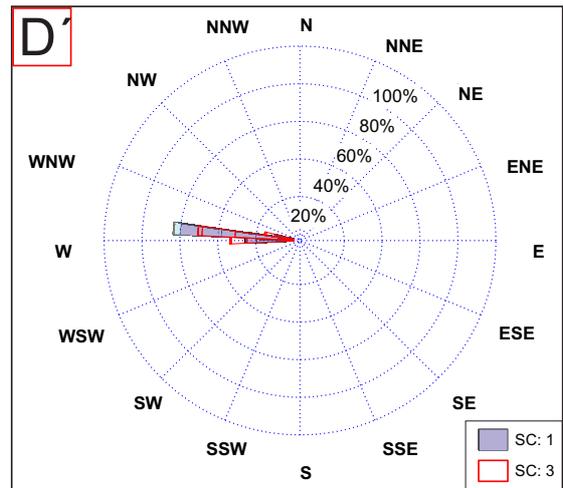
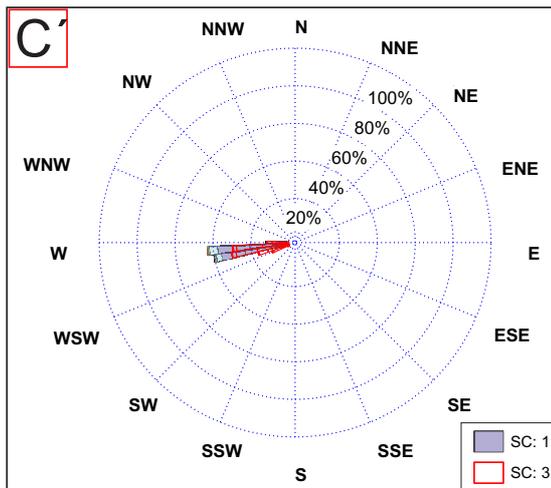


Figura 7.159: Rosa O. P.Control C' (SC3 vs SC1) Figura 7.160: Rosa O. P.Control D' (SC3 vs SC1)

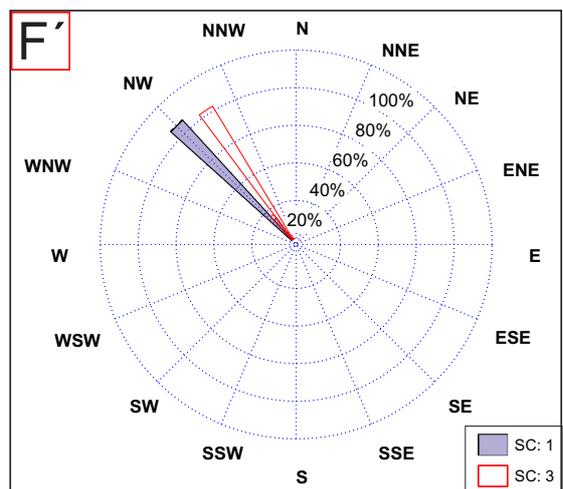
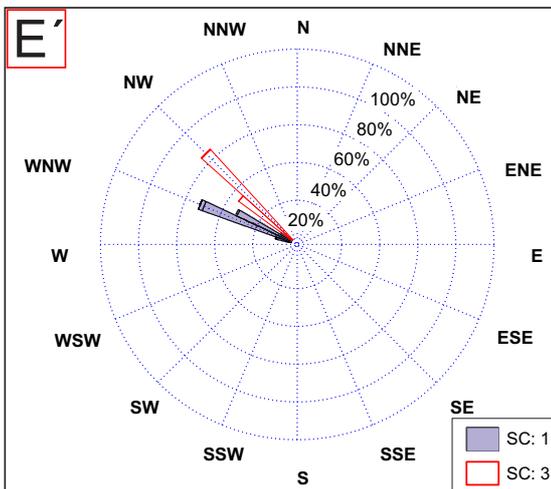


Figura 7.161: Rosa O. P.Control E' (SC3 vs SC1) Figura 7.162: Rosa O. P.Control F' (SC3 vs SC1)

El comportamiento de las direcciones de procedencia se puede dividir en los tres primeros puntos de control que no se ven aún afectados por las obras del Puerto ya que no se observa variación en las direcciones de procedencia. En los tres puntos restantes si que se ve una fuerte desviación en las direcciones de procedencia entre el SC 1 y el SC 3, tendiendo siempre más hacia el noroeste las direcciones de procedencia del escenario 3.

Función de densidad de Weibull

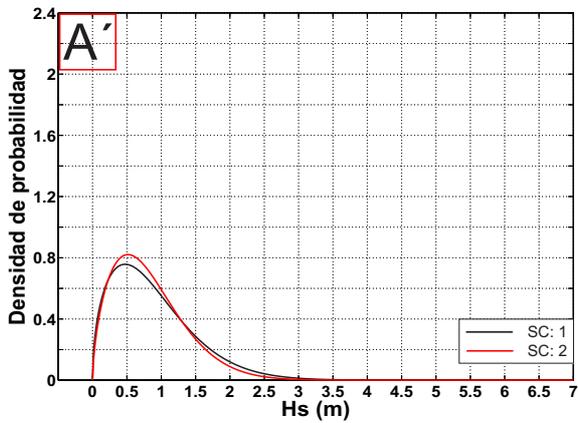


Figura 7.163: F.dens. P. Control A' (SC3 vs SC1)

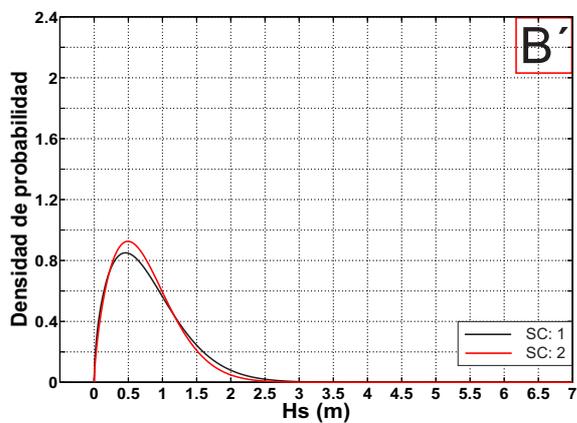


Figura 7.164: F.dens. P. Control B' (SC3 vs SC1)

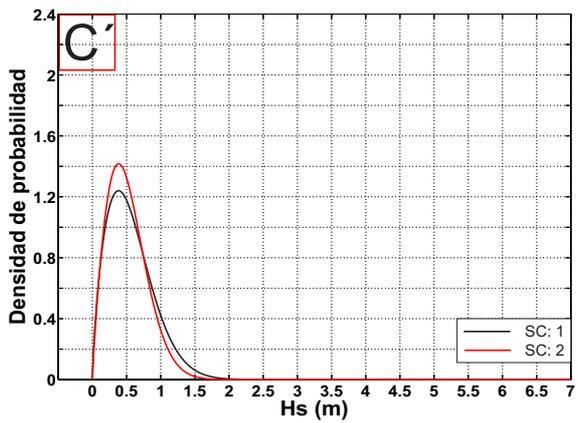


Figura 7.165: F.dens. P. Control C' (SC3 vs SC1)

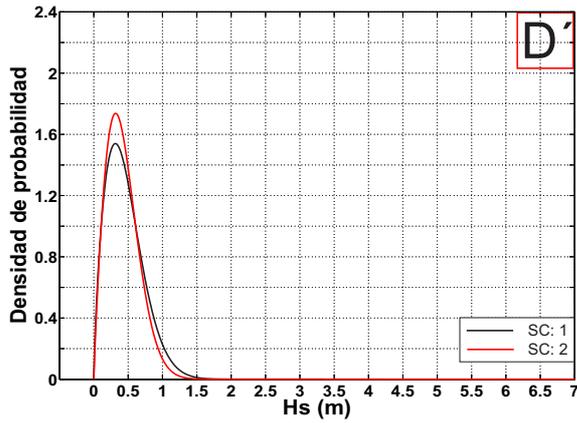


Figura 7.166: F.dens. P. Control D' (SC3 vs SC1)

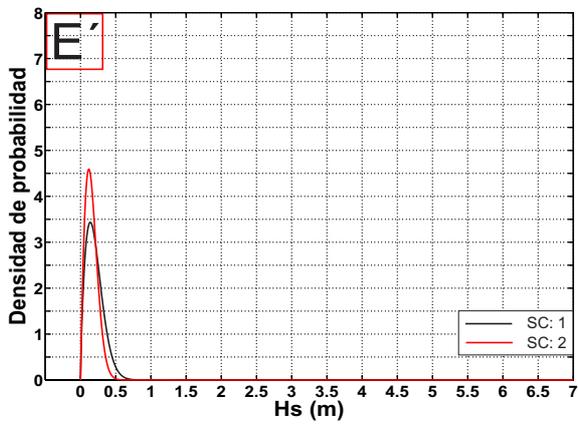


Figura 7.167: F.dens. P. Control E' (SC3 vs SC1)

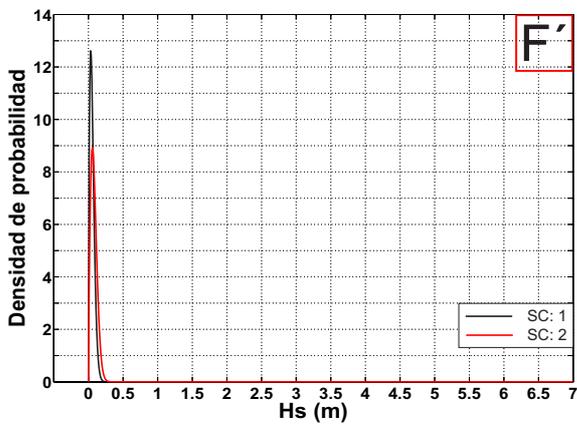


Figura 7.168: F.dens. P. Control F' (SC3 vs SC1)

## 7. Modelo numérico II: Análisis de la influencia de las actuaciones.

Las tres primeras funciones de densidad correspondientes a los puntos de control (A', B' y C') no están muy afectados por la ampliación de la terminal y el dragado, sus gráficas son casi idénticas. En los otros tres puntos, se aprecia una mayor diferencia entre las funciones de densidad, reduciéndose la frecuencia de las olas de mayor altura y aumentando las frecuencias de las olas menores de 0.25 m.

### Resultante media anual

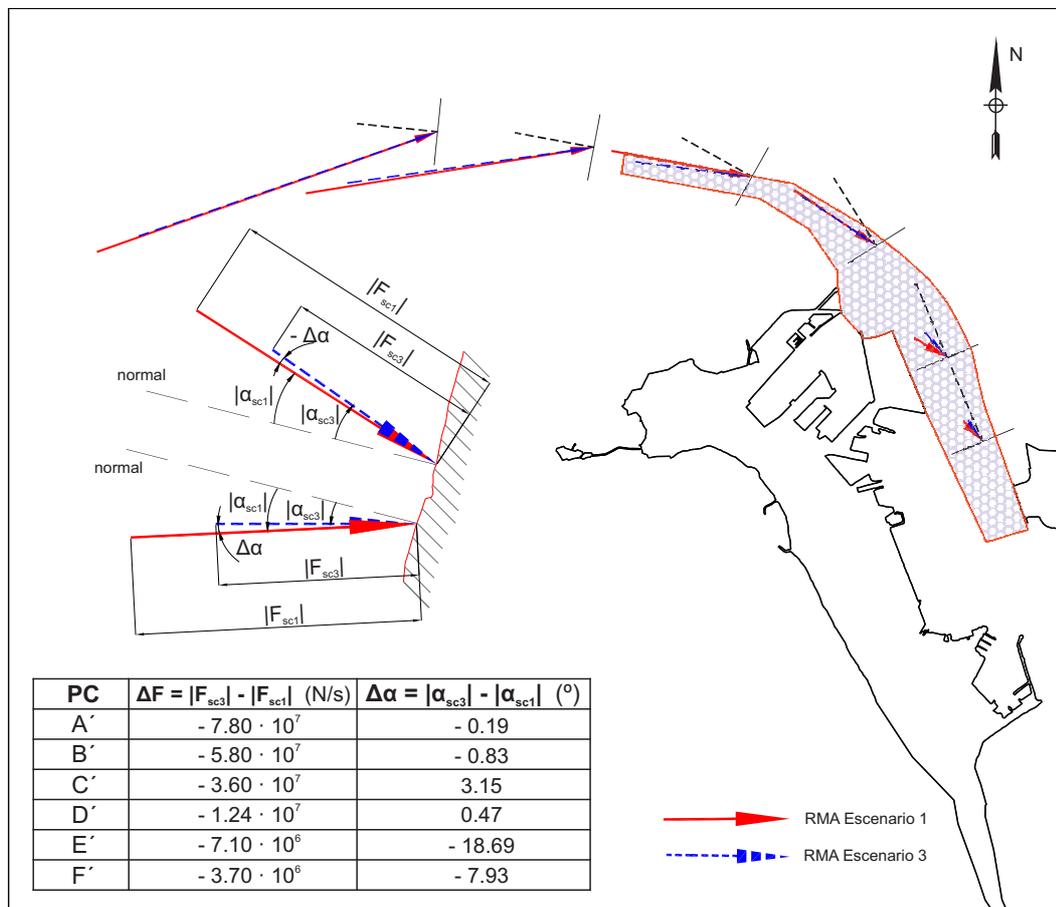


Figura 7.169: Resultante media anual. Sector canal de navegación (SC3 vs SC1)

Los módulos de la resultante media anual (RMA) se reducen a lo largo del canal de navegación debido a que las alturas de ola también lo hacen como se veía en los histogramas y funciones de densidad de weibull. En segundo lugar, las direcciones de oleaje en los tres primeros puntos de control no se ven afectados por la terminal. En los tres últimos puntos de control y sobre todo en el punto E', la variación se hace más fuerte inclinándose la RMA casi 19 grados hacia el noroeste como se ve en la figura 7.169.

## 7.2. Análisis de los temporales

### 7.2.1. Periodos de tiempo

#### 7.2.1.1. Temporal SW: 17-03-2006 a 21-03-2006

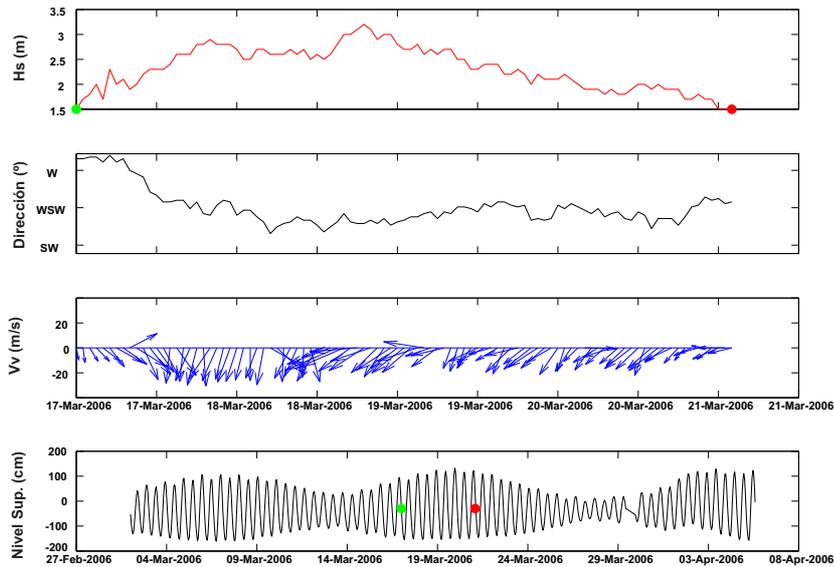


Figura 7.170: Datos para el temporal del SW.

#### 7.2.1.2. Temporal WNW: 17-02-2006 a 21-02-2006

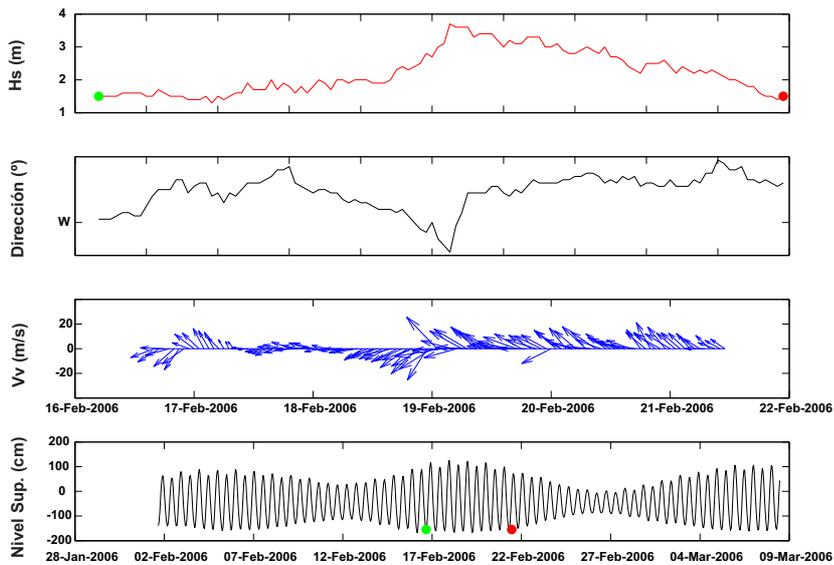


Figura 7.171: Datos para el temporal del WNW.

7.2.2. Escenario 2 vs Escenario 1

7.2.2.1. Variación del coeficiente de propagación

Temporal SW

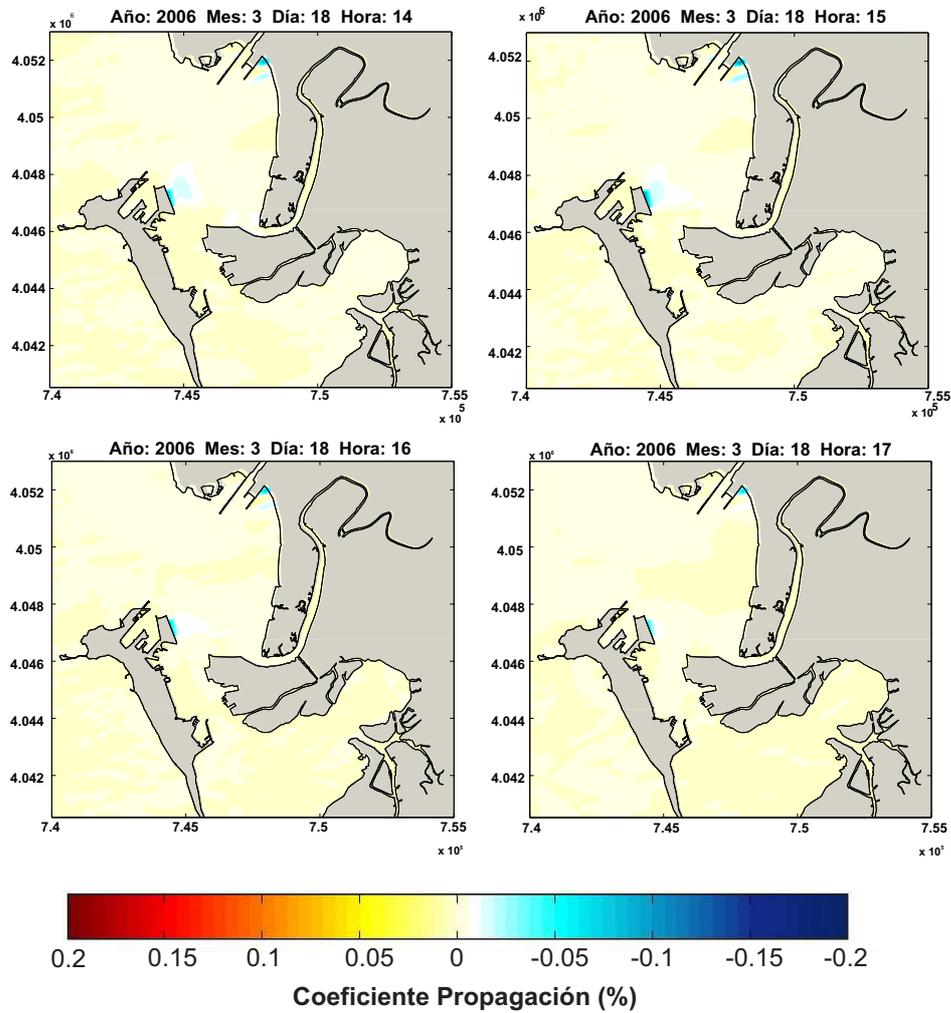


Figura 7.172: Diferencia entre el  $C_p$  del SC 2 vs SC1 para temporal del SW

Se han tomado como muestra las cuatro horas de mayor altura de ola dentro del temporal. Se observa como en la muelle exterior de la nueva terminal la altura de ola se reduce un 13% mejorándose así las operatividad en la terminal. El máximo crecimiento de la altura de ola no supera el 5% en ningún punto de la Bahía. Para el sector de valdelagrana se observa que apenas hay cambios en el coeficiente de propagación de un escenario a otro.

Temporal WNW

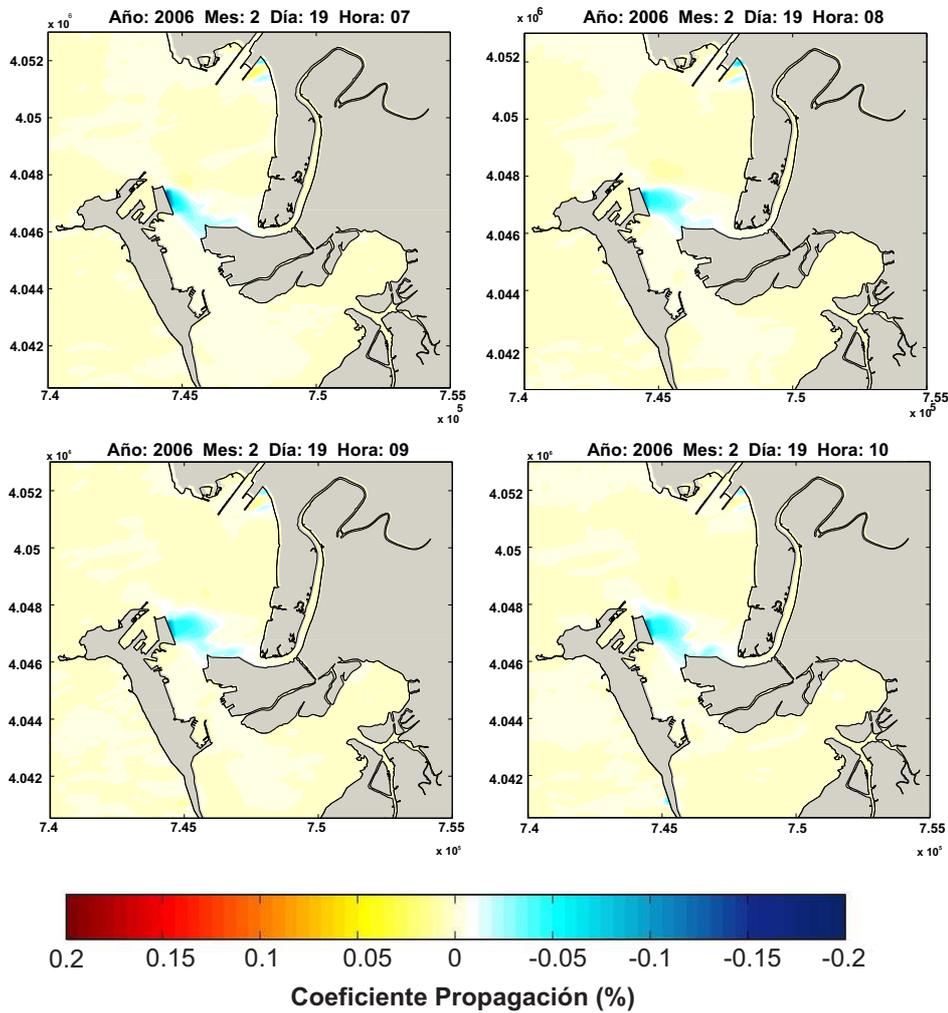


Figura 7.173: Diferencia entre el  $C_p$  del SC 2 vs SC1 para temporal del WNW

Se observa como en la muelle exterior de la nueva terminal la altura de ola se reduce un 13%. Esta disminución se extiende hacia el SE cuando el temporal procede del WNW. El máximo crecimiento de la altura de ola no supera el 5% en ningún punto de la Bahía. Para el sector de valdelagrana se observa que apenas hay cambios en el coeficiente de propagación de un escenario a otro.

7.2.3. Escenario 3 vs Escenario 1

7.2.3.1. Variación del coeficiente de propagación

Temporal SW

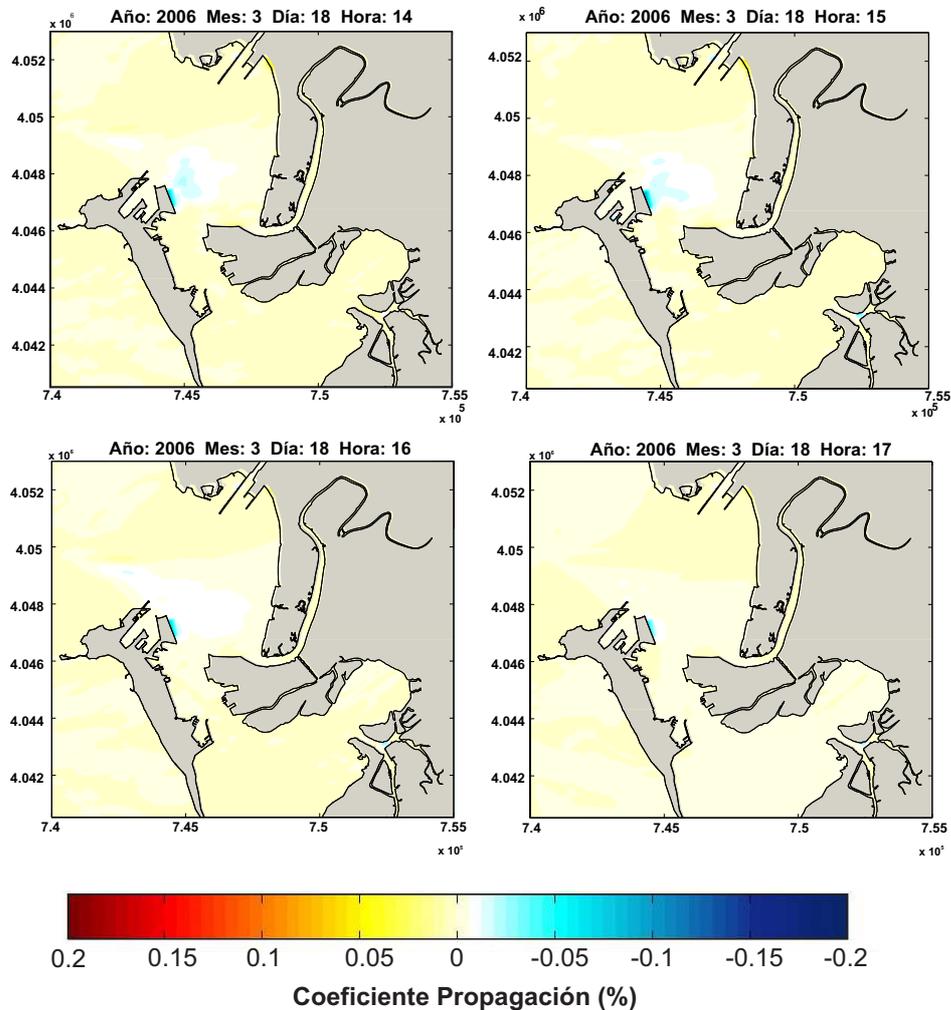


Figura 7.174: Diferencia entre el  $C_p$  del SC 3 vs SC1 para temporal del SW

Se observa como en la situación de dragado más ampliación de la terminal, en la muelle exterior de dicha terminal la altura de ola se reduce un 27% , más que en el caso de sólo terminal (13%) El máximo crecimiento de la altura de ola no supera el 5% en ningún punto de la Bahía, excepto una esquina en la desembocadura del río Guadalete dónde se llega alcanzar un aumento de la altura de ola de 26%. Se piensa que puede deberse a que el problema tenga dificultades para converger en dicha zona dado el vértice que se forma. Para el sector de valdelagrana se observa que apenas hay cambios en el coeficiente de propagación de un escenario a otro.

Temporal WNW

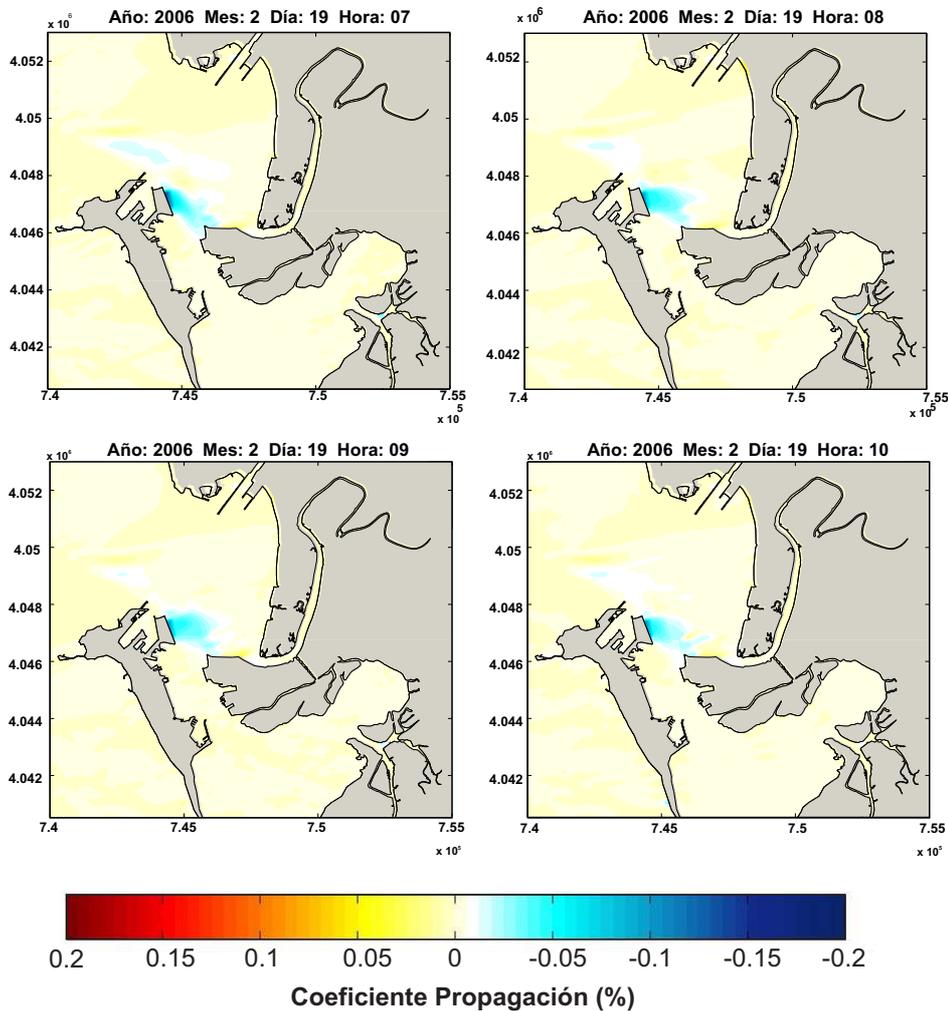


Figura 7.175: Diferencia entre el  $C_p$  del SC 3 vs SC1 para temporal del WNW

En la muelle exterior de dicha terminal la altura de ola se reduce un 27%. El máximo crecimiento de la altura de ola no supera el 5% en ningún punto de la Bahía, excepto una esquina en la desembocadura del río Guadalete dónde se llega alcanzar un aumento de la altura de ola de 26%. Se piensa que puede deberse a que el problema tenga dificultades para converger en dicha zona dado el vértice que se forma. Para el sector de valdelagrana se observa que apenas hay cambios en el coeficiente de propagación de un escenario a otro.

# Capítulo 8

## Conclusiones

### 8.1. Introducción

En la Bahía de Cádiz conviven espacios naturales protegidos de gran riqueza junto con actividades industriales de elevado impacto económico, de las cuales, las relacionadas con la actividad portuaria tienen un peso relevante. Las diversas actuaciones humanas efectuadas en la Bahía han modificado sustancialmente el esquema circulatorio de masas de agua entre el saco interior y la Bahía exterior, lo que ha podido provocar afecciones ambientales y modificar las condiciones ambientales originales.

En la actualidad se están realizando dos nuevas actuaciones portuarias dentro de la Bahía de Cádiz: (1) la ampliación de la terminal de contenedores del Puerto de Cádiz (las obras comenzaron en diciembre de 2011) y (2) el dragado del actual canal de navegación para permitir la entrada de buques de mayor calado (a realizar una vez que las obras de la ampliación de la nueva terminal estén avanzadas). El objetivo que se ha pretendido alcanzar con este informe técnico es el análisis del efecto que estas nuevas actuaciones pueden tener en la hidrodinámica de la Bahía de Cádiz, así como verificar algunos aspectos del diseño de la terminal (p.ej. operatividad bajo condiciones medias y extremas). Para alcanzar este objetivo en este trabajo se ha desarrollado una metodología basada en la adquisición de datos de campo, en la aplicación y calibración de un modelo hidrodinámico avanzado y en la definición de distintos escenarios batimétricos que permitan reproducir las configuraciones geométricas actual y futuras.

En primer lugar se ha analizado la situación actual de la Bahía de Cádiz y sus principales características (dimensiones, espacios protegidos, actuaciones portuarias realizadas, clima marítimo, etc.). Posteriormente se ha realizado una campaña de campo de larga duración (4 meses) consistente en la medida de variables hidrodinámicas (velocidades y niveles) en distintos puntos significativos de la Bahía para mejorar el conocimiento sobre su funcionamiento y disponer de datos para calibrar el modelo numérico avanzado Delft3D. Dicho modelo (software gratuito) permite analizar la influencia que los agentes oleaje, marea, viento y descargas fluviales tienen sobre zonas con batimetrías y configuraciones geométricas complejas. Las dos actuaciones que se están realizando en la Bahía se han modelizado mediante la definición de tres escenarios batimétricos: (1) el primer escenario corresponde a la situación actual; (2) en el segundo escenario se añade la ampliación de la nueva terminal de contenedores y finalmente (3) en el tercer escenario se ha incluido tanto la nueva terminal como el dragado del canal de navegación. Sobre cada uno de los escenarios definidos se han simulado las condiciones de forzamiento (tanto condiciones medias como condiciones extremas). Finalmente se han

comparación y analizado los resultados obtenidos para cada escenario para la extracción de conclusiones.

## **8.2. Clima marítimo**

Se ha elaborado el clima marítimo de la Bahía de Cádiz utilizando los datos de la Boya “Golfo de Cádiz”. El rango de alturas de ola oscila entre 0 y 5 m, siendo las más frecuentes aquellas entre 0.5 y 1 m, produciéndose en el 55 % de los casos. Los periodos oscilan entre los 3-20 s, siendo los más frecuentes entre 4 y 7s, produciéndose en el 39 % de los casos. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el oleaje son SE (13 % del tiempo) y W (58 % del tiempo).

Para el régimen medio anual se obtiene que la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 50 % es 0.9 m. Y la altura de ola cuya probabilidad de no excedencia es del 85 % es 1.8 m. Para el régimen extremal la altura de ola cuyo periodo de retorno es de 5 años es 4.7 m; la altura de ola cuyo periodo de retorno es de 100 años es 8.9 m y la altura de ola cuyo periodo de retorno es de 500 años es 12.5 m. Estos valores ponen de manifiesto el elevado contenido energético del oleaje en el Golfo de Cádiz.

El rango de velocidades de viento oscila entre 2 y 20 m/s, siendo las más frecuentes entre 4 y 6 m/s, ocurren el 27 % del tiempo. Las direcciones de procedencia más frecuentes para el viento son E (16 %) y W (22 %). Para el régimen medio anual la velocidad de viento cuya probabilidad de no excedencia es del 50 % es 6 m/s, y la velocidad de viento cuya probabilidad de no excedencia es del 85 % es 9 m/s.

Con base en estos resultados obtenidos se ha prestado especial atención a los temporales procedente del SE y del W para el análisis de las condiciones de forzamiento sobre los diferentes escenarios.

## **8.3. Campaña de campo**

Para la calibración del modelo numérico es necesario disponer de datos de altura de ola, periodo y dirección medidos en determinados puntos de la Bahía para poder comparar con los resultados de las simulaciones realizadas. Para ello se fundearon en 8 puntos específicos de la Bahía un total 13 instrumentos (5 perfiladores de corriente, 3 sondas de calidad de aguas, 2 sensores de turbidez y 3 mareógrafos) para caracterizar la evolución tanto del sistema circulatorio como de los niveles dentro de los sacos exterior e interior, así como evaluar las transferencias entre ambas, la temperatura y la turbidez del agua.

Tras analizar los datos medidos se ha podido concluir que las carreras de marea oscilan entre los 4 m en mareas vivas y 1 m en mareas muertas, dándose los niveles máximos en el estrecho de puntales. Las componentes armónicas más importantes son las semidiurnas y las corrientes de marea son mayores en el estrecho de puntales (0.36 m/s) que en el saco interior y exterior (0.24 y 0.26 m/s respectivamente). Sus direcciones de propagación siguen el eje del canal central, desviado del Norte unos 30° en sentido antihorario.

Respecto al oleaje, la altura de ola máxima medida durante la campaña fue de 2 m, los periodos pico medios estuvieron en el entorno de los 6 s (87 % del tiempo) y las velocidades de viento predominantes 6-7 m/s procedentes del NW (38 % del tiempo) y SE (27 % del tiempo).

## 8. Conclusiones

---

En el 92% de los casos el coeficiente de propagación (definido como cociente entre altura de ola en el punto considerado y la altura de ola en la Boya de Cádiz) fue menor que 0.5. Esto muestra que hay una fuerte reducción en el contenido energético del oleaje tras su entrada en la Bahía.

### 8.4. Modelo numérico

El modelo numérico que se ha empleado es el Delft3D. Es un modelo desarrollado por la Universidad tecnológica de Delft (Países bajos) para para estimar las características del oleaje en zonas costeras, estuarios, lagos, canales, islas, . . . generados por vientos locales y corrientes ambientales. Este modelo numérico trabaja tanto en agua profundas como someras para estudiar la propagación del oleaje desde su generación hasta la costa, tiene en cuenta los procesos físicos de disipación de energía, reflexión, refracción, interacciones no lineales, etc. y es un software gratuito.

El modelo engloba varios módulos, de los cuales en este proyecto se han utilizado de manera conjunta y sincronizada los módulos WAVE y FLOW, lo que dota a las simulaciones de de una mayor precisión al estar considerando parámetros tanto del oleaje como hidrodinámicos. Para la aplicación del modelo se han definido dos mallas anidadas una dentro de la otra que cubren toda la Bahía. Para la calibración se han seleccionado cuatro periodos de tiempo y se ha seguido un proceso iterativo para determinar los valores de cada uno de los parámetros a calibrar del modelo.

El parámetro más importante en la calibración del módulo WAVE es la fricción del fondo. Se ha encontrado que el modelo de fricción que mejor se ajusta para esta zona es el de Collins y se ha tomando un valor de 0.002 para mareas vivas y de 0.02 para mareas muertas. Para el módulo FLOW, el parámetro más influyente es el de coeficiente de arrastre por viento que toma un valor de 0.003 para mareas vivas y 0.005 para muertas.

Una vez calibrado, se ha empleado un quinto periodo de tiempo para la validación del modelo obteniéndose unos valores de calibración siempre alrededor de 0.9 para el R y 0.70 para el Skill.

### 8.5. Escenarios

Se han definido tres escenarios batimétricos de modo que el primero corresponde con la situación actual de la Bahía de Cádiz, el segundo con la nueva ampliación de la terminal de contenedores y el tercero es igual que el segundo más el dragado del canal de navegación. Sobre dichos escenarios se han analizado el régimen medio y dos temporales, uno procedente del WNW y otro del SW.

#### 8.5.1. Análisis del régimen medio

Para el análisis del régimen medio se necesita tener todo el registro de estados de mar de la Boya propagados a cada uno de los puntos de control de la Bahía. Dado el elevado coste computacional que supondría propagar los 46461 datos, se seleccionan los 200 estados de mar más representativos y se propagan mediante el modelo calibrado. Posteriormente se ha usado una rutina programada en Matlab que interpola los 46461 datos a partir de los 200 propagados, obteniendo así una muestra de todo el registro propagado. Este proceso ha sido realizado para los tres escenarios, habiendo calculado posteriormente los histogramas de altura de ola, el ajuste de los datos mediante funciones de densidad de Weibull, las rosas de

oleaje y las resultantes medias anuales para el sector de la playa de Valdelagrana y a lo largo del canal de navegación.

Al comparar los resultados obtenidos para los escenarios 2 y 3 con el escenario 1, se observa que sobre el entorno de la playa de Valdelagrana tanto la nueva terminal como el dragado reducen la altura de ola que llega a la playa (contenido energético), no modifican las direcciones de procedencia del oleaje y por tanto la resultante media anual reduce ligeramente su módulo y no varía su dirección. Esto quiere decir que la energía que las olas tienen para movilizar sedimento a lo largo de la playa no se ve alterada ni por la ampliación de la terminal ni por la realización del dragado, demostrándose así que esta zona no sufre ninguna alteración significativa en su morfodinámica. Asimismo, para el canal de navegación se observa que con la nueva terminal y el dragado la altura de ola en el muelle exterior de la terminal se reduce, mejorando la operatividad de la terminal en un 7 %.

### 8.5.2. Temporales

Se han simulado dos temporales, uno por cada dirección predominante SW y WNW, sobre cada escenario para ver como se ve afectada la Bahía ante un temporal en cada caso. Los periodos de tiempo que se han elegido cumplen tener una altura de ola superior a los 3 m, una duración mayor o igual a 72 horas para tener datos suficientes para realizar el análisis y que coincidan con ciclos de marea viva para que las condiciones sean lo más desfavorables posibles. Realizadas las simulaciones de los dos temporales sobre cada escenario se ha calculado el coeficiente de propagación y se ha obtenido la diferencia entre los escenarios 2 y 3 respecto al 1.

Las conclusiones que se han obtenido son que la altura de ola del escenario 2 respecto a la del 1 en la zona de la terminal se reduce un 13 % para temporal del SW y un 15 % para el del WNW. Al comparar el escenario 3 respecto del 1 se ha obtenido que la altura de ola en la zona de la nueva terminal se reduce un 27 % para ambas direcciones de temporal, siendo el crecimiento de la altura de ola siempre es inferior al 5 %

# Apéndice



# Apéndice A

## Red de medida de Puertos del Estado

### A.1. Introducción

A lo largo de toda la costa del país el estado tiene una completa red de medida formada por Boyas y puntos WANA para medir oleaje, viento y mareas. En la zona del Golfo de Cádiz se pueden encontrar:

### A.2. Conjunto de datos WANA

Los datos WANA están formados por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Es importante que son datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza. El modelo desarrollado por Puertos del Estado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) proporciona para cada instante campos de viento y presión en base a la evolución anterior de los parámetros, siempre consistente con las observaciones realizadas. Es por tanto un modelo de diagnóstico o análisis, pero no de predicción.

Actualmente la resolución temporal de estos datos es de 1 hora para datos de viento y de 3 horas para datos de oleaje.

#### Viento

El modelo empleado para generar los campos de vientos es el HIRLAM, de la AEMET. Los datos de viento facilitados por este modelo son a 10 metros de altura sobre el nivel del mar. Este modelo no reproduce efectos geográficos a escalas inferiores a 3 km, sin embargo, reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía.

Los parámetros disponibles son:

- Velocidad media
- Dirección media de procedencia del viento

### Oleaje

Para generar los campos de oleaje se han utilizado dos modelos: WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo HIRLAM. Como se ha visto, ambos son modelos espectrales de tercera generación (Véase: **Apéndice E: Modelos numéricos de simulación de oleaje**). La resolución espacial de los modelos depende en función de la zona, para la Bahía de Cádiz la resolución es de 5 Km.

Los datos WANA deben considerarse siempre como datos de aguas abiertas y profundidades indefinidas.

Los parámetros disponibles son:

- Altura significativa espectral
- Periodo pico espectral
- Periodo medio espectral (momentos 0 y 2)
- Dirección media de procedencia de oleaje
- Altura y dirección de mar de viento
- Altura, Periodo medio y Dirección de mar de fondo

### A.3. Conjunto de datos REDEXT

El conjunto de datos REDEXT esta formado por las medidas procedentes de la Red de Boyas de aguas profundas (Red exterior).

Las Boyas de esta red se encuentran fondeadas lejos de la línea de costa a más de 200 metros de profundidad, de modo que las medidas de oleaje de estos sensores no están perturbadas por efectos locales.

La red exterior está compuesta por Boyas de tipo Wavescan y SeaWatch. La diferencia entre ambas es que las de tipo SeaWatch miden tanto oleaje como parámetros atmosféricos y Oceanográficos, mientras que las de tipo Wavescan solo miden oleaje y variables atmosféricas. En la zona de la Bahía de Cádiz la boya que hay fondeada es de tipo SeaWatch.

Los datos de las boyas sí son procedente de medidas directas de la naturaleza.

### Obtención de datos

Las boyas de la Red Exterior están dotadas de varios tipos de sensores, unidades de proceso, almacenamiento de datos y transmisión vía satélite. Los valores medidos por los sensores se procesan y almacenan a bordo de la Boya, de este modo en la propia Boya se calculan algunos parámetros estadísticos como son la velocidad media del viento o la altura significativa de la ola. Los parámetros medidos junto con los calculados por la Boya son también

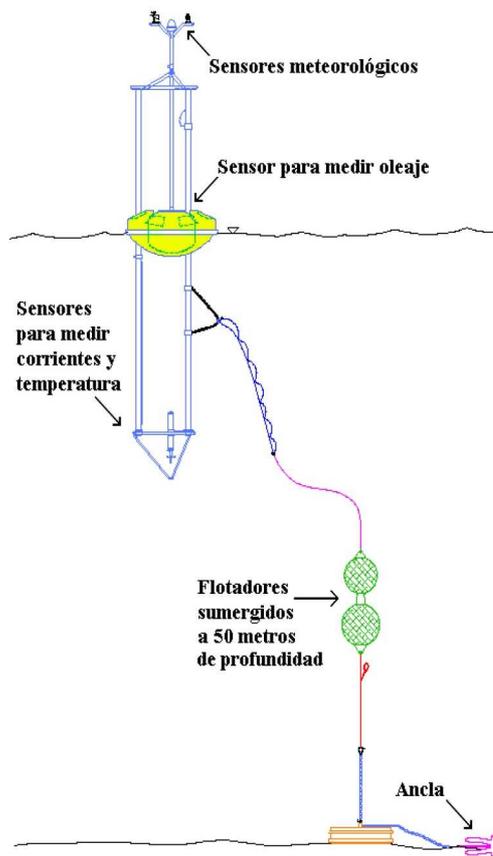


Figura A.1: Detalle de una Boya tipo SeaWatch.

Fuente: Puertos de Estado

enviados vía satélite cada hora a Puertos del Estado, de modo que éstos generan un segundo conjunto de parámetros de estado de oleaje, que es más amplio que el generado por la Boya.

La figura A.1 muestra un esquema de los procesos implicados en la generación y almacenamiento del conjunto de datos REDEXT.

### Tiempo de muestreo

En la actualidad, la toma de datos de estas Boyas es de un dato por hora. Sin embargo, aunque la cadencia sea horaria, los parámetros que se proporcionan no se miden a lo largo de una hora, sino que dentro de la hora la duración de la medida para cada agente es de:

- Oleaje: 30 min.
- Velocidad del Viento: 10 min.
- Velocidad de la corriente: 10 min.
- Temperatura del aire: Instantánea

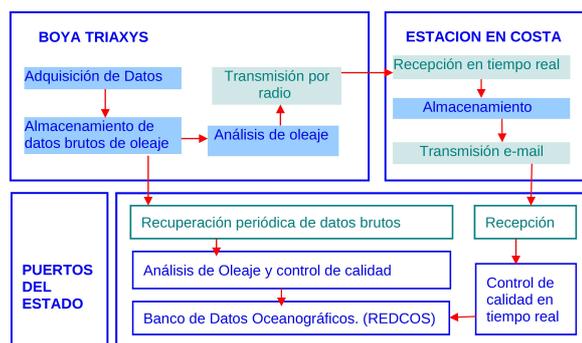


Figura A.2: Esquema de la generación y almacenamiento del conjunto de datos REDEXT.  
Fuente: Puertos del Estado

- Presión del Aire: Instantánea
- Salinidad de Agua: Instantánea
- Temperatura del Agua: Instantánea

### Parámetros disponibles

- Parámetros de Oleaje
  - Altura significativa espectral y de cruce por cero
  - Periodo medio espectral y de cruce por cero
  - Altura máxima y periodo asociado
  - Periodo significativo
  - Dirección media
  - Dirección media en el pico de energía
  - Dispersión de la dirección en el pico de energía
- Parámetros meteorológicos (registrados a 3 metros de la superficie).
  - Velocidad y dirección media del viento
  - Velocidad de racha del viento
  - Temperatura del aire
  - Presión del aire
- Parámetros oceanográficos (registrados a 3 metros bajo la superficie).
  - Velocidad y dirección media de la corriente
  - Temperatura del Agua
  - Salinidad (deducida a partir de medidas de conductividad)

### A.4. Conjunto de datos REDCOS

Los datos REDCOS constituyen el conjunto de datos de la red de Boyas Costeras de Puertos del Estado. Engloba los datos de la red REMRO, al tiempo que los actualiza y amplía. Suelen estar ubicadas en las inmediaciones de las áreas portuarias y siempre fondeadas a menos de 100 metros de profundidad. Es por esto que en muchos casos, las medidas de estas boyas están perturbadas tanto por el perfil de la costa como por los efectos del oleaje sobre el fondo.

Las medidas de la red REDCOS sólo es válida a nivel local.

Esta red cuenta con dos tipos de Boyas, las escalares de tipo Waverider (Datawell) y las Boyas direccionales de tipo Triaxys (Axis), estas segundas son las que están fondeadas en la zona de Cádiz.

En la figura A.3 se muestra un esquema general del tipo de fondeo empleado en estas Boyas. Se suele crear cuando es posible un falso fondo mediante flotadores sumergidos con el fin de evitar el arrastre de la línea de fondeo.

**Detalle de fondeo boya tipo triaxys**

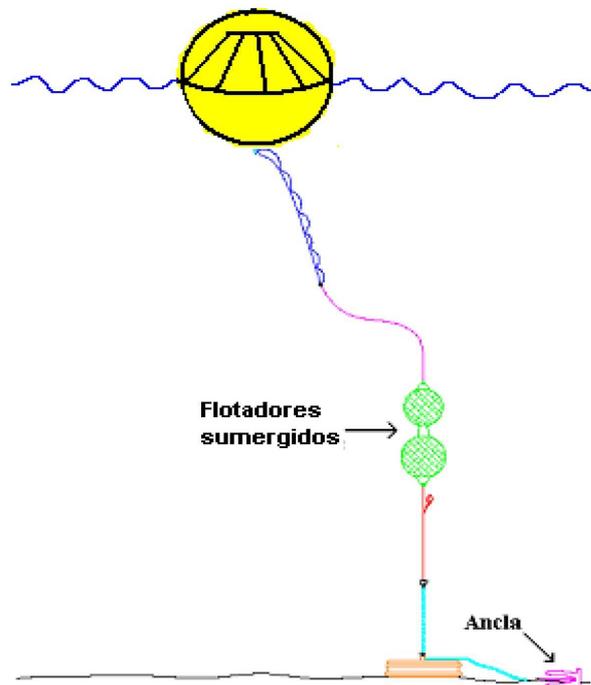


Figura A.3: Esquema de fondeo de boya Triaxys.  
Fuente: Puertos del Estado

### Obtención de datos

Las Boyas Triaxys no se limitan a la adquisición de datos, sino que además procesan y almacenan a bordo los datos. Luego tanto los datos brutos como los calculados por la Boya son transmitidos por radio a una estación receptora situada en la costa que mas tarde los envía a Puertos del Estado.

Periódicamente se recuperan de modo manual los datos brutos de oleaje almacenados en la Boya. Dichos datos son procesados en Puertos del Estado. Este segundo proceso, genera un conjunto de parámetros de estado de oleaje que no dependen de los algoritmos específicos de cada Boya.

La figura A.4 esquematiza el proceso de generación y almacenamiento seguido por los datos procedentes de las boyas Triaxys.

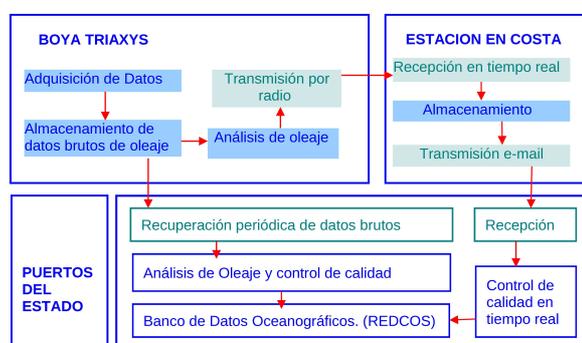


Figura A.4: Esquema de generación, transmisión y almacenamiento de las boyas Triaxys.  
Fuente: Puertos del Estado

### Parámetros disponibles

- Parámetros de Oleaje
  - Altura significativa espectral y de cruce por cero
  - Periodo medio espectral y de cruce por cero
  - Altura máxima y periodo asociado
  - Periodo significativa
  - Dirección media (Sólo boyas Triaxys)
  - Dirección media en el pico de energía (Sólo boyas Triaxys)
  - Dispersión de la dirección en el pico de energía (Sólo boyas Triaxys)

## Apéndice B

# Calibración del modelo: Simulaciones

Las simulaciones más importantes que se han realizado para la calibración del modelo se encuentran agrupadas en este apéndice. El orden que siguen es el que se ha ido siguiendo para calibrar el modelo numérico. En azul se resaltan aquellos parámetros que han sido modificados respecto de la simulación anterior y junto a cada gráfico los valores de R y Skill obtenidos seguidos de una flecha ascendente o descendente en función de que dichos valores mejoren o no.

### B.1. Periodo 1<sup>o</sup>: 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20

#### B.1.1. Simulación 11

Wave
------

- Grid: Resolución espectral
  - Malla exterior
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - Malla interior
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- Rotura inducida por el fondo:
  - Alpha: 1 (Valor por defecto)
  - Gamma: 0.73 (Valor por defecto)
- Interacciones triádicas no lineales:

- Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
- Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: JONSWAP (Valor por defecto)
  - Coeficiente de fricción: 0.038 (Valor por defecto)
- **Difracción:**
  - Desactivada (Valor por defecto)
  - Coeficiente de suavizado: -
  - Pasos de suavizado: -
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

### Flow

- **Coeficiente de arrastre por viento:**
  - Constante A: 0.005
- **Viscosidad:** 100
- **Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje:** Fredsøe

### Resultados

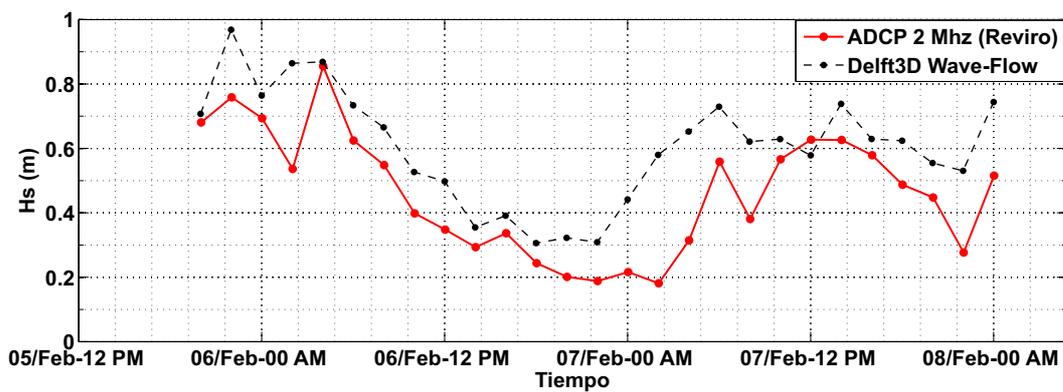


Figura B.1: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 11

R=0.84	S=0.66
--------	--------

## B. Calibración del modelo: Simulaciones

---

Se observa que la tendencia de la gráfica que da el Delft se ajusta bastante bien a la real, sin embargo, se queda bastante por encima, signo de que la fricción es baja. De modo que una buena opción puede ser aumentar un poco el valor de fricción para hacer descender la gráfica, para ello vamos a probar con el modelo de Collins, tomando un valor inicial de 0.2

### B.1.2. Simulación 14

Para las simulaciones siguientes se resaltarán de color azul, aquellos parámetros que difieran de la anterior, para facilitar su rápida localización

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1 (Valor por defecto)
  - Gamma: 0.5
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.2
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

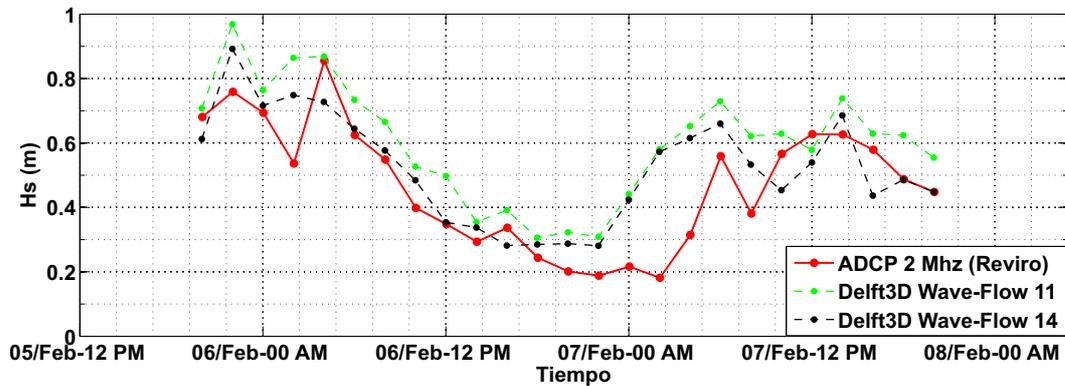


Figura B.2: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 14

$R=0.75 \downarrow$  |  $S=0.71 \uparrow$

Se obtienen unos resultados bastante peores que antes, debido a que este valor de fricción en el modelo de Collins parece ser menor que el de JONSWAP empleado en la simulación 11. Y por ello la gráfica ha ascendido.

Por último se intentará aumentar un poco el valor de fricción, por ver que ocurre. Se tomará 0.9

### B.1.3. Simulación 15

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1 (Valor por defecto)
  - Gamma: 0.6
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha:0.1 (Valor por defecto)
  - Beta:2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.9
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

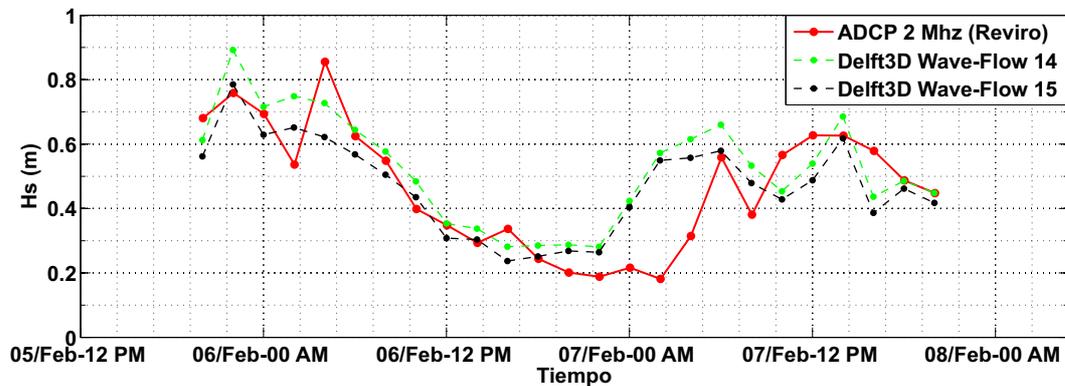


Figura B.3: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 15

$R=0.72 \downarrow$	$S=0.69 \downarrow$
---------------------	---------------------

A pesar de que la gráfica descende, los resultados empeoran, de modo que se va a cambiar de periodo para ver que ocurre. De momento los mejores resultados son los obtenidos en la simulación 11. Es importante fijarse en que el principal problema se tiene en el punto más bajo de la gráfica, entorno al 07/Feb-00 AM, dónde el Delft no consigue descender lo suficiente como para adaptarse a la gráfica real y también se ajusta regular la subida que hay a continuación.

## B.2. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22

### B.2.1. Simulación 16

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.56
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.2
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

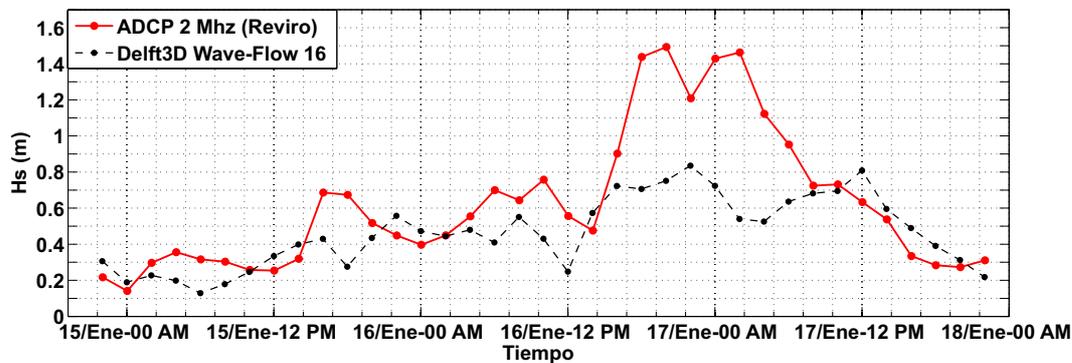


Figura B.4: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 16

**R=0.71** | **S=0.50**

Una vez más se puede ver como la tendencia es imitada bastante bien por el resultado de la simulación, sin embargo, hay un mal ajuste en los picos de altura de ola, en ellos, el Delft no llega a alcanzarlos e incluso desciende.

Se observa una fricción demasiado alta, por ello, se probará una fricción menor para intentar elevar la altura de ola, por ejemplo JONSWAP (0.038) ya que funcionó bastante bien en la simulación 11 del periodo 1<sup>o</sup>.

### B.2.2. Simulación 17

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.56
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - **Modelo:** JONSWAP
  - **Coefficiente de fricción:** 0.038
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

<b>R=0.72</b> ↑	<b>S=0.6</b> ↑
-----------------	----------------

Los resultados van mejorando a medida que se eleva la altura de ola, pero aún pueden mejorar si reducimos más la fricción ya que la altura de ola sigue estando demasiado baja respecto a la que midió el instrumento (ADCP) en la Bahía de Cádiz.

### B.2.3. Simulación 21

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.56
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - **Modelo:** Collins
  - **Coefficiente de fricción:** 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 4 (Valor por defecto)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

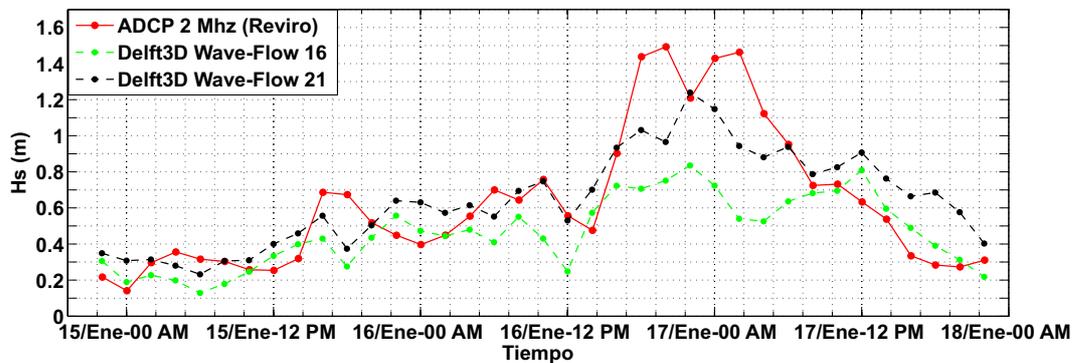


Figura B.5: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 21

<b>R=0.84</b> ↑	<b>S=0.80</b> ↑
-----------------	-----------------

Con esta fricción, la gráfica se ajusta mucho mejor a la real, alcanzando los picos máximos de altura de ola. El peor ajuste se tiene ahora en la bajada final. Pero los valores de error han mejorado considerablemente con respecto a la primera simulación del periodo, la número 16.

Para terminar con el ajuste de la fricción, se probarán dos valores más, uno por encima y otro por debajo para ver si en alguno de ellos los resultados mejoran dejando todos los demás parámetros sin modificar. De modo que en las dos simulaciones siguientes solamente se modificará el coeficiente de fricción de Collins.

### B.2.4. Simulación 27

Wave
------

- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.006

Resultados
------------

R=0.83 ↓	S=0.78 ↓
----------	----------

Si aumentamos la fricción, los resultados empeoran

### B.2.5. Simulación 28

Wave
------

- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.0003

Resultados
------------

R=0.84 ≈	S=0.80 ≈
----------	----------

La gráfica apenas nota variación ya que la fricción es muy baja. Por tanto si no podemos aumentar ni disminuir la fricción, se puede considerar la fricción ajustada con un valor de Collins 0.002

Una vez fijada la fricción podemos olvidarnos de ella, de momento, para tratar de afinar el resto de parámetros. Otro parámetro del que se dispone muy poca información es el Ancho de distribución de energía (parámetro ms del archivo wavecon). Por defecto su valor es 4 lo que equivale a un cono de dispersión de  $(24.9^\circ)$ , se va a probar con los valores más extremos para ver si hay mejoría en los resultados.

### B.2.6. Simulación 29

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.56
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 100 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

### Resultados

Los resultados obtenidos empeoran bastante, ya que este valor de "ms" ha producido un descenso de la altura de ola muy alejado de la realidad.

B.2.7. Simulación 30

Wave

- ["ms"\(Archivo Wavecon\): 1](#) (Dispersión 5.9º)

Resultados

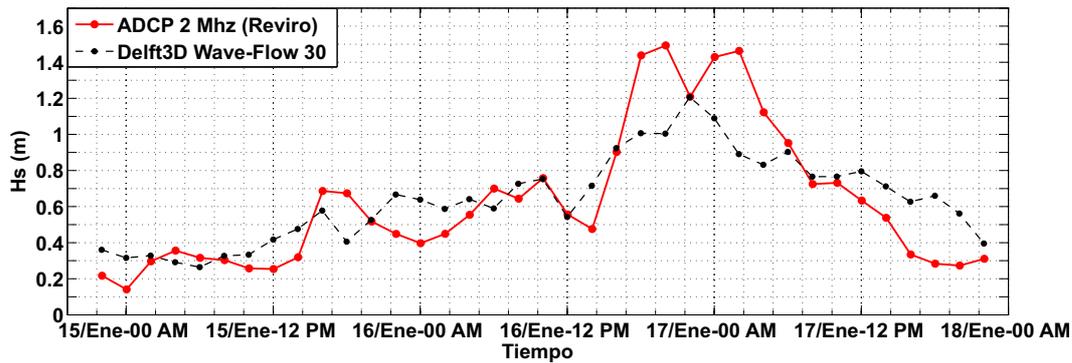


Figura B.6: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 30

R=0.85 ↑ | S=0.80 ≈

Al reducir el valor de "ms" la gráfica ha ascendido ligeramente, de modo que los resultados mejoran también levemente.

De esto se puede sacar una conclusión importante respecto a este parámetro: Aumentar el valor de "ms" produce un efecto similar en la gráfica de salida al que se produce cuando se aumenta la fricción. Por contra reducir el valor de "ms" es como reducir el valor de la fricción, la gráfica asciende manteniendo la misma forma.

A continuación se pasa a ajustar el segundo parámetro en importancia dentro del módulo Wave, **"la rotura inducida por fondo."**

La técnica a emplear será la misma que habitualmente, se probará un valor muy reducido y otro elevado para  $\gamma$  y analizaremos cual de ellos reduce más el error.

### B.2.8. Simulación 32

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.03
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

## Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

Resultado malísimo. Altura de Ola muy baja.

### B.2.9. Simulación 34

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2 (Valor por defecto)
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

Flow

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

Resultados

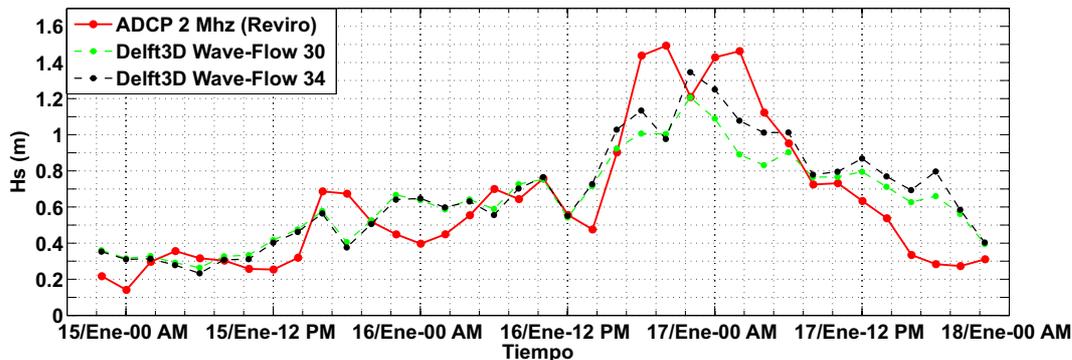


Figura B.7: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 34

$R=0.85 \simeq$  |  $S=0.83 \uparrow$

Se ha conseguido que la gráfica suba, produciéndose unos resultados bastante buenos. Para ver el efecto que produce el correcto ajuste de la fricción inducida por fondo se representa en la siguiente gráfica las simulaciones 30 (la mejor antes de ajustar el parámetro  $\gamma$ ) y la simulación 34 con dicho parámetro ya ajustado, viéndose así su efecto.

De aquí se puede extraer una segunda conclusión importante, una vez fijada de forma correcta el valor de la fricción en el fondo, modificando el valor  $\gamma$  de la rotura inducida por fondo se puede conseguir que la altura de ola se eleve (sobre todo en los picos de mayor altura de ola) cuando  $\gamma$  tiene un valor elevado, por contra disminuyendo el valor de  $\gamma$  la altura de ola disminuye.

Pero es muy importante tener presente que el valor de la fricción ha de estar correctamente ajustado, de lo contrario su efecto será tan grande que anulará por completo el efecto del resto de procesos.

A continuación se pasa al ajuste del tercer parámetro en importancia, **las interacciones triádicas no lineales.**

### B.2.10. Simulación 35

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

## Flow

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

## Resultados

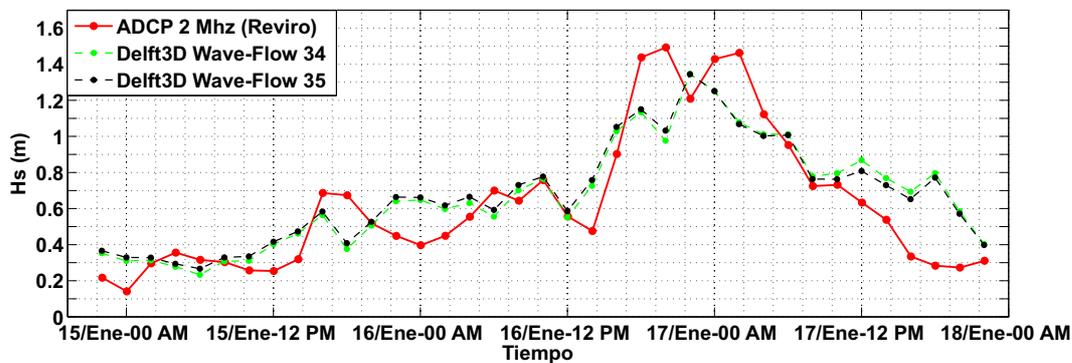


Figura B.8: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 35

<b>R=0.87</b> ↑	<b>S=0.84</b> ↑
-----------------	-----------------

Este valor del LTA produce un mejor ajuste de la gráfica, como se muestra a continuación:

Se puede ver como el ajuste es ligeramente mejor, reduciéndose así el error. En estas dos últimas gráficas se ha podido apreciar tanto el efecto que produce la variación de  $\gamma$  (valor de la rotura inducida por fondo) y la variación de  $\beta$  (Interacciones triádicas no lineales).  
COMENTAR UN POCO MÁS ESTAS DOS GRÁFICAS.

### B.2.11. Simulación 36

Esta simulación es igual que la anterior a excepción del LTA, en el que se ha probado con el valor inferior.

▪ **Interacciones triádicas no lineales:**

- Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
- Beta: 0.01

Apenas hay variación, el resultado empeora ligeramente. De modo que fijamos como mejores los parámetros de la simulación anterior (35).

De momento el ajuste conseguido en éste segundo periodo es bueno, de modo que con estos parámetros se volverá al primer periodo para tratar de ver si se consigue un mejor ajuste.

### B.3. Periodo 1º: 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20

Se debe recordar que los mejores resultados dentro de este periodo se consiguieron con la simulación 11, dónde:

R=0.84	S=0.66
--------	--------

#### B.3.1. Simulación 37

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9º)

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 100
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Fredsøe

### Resultados

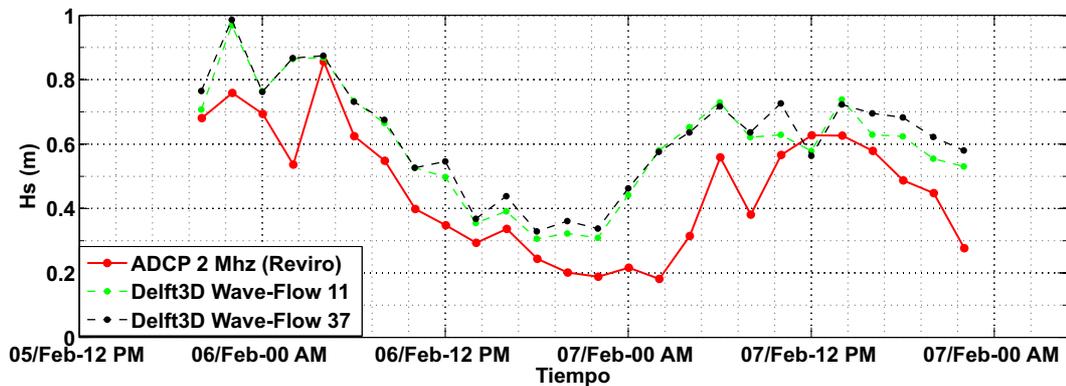


Figura B.9: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 37

$R=0.84 \simeq$	$S=0.60 \downarrow$
-----------------	---------------------

Los resultados empeoran, se puede observar claramente como al reducir la fricción con respecto a la simulación 11, la gráfica se separa de la real empeorando el ajuste.

El problema que se plantea ahora es el de encontrar unos parámetros que satisfagan todos los periodos elegidos, es decir, encontrar unos valores que permitan un ajuste del modelo en cualquier situación. Por ello se va a probar aumentando la fricción de Collins a 0.02 tanto en el periodo 1° como en el 2° manteniendo fijos el resto de parámetros para ver que ocurre.

B.3.2. Simulación 39

Wave

- Fricción del fondo:
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.02

Resultados

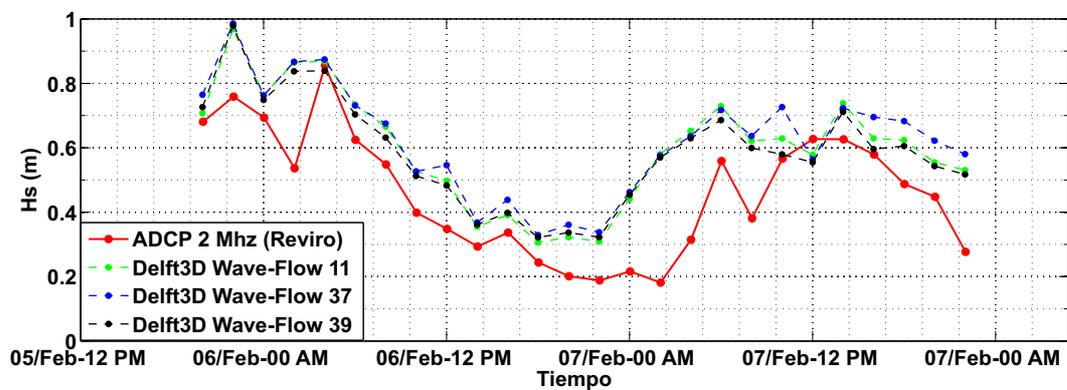


Figura B.10: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 39

$R=0.82 \downarrow$  |  $S=0.66 \simeq$

A pesar de que esta simulación no consigue mejorar la número 11, pero los resultados son muy parecidos y tiene los parámetros iguales que los del segundo periodo a excepción de la fricción, lo cual es muy interesante de casa a conseguir unos parámetros únicos.

### B.4. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22

#### B.4.1. Simulación 38

Wave
------

- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.02

Resultados
------------

R=0.85 ↓	S=0.77 ↓
----------	----------

Si bien en el primer periodo este valor de fricción era válido ya que prácticamente los resultados no variaban, aquí no ocurre lo mismo, los resultados empeoran considerablemente debido a que la fricción es demasiado alta.

Por tanto tenemos un primer periodo en el que una fricción mayor produce un mejor ajuste de la gráfica de altura y un periodo segundo en el que se necesita menor fricción de fondo manteniendo iguales el resto de valores para que el resultado sea bueno. Ahondando en el por qué de este fenómeno se observa que un motivo que de respuesta a esta diferencia entre periodos puede ser el nivel de marea. Es lo único que cambia, ya que las alturas de ola en profundidades indefinidas, así como los periodos, direcciones de procedencia del oleaje y datos de viento son bastante parecidos. Sin embargo, el primer periodo corresponde con un ciclo de marea viva mientras que el segundo corresponde con un ciclo de marea muerta.

Para tratar de verificar si esta suposición es cierta se tomará un tercer periodo a principios de febrero, dónde se tiene un pequeño temporal con elevadas alturas de ola coincidente con un ciclo de marea muerta igual que que ocurría en el periodo 2º.

Se partirán de los valores ajustados en el segundo periodo para ver si el ajuste es también válido en este periodo dado que las condiciones de oleaje y marea son muy similares, de ser así, se confirmaría esta suposición y será necesario dividir la calibración del modelo en dos sub-modelos. Teniendo unos valores para condiciones de ciclos de marea viva y otros para ciclos de marea muerta.

## B.5. Periodo 4<sup>o</sup>: 2012 02 01 18 - 2012 02 04 16

### B.5.1. Simulación 47

Wave
------

#### ■ Grid: Resolución espectral

##### ● Malla exterior

- Número de direcciones: 72
- Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 37

##### ● Malla interior

- Número de direcciones: 36
- Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 24

#### ■ Rotura inducida por el fondo:

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

#### ■ Interacciones triádicas no lineales:

- Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
- Beta: 9

#### ■ Fricción del fondo:

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.002

#### ■ Difracción:

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900

#### ■ Decrestamiento: Van der Westhuysen

#### ■ "ms"(Archivo Wavecon): 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.003
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Bijker

### Resultados

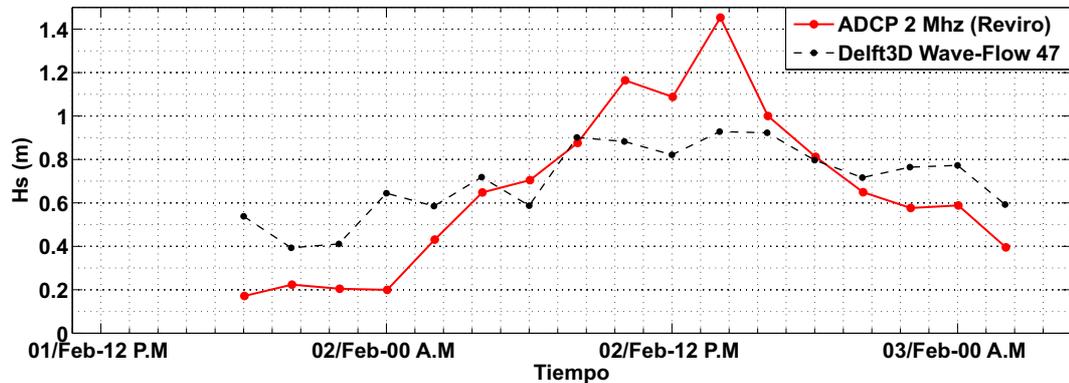


Figura B.11: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 47

**R=0.86 ↑** | **S=0.64 ↑**

Se observa que se han introducido los parámetros exactamente iguales a los de la simulación 35 ya que es donde mejores resultados se han obtenido para el segundo periodo. Pero, además se han modificado algunos parámetros del módulo Flow por primera vez para tratar de afinar aún más el modelo. Los resultados obtenidos son bastante buenos.

Se ve por tanto que los valores calibrados para el periodo 2 dan resultados bastante buenos para este periodo ya que las condiciones son muy semejantes. Pero para estar seguros de que éstos son los valores más apropiados, se probará a modificar algunos de ellos para ver si los resultados mejoran o empeoran.

### B.5.2. Simulación 48

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - **Coefficiente de fricción:** 0.02
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.003
- Viscosidad:25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Bijker

### Resultados

R=0.78 ↓	S=0.54 ↓
----------	----------

Se observa como aumentando la fricción, los resultados son peores, exactamente igual a lo que ocurría en el periodo 2.

### B.5.3. Simulación 49

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 0.6
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

<b>Flow</b>
-------------

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.003
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Bijker

<b>Resultados</b>
-------------------

<b>R=0.84</b> ↓	<b>S=0.60</b> ↓
-----------------	-----------------

También se obtienen resultados peores reduciendo el valor de la rotura inducida por fondo.

#### B.5.4. Simulación 50

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 2.2
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

<b>Flow</b>
-------------

- Coeficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.003
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Bijker

<b>Resultados</b>
-------------------

<b>R=0.85</b> $\simeq$	<b>S=0.63</b> $\simeq$
------------------------	------------------------

Apenas se aprecia variación con respecto a la simulación 47.

Con esto queda corroborada la hipótesis de que es necesario hacer una distinción entre periodos correspondientes a ciclo de marea viva y ciclos de marea muerta.

## B.6. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22

### B.6.1. Simulación 51

Para finalizar la parte del modelo correspondiente con marea muerta aplicamos los últimos ajustes del módulo Flow realizados para el periodo 4 al periodo 2.

<b>Wave</b>
-------------

■ **Grid: Resolución espectral**

● **Malla exterior**

- Número de direcciones: 72
- Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 37

● **Malla interior**

- Número de direcciones: 36
- Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 24

■ **Rotura inducida por el fondo:**

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

■ **Interacciones triádicas no lineales:**

- Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
- Beta: 9

■ **Fricción del fondo:**

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.002

■ **Difracción:**

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900

■ **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

■ **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9º)

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.003
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Bijker

### Resultados

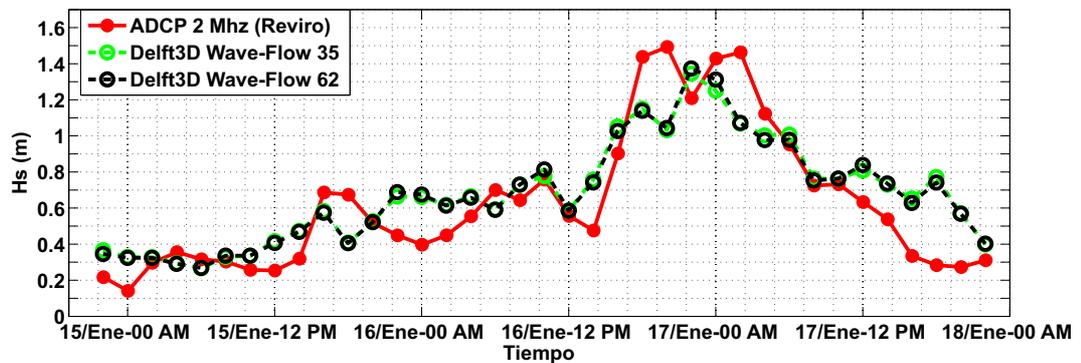


Figura B.12: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 51

R=0.89 ↑	S=0.83 ↑
----------	----------

Ya queda finalizado el modelo para las ciclos de Marea Muerta, falta terminar de calibrarlo para el ciclo de mareas vivas, por ello, volvemos al primer periodo.

## B.7. Periodo 1º: 2012 02 05 20 - 2012 02 07 20

A modo de recordatorio, las últimas simulaciones que se realizaron en este periodo fueron la 37 y la 39, la diferencia entre ellas era únicamente el valor de la fricción de Collins:

Simulación	Valor de fricción de Collins	R	S
37	0.002	0.84	0.60
39	0.02	0.82	0.66

### B.7.1. Simulación 52

En esta simulación se introducen los nuevos valores para el Flow que se ha visto que añade una buena mejoría a los resultados del modelo. En cuanto a la fricción, se probarán ambas para ver cual ofrece mejores resultados.

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 0.1 (Valor por defecto)
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - **Coficiente de fricción:** 0.02
- **Difracción:**

## B. Calibración del modelo: Simulaciones

---

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- **Coeficiente de arrastre por viento:**
  - Constante A: 0.003
- **Viscosidad:** 25
- **Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje:** Bijker

### Resultados

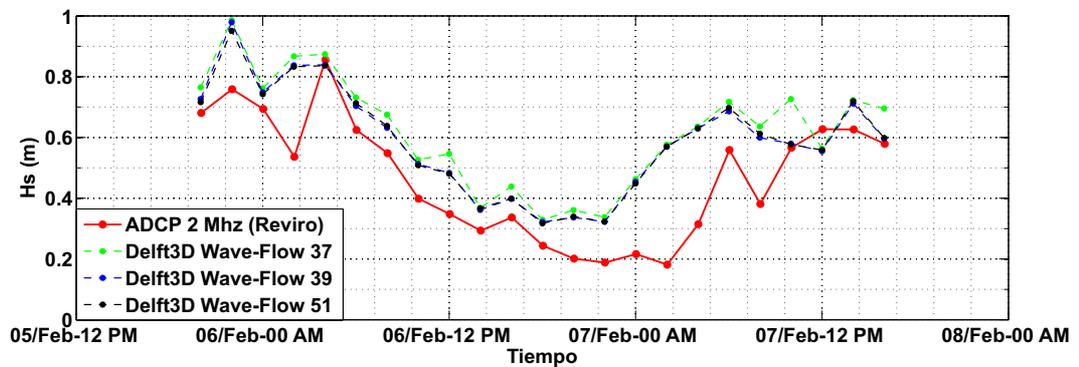


Figura B.13: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 51

$R=0.84 \simeq$	$S=0.70 \uparrow$
-----------------	-------------------

Se ha conseguido mejorar el valor de S sin reducir el de R, de modo que el modelo ha mejorado.

## B.8. Periodo 4<sup>o</sup>: 2012 02 01 18 - 2012 02 04 16

Ya que en este periodo se han obtenido los mejores resultados para la parte del modelo de marea muerta, se va a tratar de realizar un último ajuste con el propósito de afinar al máximo la fiabilidad del modelo.

### B.8.1. Simulación 56

A parte de introducir las mejoras de ajuste en los parámetros del Flow, lo único que se va a modificar es el parámetro  $\alpha$  del LTA que siempre se ha dejado por defecto. Para ello se tratará de ir subiendo dicho valor y analizando los resultados obtenidos.

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**

- **Malla exterior**

- Número de direcciones: 72
- Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 37

- **Malla interior**

- Número de direcciones: 36
- Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 24

- **Rotura inducida por el fondo:**

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

- **Interacciones triádicas no lineales:**

- Alpha: 0.5
- Beta: 9

- **Fricción del fondo:**

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.002

- **Difracción:**

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900

## B. Calibración del modelo: Simulaciones

- Decrestamiento: Van der Westhuysen
- "ms"(Archivo Wavecon): 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Grant et al.

### Resultados

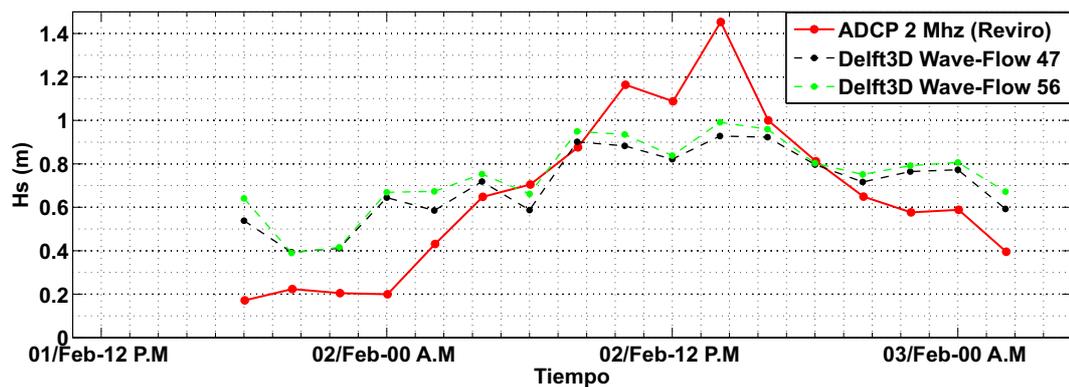


Figura B.14: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 56

$R=0.86 \uparrow$  |  $S=0.70 \simeq$

Se puede observar como estas modificaciones producen un mejor ajuste de la gráfica de altura de ola.

### B.8.2. Simulación 61

Wave
------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 1.2
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - **Constante A:** 0.005
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Grant et al.

### Resultados

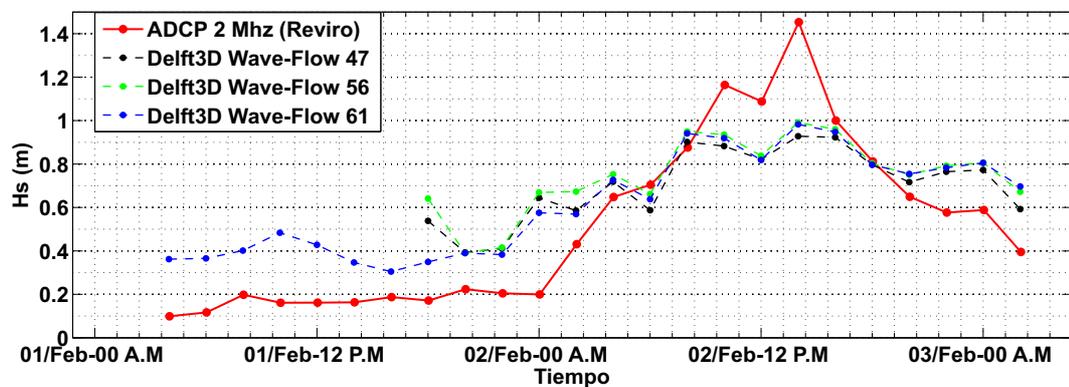


Figura B.15: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 61

<b>R=0.91</b> ↑	<b>S=0.80</b> ↑
-----------------	-----------------

De modo que, la modificación del parámetro  $\alpha$  del LTA produce una mejora considerable en el ajuste del modelo numérico, sin embargo hay una cosa que se debe tener en cuenta y es que es posible que el modelo no converja numéricamente cuando se modifica este parámetro ya que le afecta bastante. La recomendación personal es empezar utilizando un valor de  $\alpha$  elevado (1.2) y únicamente en caso de que el modelo no converja ir reduciéndolo hasta su valor por defecto (0.1).

Para terminar de corroborar el modelo para los ciclos de marea muerta se va a simular un nuevo periodo perteneciente al mes de marzo, si el resultado obtenido en este periodo es razonable, se puede afirmar que esta parte del modelo se encuentra calibrada.

## B.9. Periodo 3.1<sup>o</sup>: 2012 03 01 00 - 2012 03 03 18

A parte de introducir las mejoras de ajuste en los parámetros del Flow, lo único que se va a modificar es el parámetro  $\alpha$  del LTA que siempre se ha dejado por defecto. Para ello se tratará de ir subiendo dicho valor y analizando los resultados obtenidos.

### B.9.1. Simulación 63

A parte de introducir las mejoras de ajuste en los parámetros del Flow, lo único que se va a modificar es el parámetro  $\alpha$  del LTA que siempre se ha dejado por defecto. Para ello se tratará de ir subiendo dicho valor y analizando los resultados obtenidos.

<b>Wave</b>
-------------

- **Grid: Resolución espectral**
  - **Malla exterior**
    - Número de direcciones: 72
    - Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 37
  - **Malla interior**
    - Número de direcciones: 36
    - Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
    - Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
    - Número de divisiones de frecuencia: 24
- **Rotura inducida por el fondo:**
  - Alpha: 1
  - Gamma: 1.2
- **Interacciones triádicas no lineales:**
  - Alpha: 1.2
  - Beta: 9
- **Fricción del fondo:**
  - Modelo: Collins
  - Coeficiente de fricción: 0.002
- **Difracción:**
  - Activada
  - Coeficiente de suavizado: 0.9
  - Pasos de suavizado: 900
- **Decrestamiento:** Van der Westhuysen
- **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9<sup>o</sup>)

## B. Calibración del modelo: Simulaciones

---

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Grant et al.

### Resultados

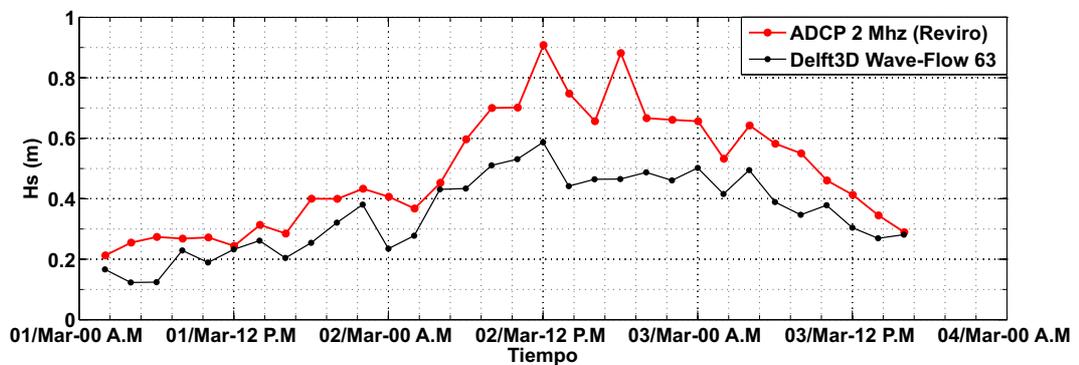


Figura B.16: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 63

R=0.91	S=0.61
--------	--------

PONER UNA CONCLUSION.

## B.10. Periodo 2º: 2012 01 14 22 - 2012 01 17 22

### B.10.1. Simulación 64

Para terminar de cerrar la parte del modelo en ciclos de marea muerta, lo único que falta es aplicar estos parámetros al segundo periodo y ver si los resultados siguen siendo buenos.

<b>Wave</b>
-------------

■ **Grid: Resolución espectral**

● **Malla exterior**

- Número de direcciones: 72
- Frecuencia más baja: 0.03 Hz  $\Rightarrow T_p = 33.33$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 37

● **Malla interior**

- Número de direcciones: 36
- Frecuencia más baja: 0.05 Hz  $\Rightarrow T_p = 20$  s
- Frecuencia más alta: 1 Hz  $\Rightarrow T_p = 1$  s
- Número de divisiones de frecuencia: 24

■ **Rotura inducida por el fondo:**

- Alpha: 1
- Gamma: 1.2

■ **Interacciones triádicas no lineales:**

- Alpha: 1.2
- Beta: 9

■ **Fricción del fondo:**

- Modelo: Collins
- Coeficiente de fricción: 0.002

■ **Difracción:**

- Activada
- Coeficiente de suavizado: 0.9
- Pasos de suavizado: 900

■ **Decrestamiento:** Van der Westhuysen

■ **"ms"(Archivo Wavecon):** 1 (Dispersión 5.9º)

### Flow

- Coefficiente de arrastre por viento:
  - Constante A: 0.005
- Viscosidad: 25
- Modelo de cálculo de la tensión debido a las fuerzas del oleaje: Grant et al.

### Resultados

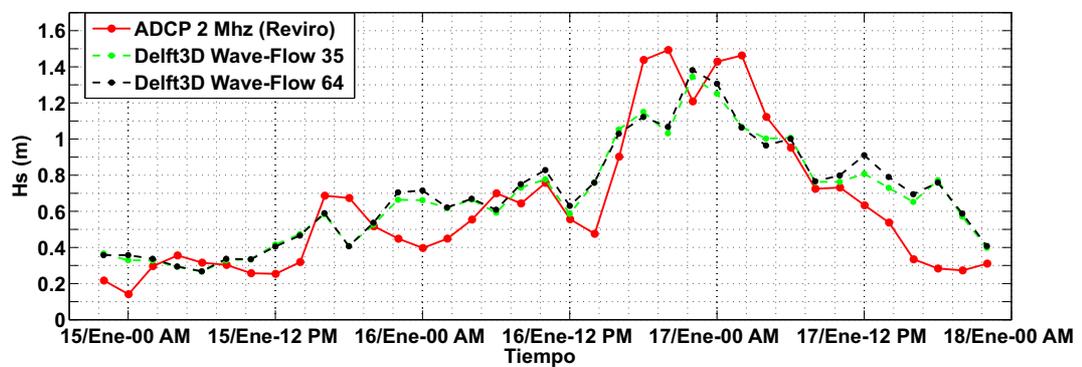


Figura B.17: Gráfica de Altura de Ola. Simulación 64

R=0.85 ↓	S=0.80 ↓
----------	----------

No mejora con el valor de LTA igual a 1.2, de modo que es mejor dejarlo en 0.1 o como mucho 0.5



## Apéndice C

# Cálculo del error: Coeficiente de correlación R y Skill

El buen o mal ajuste de una simulación se determina mediante dos parámetros que determinan la cantidad de error, estos son:

### C.1. Coeficiente de correlación múltiple: R

Este parámetro refleja si la gráfica de altura de ola procedente de la simulación sigue la tendencia de la gráfica de altura de ola medida con el instrumento, es decir, que ambas ascienden y descienden en los mismos puntos.

Su formulación es:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{Delft_i} - \overline{H_{Delft}}) (H_{ADCP_i} - \overline{H_{ADCP}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{Delft_i} - \overline{H_{Delft}})^2 \sum_{i=1}^n (H_{ADCP_i} - \overline{H_{ADCP}})^2}} \quad (C.1)$$

Siendo:

$H_{Delft}$ : El valor de altura de ola obtenido de la simulación del programa.

$H_{ADCP}$ : El valor de altura de ola obtenido de la medición del instrumento.

$\overline{H_{Delft}}$ : Media de los valores de altura de ola obtenidos de la simulación del programa.

$\overline{H_{ADCP}}$ : Media de los valores de altura de ola obtenidos de la medición del instrumento.

El valor de R puede oscilar entre  $-1 \leq R \leq 1$  siendo mejor el ajuste cuanto más próximo este R de  $-1$  o  $1$ .

## C.2. Coeficiente Skill

Este parámetro centra su valor del error en los picos de la gráfica, es decir, refleja si la gráfica de altura de ola procedente de la simulación es capaz de alcanzar los picos de la gráfica de altura de ola medida con el instrumento independientemente de que siga la tendencia o no. Si los picos se alcanzan bien el valor del coeficiente Skill será bueno.

Es importante utilizar ambos parámetros juntos, ya que cada uno mide cosas diferentes.

Su formulación es:

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |H_{Delft_i} - H_{ADCP_i}|^2}{\sum_{i=1}^n (|H_{Delft_i} - \overline{H_{ADCP}}| + |H_{ADCP_i} - \overline{H_{ADCP}}|)^2} \quad (C.2)$$

El valor de *Skill* puede oscilar entre 0 y 1, siendo 1 un ajuste perfecto.

## Apéndice D

# Parámetros del modelo numérico.

Se analizan cada uno de los parámetros del programa, explicando en que consisten y cómo afectan cada uno de ellos.

Algunos valores como las constantes tomarán siempre el mismo valor, otros habrá que ir modificando su valor para calibrar el modelo, se especificará en cada caso si es un valor siempre constante o si su valor cambia durante la calibración del modelo numérico.

Se distingue entre los parámetros del módulo WAVE y los del módulo FLOW.

### D.1. Módulo WAVE

#### D.1.1. Description (Descripción)

Este apartado permite añadir una breve descripción a la simulación que se está realizando para llevar un orden.

#### D.1.2. Hydrodynamics (Hidrodinámica)

Aquí se especifica al programa si la simulación va a ser exclusivamente del WAVE o por contra se llevará a cabo una simulación conjunta WAVE y FLOW. En este proyecto es WAVE y FLOW.

**Este valor es constante.**

#### D.1.3. Grids (Malla)

##### Computational grid (Malla computacional)

Hay que importar todos las mallas que se vayan a emplear para el cálculo de la propagación del oleaje. En este proyecto hay que cargar las dos mallas anidadas una dentro de la otra

**Este valor es constante.**

### Bathymetry (Batimetría)

Se cargan los archivos de batimetría que se crearon anteriormente. Se necesita un archivo de batimetría (.dep) para cada grid que se emplee.

**Este valor es constante.**

### Spectral Resolution (Resolución espectral)

Este apartado de resolución espectral es del que menos información se dispone para su calibración. Se divide a su vez en dos partes:

- **Directional space (Espacio direccional):** Aquí se debe especificar el número de partes en que se quiere dividir la circunferencia a la hora de considerar las direcciones.
- **Frequency space (Espacio de frecuencias):** Aquí hay que especificar la frecuencia más baja y la más alta que se quiere considerar para el oleaje. O lo que es lo mismo los periodos mayores y menores que se tendrán en cuenta durante el cálculo del oleaje.

Al no haber información al respecto de como afectan estos parámetros al modelo se han tomado los valores que se emplearon en un proyecto similar en la Bahía de San Francisco [Elias and Hansen \(2012\)](#) para empezar a calibrar.

**Este valor es NECESARIO CALIBRARLO.**

### Nesting (Anidamiento)

Hay que decirle al programa que la malla exterior se encuentra anidada dentro de la malla interior.

**Este valor es constante.**

### Hydrodynamics (Hidrodinámica)

El programa necesita saber que hacer con los resultados que obtiene del módulo FLOW, si los utiliza para dotar de mayor precisión al WAVE o si los ignora. Como se está llevando a cabo una simulación conjunta de ambos módulos es fundamental marcar la opción "Use and extend" para que aplique los resultados del FLOW a dar mayor precisión al WAVE.

**Este valor es constante.**

#### D.1.4. Time frame (Periodo de tiempo)

Si no se emplease el módulo FLOW, en este apartado habría que indicarle al programa cada una de las fechas en las que se llevará a cabo el cálculo. Al activar el cálculo conjunto con el FLOW, esta ventana se desactiva y ahora se deben introducir estas fechas de cálculo en el archivo de texto externo denominado "Wavecon".

## D. Parámetros del modelo numérico.

---

### D.1.5. Boundaries (Condiciones de contorno)

El programa da la posibilidad de elegir diferentes formas de introducir las condiciones de contorno al modelo: por dirección, por coordenadas, etc.

La forma que se ha empleado es mediante orientación y dentro de ella se ha seleccionado la dirección Oeste. Con esta opción el programa interpreta que los datos de oleaje introducidos al modelo entran por aquellos bordes de la malla cuyas normales se aproximan más a la orientación oeste.

**Este valor es constante.**

### D.1.6. Obstacles (Obstáculos)

Se pueden añadir algunos obstáculos al modelo en zonas donde haya muros de contención, de escollera, muros sumergidos, etc. Con esto se consigue simular mejor la realidad de la zona de estudio.

Se han añadido cuatro obstáculos: Uno para el puerto de Cádiz (simulando los muros de escollera que bordean todo el puerto), dos para la desembocadura del Guadalete y otro para el puerto de Santa María.

Para todos los obstáculos se ha elegido la opción "Dam" que quiere decir que el coeficiente de transmisión depende de las condiciones del oleaje incidente y de la altura del obstáculo. Se ha de definir también el coeficiente de reflexión en tanto por uno que se estime más conveniente y unos coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  que se obtienen del [Deltares \(2011\)](#) en función del tipo de obstáculo.

**Este valor es constante.**

### D.1.7. Physical parameters (Parámetros físicos)

Es uno de los apartados más importantes de todo el programa, es el que más se modificará para intentar calibrar el modelo numérico ya que son estos parámetros físicos los que controlan en mayor medida el correcto funcionamiento del modelo.

#### Constants (Constantes)

Se ha de especificar el valor de algunas constantes como son la gravedad, densidad del agua del mar, posición del eje x respecto al norte y el sistema de coordenadas.

Los valores adoptados son:

- Gravedad:  $9.81 \frac{m}{s^2}$
- Densidad del agua de mar:  $1025 \frac{Kg}{m^3}$
- Posición del eje X respecto al norte: 90, eso quiere decir que el eje X señala hacia el Este
- Sistema de coordenadas: Cartesiano

- **Fuerzas:** Ratio de disipación de energía del oleaje

Estos valores son constantes.

### Processes (Procesos)

- **Generation (Generación):** Este es el primer parámetro que se debe ajustar dentro del apartado procesos, que como se ha dicho antes, es el más importante. Se utilizará siempre el modelo de tercera generación por las innumerables ventajas que ya se han comentado anteriormente. Véase el apartado **E.1.2.3: Modelos de tercera generación** para una mayor información.
- **Depth induced breaking (Rotura inducida por fondo):** Este parámetro fue descrito físicamente a la hora de estudiar la ecuación de balance de acción (**Apéndice F: Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN**). Pero ahora hay que calibrar el modelo y hay que darle un valor.

La rotura inducida por fondo se define mediante dos parámetros dentro del programa, uno es  $\alpha$  que determina el ratio de disipación, puede oscilar entre 0 (no tiene ningún efecto) y 1 (el efecto de la disipación por fondo es total), siempre marcaremos  $\alpha = 1$  para que el programa tenga en cuenta todo el efecto.

En segundo término a considerar es  $\gamma$ , que se define:

$$\gamma = \frac{\text{Altura de ola máxima}}{\text{Profundidad}} \quad (\text{D.1})$$

Se han encontrado en varios artículos una fórmula empírica que en función de la pendiente se obtiene el valor de  $\gamma$ . Se puede usar para una primera aproximación:

$$\gamma = 0.55 + 0.88 \exp[-0.012 \cotan(\beta)] \quad (\text{D.2})$$

(Booji et al., 1999)

donde  $\beta$  es el valor de la pendiente del fondo en tanto por uno.

Para el caso de la Bahía de Cádiz, la pendiente media del fondo se puede considerar en tanto por uno del 0.08, de modo que se obtiene un valor de  $\gamma$ :

$$\gamma = 0.55 + 0.88 \exp \left[ -0.012 \frac{1}{\tan(0.08)} \right] = 1.3$$

## D. Parámetros del modelo numérico.

---

- **Interacciones triádicas no lineales (LTA):** Es otro de los parámetros de los que menos información se posee al tratarse de un fenómeno bastante complejo. La única forma de ajustar sus valores es probando, en primer lugar con valor que adopta por defecto e ir modificándolo para ver si los resultados que se van obteniendo mejoran. También es una buena opción intentar utilizar valores similares a los empleados en estudios realizados en la misma zona o zonas similares [Elias and Hansen \(2012\)](#).

Los parámetros a ajustar son  $\alpha$ , que es el valor del coeficiente de proporcionalidad  $\alpha_{EB}$  que se veía en el **Apéndice F: Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN** cuando se explicaban las ecuaciones de las interacciones triádicas no lineales. Y  $\beta$ , este valor determina el ratio entre la máxima frecuencia y la frecuencia principal para las cuales las interacciones son calculadas.

- **Bottom friction (Fricción del fondo):** Es el parámetro que más afecta al cálculo numérico de las simulaciones, de modo que si este valor no está bien ajustado, su efecto es tan fuerte que aunque se varíen el resto de variables del modelo, los resultados no cambiarán. Se debe dedicar el tiempo que sea necesario a calibrar de forma correcta la fricción del fondo para cada zona de estudio. El WAVE da la opción de elegir entre tres modelos de fricción.

Es muy utilizado el primero, modelo JONSWAP, donde se aconseja utilizar el valor de 0.067 cuando se tiene un oleaje tipo Sea y 0.038 para oleaje tipo Swell. El modelo de fricción empleado en este proyecto es el de Collins donde:

$$C_{bottom} = C_f g U_{rms} \quad (D.3)$$

Dónde:

$$U_{rms} = \frac{\omega a}{\sinh(kh)}$$

$$a = 0.5\overline{Hs}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

$$L = \sqrt{ghT_p}$$

El único valor que se desconoce de estas fórmulas es  $C_f$ , y es por tanto, la constante a calibrar. En el artículo [Hsiao and Shemdin \(1978\)](#) propone los siguientes valores para este coeficiente:

- **Profundidades indefinidas:** 0.015
- **Fondos de arena:** 0.01
- **Fondos de arena gruesa.** 0.1

En la Bahía de Cádiz el fondo es fundamentalmente de arena fina. De modo que para tener un valor con el que empezar se ha tomado  $C_f = 0.01$ , si se toma como altura de ola media  $\overline{H_s} = 1.5m$ , periodo pico medio  $\overline{T_p} = 15s$  y una calado de  $100m$  obtenemos un valor de fricción de fondo de  $C_{bottom} = 0.02$  que será el que se introduzca en el programa como valor orientativo.

- **Difracción:** Proceso que podemos activar o desactivar. Una vez activado hay que definir dos valores: Coeficiente de suavizado y pasos de suavizado. La forma de definir estos parámetros es mediante el ensayo de valores de valores hasta dar con lo que mejor ajusten. En este proyecto se han empleado 0.9 y 900 respectivamente.

Estos valores **ES NECESARIO CALIBRARLOS.**

### Various (Varios)

En este apartado aparecen una serie de procesos que se pueden marcar o desmarcar, pero que no hay que introducir ningún valor al programa. De modo que para que la ejecución del modelo sea lo más realista posible es necesario activar todos los procesos.

- **Wind growth (Crecimiento (de la ola) por viento).**
- **Quadruplets (Cuadrupletes).**
- **Whitecapping (Decrestamiento):** Éste es el único donde se ha de elegir cual de los dos modelos usar:
  - [Komen et al. \(1984\)](#)
  - [Van der Westhuysen et al. \(2007\)](#): Éste es el que se ha empleado

Estos valores **ES NECESARIO CALIBRARLOS.**

## D. Parámetros del modelo numérico.

---

En la tabla D.1 se recogen los valores máximos y mínimos para cada parámetro y el valor por defecto que usa el programa:

Parámetros	L. Inf.	L. Sup.	Valor por defecto	Unds.
<b>Generación</b>			3 <sup>a</sup> Generación	-
<b>Rotura inducida por fondo:</b>			Modelo $B - J$	-
Alfa	0.1	10	1.0	-
Gamma	0.55	1.2	0.73	-
<b>Interacciones triádicas no lineales:</b>			Desactivado	-
Alfa	0.001	10	0.10	-
Beta	0.001	10	2.2	-
<b>Fricción del fondo:</b>			JONSWAP	-
Coefficiente de fricción del fondo			0.067	$\frac{m^2}{s^3}$
<b>Difracción:</b>			Desactivada	-
Coefficiente de suavizado	0	1.0	0.2	-
Pasos de suavizado	1	999	5	-

Tabla D.1: Límites superior e inferior y valor por defecto para cada parámetro

### D.1.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos)

De este apartado únicamente se han modificado la precisión de convergencia que viene indicado como el tanto por ciento de puntos húmedos en los que el modelo debe converger, por defecto, 98 % y el número máximo de iteraciones que se deben realizar en cada paso o barrido, se han elegido 50.

El procedimiento de cálculo del DELFT es el siguiente: Al ejecutar la simulación el programa empieza a realizar la primera iteración, dentro de ella se realizan cuatro barridos ("sweep") y al termina el cuarto barrido la primera iteración finaliza con un porcentaje de puntos húmedos en los que el modelo ha convergido, debiéndose alcanzar el valor que se le haya indicado (por defecto 98 %). A continuación, continúa con la segunda iteración, dentro de la cual vuelve a realizar los cuatro barridos y finaliza con otro porcentaje de puntos húmedo donde ya hay convergencia del modelo. Pues el modelo finalizará cuando se alcance la cantidad mínima de puntos donde se debe garantizar la convergencia o bien cuando se alcance el número máximo de iteraciones.

Un ejemplo sería:

iteration 1;	sweep 1
+iteration 1;	sweep 2
+iteration 1;	sweep 3
+iteration 1;	sweep 4
accuracy OK in 0.11 % of wet grid points ( 98.00 % required)	
iteration 2;	sweep 1
+iteration 2;	sweep 2
+iteration 2;	sweep 3
+iteration 2;	sweep 4
accuracy OK in 13.25 % of wet grid points ( 98.00 % required)	

...

**Estos valores son constantes.**

### D.1.9. Output curves (Curvas de salida)

Aquí no se ha modificado nada, dejándolo todo en sus valores pr defecto.

### D.1.10. Output parameters (Parámetros de salida)

El modo computacional que se ha elegido es el estacionario, cada estado de mar es independiente del otro y sus condiciones son estacionarias; hay que especificar dónde se quieren obtener los resultados. Al tener dos mallas anidadas, se marcarán las dos mallas como datos de salida y por último se pueden especificar los denominados puntos de control.

El programa ofrece dos formas de presentar los resultados, una de ellas es mediante una gráfica donde asigna a cada punto de la malla un dato de altura de ola, periodo, etc. Otra es en forma de tabla, en la que para cada punto de control que se introduzca mediante coordenadas UTM obtendremos los datos de salida en dicho punto específicamente.

Esto resulta de vital importancia por ejemplo a la hora de calibrar el modelo, ya que solo obteniendo los datos en el punto exacto donde el instrumento ha estado midiendo podremos comparar las gráficas de altura de ola. **Estos valores son constantes.**

## D.2. Additional parameters (Parámetros adicionales)

Este apartado no hace falta tocarlo.

### D.3. Módulo FLOW

#### D.3.1. Description (Descripción)

Permite añadir una breve descripción al modelo, igual que en el WAVE.

#### D.3.2. Domain (Dominio)

##### Grid Parameter (Parámetros de la malla)

Se introduce en el modelo la malla que va a utilizar el FLOW para el cálculo. Son dos archivos, el ".grdz" el ".enc". Para el Flow se ha tomado como grid la malla exterior exclusivamente.

Se debe también introducir al modelo la latitud en la que se encuentra la zona de estudio. **Este valor es constante.**

##### Bathymetry (Batimetría)

Se selecciona el archivo de batimetría ".dep".

**Este valor es constante.**

#### D.3.3. Time Frame (Periodo de tiempo)

Hay tres tipos de tiempos:

- **Tiempo de referencia:** Es el tiempo cero, a partir del cual se empieza a contar el tiempo. Es muy importante recordar que el tiempo de inicio de simulación NO tiene por qué ser el tiempo de referencia.
- **Tiempo de inicio de la simulación:** Tiempo en el que la simulación empieza.
- **Tiempo de finalización de la simulación:** Tiempo en el que la simulación termina.
- **Paso de tiempo:** Se deja por defecto el valor de 1 minuto.

**Estos valores varían cada vez que modifiquemos el periodo de tiempo en el que se realiza la simulación.**

#### D.3.4. Processes (Procesos)

De todos los procesos que están disponibles en el FLOW, únicamente se tendrán en cuenta para este proyecto el viento y oleaje. También hay que marcar la opción de "Online Delft3D-Wave" para que se realice una simulación conjunta entre ambos módulos.

Algunos de los procesos que no se han considerado son: salinidad, temperatura y sedimentos. **Este valor es constante.**

### D.3.5. Initial conditions (Condiciones iniciales)

Como sólo se han seleccionado viento y oleaje, el único valor inicial que se debe introducir es el del nivel de marea. Para ello, se debe abrir el archivo “wavecon” que se creó para los estados de mar en el módulo WAVE y elegir el primer valor de la columna de nivel de marea (water level).

**Este valor varía cada vez que se modifique el periodo de tiempo en el que se realiza la simulación.**

### D.3.6. Boundaries (Fronteras)

El nombre que se le va a dar a esta frontera es Oeste y consta de los siguientes valores:

- **Coordenadas de la frontera:** Hemos de especificar de dónde a dónde va en coordenadas de la malla M y N.

M1=244	N1=245
M2=5	N1=245

Tabla D.2: Definición de la frontera en coordenadas del grid

**Este valor es constante.**

- **El tipo de forzamiento:** Marea astronómica.

Hay que introducirle al programa los armónicos de marea, en primer lugar se tomaron los valores del mareógrafo de Bonanza y de Tarifa, pero se observó que los valores de amplitud de marea que daba eran bastante menores que los que se daban en la Bahía de Cádiz provocando grandes errores.

La solución que se adoptó fue la de colocar un mareógrafo en el río San Pedro durante la campaña de campo para que midiese la elevación de la superficie justo en nuestra zona de estudio. Una vez se tuvieron los datos del mareógrafo se extrajeron los principales armónicos de marea mediante el programa de Matlab "t\_tide": [Pawlowicza et al. \(2002\)](#)

De todos los armónicos de marea existentes, se han incluido en el módulo Flow únicamente los más importantes en cuanto a mayor amplitud se refiere, es decir, diurnos (terminados en 1), semidiurnos (terminados en 2) y cuadridiurnos (terminados en 4).

Los valores introducidos son:

**Este valor es constante.**

### D.3.7. Physical parameters (Parámetros físicos)

#### Constants (Constantes)

Las constantes hidrodinámicas son:

## D. Parámetros del modelo numérico.

---

Nombre	Amplitud (m)	Fase (°)
NU2	0.040132	46.9
L2	0.019875	74.02
T2	0.021461	84.16
R2	0.005943	68.41
K2	0.105847	80.41
MN4	0.012574	117.71
M4	0.028158	160.34
MS4	0.013229	229.81

Tabla D.3: Armónicos de marea en la Bahía de Cádiz

- **Gravedad:**  $9.81 \text{ m/s}^2$
- **Densidad del agua:**  $1025 \text{ Kg/m}^3$
- **Densidad del aire:**  $1 \text{ Kg/m}^3$
- **Coefficiente de arrastre por viento:**

Como se verá en la tabla D.4 que hay a continuación, el valor del coeficiente de arrastre por viento esta formado por tres valores. Los dos últimos no se deben modificar dejándolos con su valor por defecto (0.00723). Pero el primero es uno de los valores que es necesario ir modificando a la hora de calibrar el modelo.

Para comenzar se ha tomado el valor propuesto en el artículo [Álvarez et al. \(2003\)](#), donde se propone fijar un valor de 0.003 para la Bahía de Cádiz.

De modo que la tabla para el coeficiente de arrastre por viento es:

Puntos de rotura	Coefficiente	Velocidad del viento ( $m/s$ )
A	0.003	0
B	0.00723	100
C	0.00723	100

Tabla D.4: Valores del coeficiente de arrastre por viento

**Este valor ES NECESARIO CALIBRARLO.**

### Roughness (Rugosidad)

Dentro del apartado de rugosidad, hay que definir que modelo se va a emplear para la rugosidad del fondo y darle al programa unos valores de  $U$  y  $V$ .

Después de consultar diferente bibliografía y realizar varias pruebas se ha decidido emplear la fricción de Chezy, usando los valores de  $U = 80$  y  $V = 60$ . Ambos valores tenían un valor

por defecto de 65.

Hay que elegir también el modelo de cálculo para las tensiones debidas al forzamiento del oleaje. Para empezar se toma el modelo de **Fresøe**.

Estos valores **ES NECESARIO CALIBRARLOS.**

### Viscosity (Viscosidad)

Se toma un valor de viscosidad uniforme de  $100 \text{ m}^2/\text{s}$  para empezar.

Estos valores **ES NECESARIO CALIBRARLOS.**

### Wind (Viento)

Para el viento, se debe generar un archivo aparte “.wnd” que consta de dos columnas, una con la velocidad del viento y otra con su dirección (son las dos últimas columnas del archivo wavecon). Se importa dicho archivo para incorporarlo a los datos de entrada del modelo.

### D.3.8. Numerical parameters (Parámetros numéricos)

A pesar de los muchos parámetros que se pueden encontrar, únicamente interesa uno, es el denominado **smoothing time**. Éste tiene la peculiaridad de que cuanto más pequeño es este valor más preciso es el modelo, pero más riesgo existe de que no converja. Lo que hace es eliminar el ruido inicial que se producen en los datos resultado de una simulación con modelos numéricos: Alturas de ola, periodo, dirección, . . . . Finalmente, el valor adoptado es **15**.

Este valor es constante.

### D.3.9. Operations (Operaciones)

Nada

### D.3.10. Monitoring (Monitorización)

Se deben especificar que puntos de control se quieren utilizar para que el programa saque los resultados en ellos.

### D.3.11. Adicional parameters (Parámetros adicionales)

Nada

### D.3.12. Output (Salida)

Dentro de Output es necesario modificar el apartado de Storage.

Aparecen varios tiempos que se deben definir antes de iniciar el modelo, por lo que es importante tener muy claro que significa cada uno de ellos:

- **Store map results:**

- **Start time:** Se introduce la fecha de comienzo de la simulación.
- **End time:** Se introduce la fecha de finalización de la simulación.
- **Interval:** Se refiere a cada cuanto se quiere que el programa saque los resultados del cálculo. A la hora de calibrar, como los instrumentos que estaban midiendo en la Bahía de Cádiz miden cada dos horas, interesa que obtengamos un dato de altura de ola propagada cada dos horas, a pesar de que tengamos un dato de entrada a cada hora.

Por ello, se introduce el valor de 120 min (2h).

- **History interval:** Se introduce el mismo valor que antes, 120 min.

- **Store communication file:**

- **Start time:** Se introduce la fecha de comienzo de la simulación.
- **End time:** Se introduce la fecha de finalización de la simulación.
- **Interval:** Aquí se debe introducir con que intervalo hay datos de entrada en el módulo Wave, de modo que como es uno cada hora, se elige 60 min.
- **Restart time:** Se deja el valor por defecto 1440 min.



## Apéndice E

# Modelos numéricos de simulación de oleaje

### E.1. Clasificación de los modelos de oleaje

Un modelo capaz de predecir la evolución del oleaje en cualquier situación sería demasiado caro computacionalmente. En su lugar existen una gran variedad de modelos aplicables, cada uno de ellos a diferentes situaciones específicas. Para poder escoger el mejor modelo en cada ocasión es necesario conocer los principales procesos físicos que predominan en cada zona de estudio.

Dentro de un perfil típico de costa se pueden diferenciar cuatro dominios claramente diferenciados:

- *Deep Oceans*: Es la zona de profundidades indefinidas, donde los efectos del fondo se pueden ignorar. En este dominio los efectos del fondo no se deben considerar.
- *Shelf Seas*: Es el área de transición entre el *deep ocean* y la *shoaling zone*. Aquí ya no es depreciable el efecto del fondo. La interacción con el fondo tiene una importancia similar al resto de fenómenos físicos propios del dominio de *deep ocean*.
- *Shoaling Zone*: Es la zona de asomeramiento, la característica fundamental de esta zona es que los efectos del fondo son dominantes, sobre todo la rotura debida a la disminución de la profundidad.
- *Harbours*: Engloba aquellas zonas donde se producen interacciones entre las olas y algún tipo de estructura (diques, espigones, estructuras portuarias, etc.) El proceso físico más importante en estas zonas es la difracción de las olas con las estructuras anteriores.

Existen distintos tipos de modelos, la clasificación más importante es la de Battjes, 1994:

#### E.1.1. Modelos de resolución de fase

Estos modelos llegan a predecir la amplitud y la fase de cada ola particular. Son usados para condiciones de oleaje muy variables en dominios pequeños, es decir, cuando las propiedades físicas a considerar varían rápidamente (en pocas longitudes de onda) o cuando lo hace la batimetría o línea de costa. Generalmente no consideran generación ni disipación de energía.

Por todo esto, las zonas donde son más utilizados es en zonas de asomeramiento (*Shoaling Zone*) y zonas de interacción con estructuras (*Harbours*). Su alto coste computacional hace que sean reemplazados por otros modelos en aquellas zonas donde sea posible emplear otro tipo de modelos.

Dentro de los modelos de resolución de fase se pueden encontrar tres tipos:

#### **E.1.1.1. Modelos de la integral de contorno**

Este tipo de modelos resuelven la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{E.1})$$

siendo  $\Phi$  la velocidad potencial. Realmente no son un tipo de modelos adecuados para aplicarlos a los problemas de olas originadas por el viento ya que son muy costosos computacionalmente debido a que tienen en cuenta al mismo tiempo las estructuras vertical y horizontal del frente de olas, además de tener limitaciones propias debido a las hipótesis realizadas para el desarrollo de la ecuación de Laplace como es el ignorar la viscosidad. Se suelen utilizar como herramienta para el estudio de propiedades de fluidos irrotacionales.

#### **E.1.1.2. Modelos de la ecuación de la pendiente suave**

Estos modelos se basan en la ecuación de la pendiente suave desarrollada por Berkhoff (1972)

$$\nabla(C C_g \nabla \phi) + k^2 C C_g \phi = 0 \quad (\text{E.2})$$

siendo  $C$  la velocidad de fase y  $C_g$  la velocidad de grupo. Esta ecuación tiene en cuenta los efectos de refracción, difracción, asomeramiento y reflexión de las olas en ausencia de corrientes.

El inconveniente de este tipo de modelos es que utilizan una ecuación diferencial parcial elíptica, con lo que, para su solución, deben especificarse condiciones de contorno para cada contorno del dominio y la condición inicial en todos los puntos interiores. Esto implica que el coste computacional es muy grande, incluso para regiones pequeñas.

Esto ha hecho que se desarrolle una aproximación parabólica de la ecuación anterior en la que se deja de considerar la reflexión de las olas en la dirección en la que éstas se propagan. Con esta aproximación se consigue que el modelo sea mucho más eficiente computacionalmente. La aproximación parabólica realizada por Radder (1979) es:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \left[ ik - \frac{1}{2k C C_g} \frac{\partial(k C C_g)}{\partial x} \right] \Phi + \frac{i}{2k C C_g} \frac{\partial}{\partial y} \left( C C_g \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \quad (\text{E.3})$$

estando el eje  $X$  en la dirección principal de propagación de las olas.

Partiendo de esta aproximación parabólica, Kirby y Dalrymple (1983) desarrollaron el modelo REF/DIF. Este modelo permite el estudio de ondas propagándose por un fondo suavemente variable teniendo en cuenta los efectos de la refracción y la difracción

Los datos de entrada del modelo son una malla con su batimetría y las condiciones del oleaje (altura, dirección de ola en todas las condiciones de contorno, periodo y amplitud de las olas). La principal desventaja es que se necesitan 5 datos de longitud de onda para resolver una ola, dada la densidad de datos que necesita, el modelo REF/DIF se suele aplicar a regiones pequeñas (del orden de kilómetros).

El uso de este tipo de modelos ha sido sobre todo para predecir la influencia de los procesos de refracción, difracción y reflexión <sup>1</sup> cerca de puertos, islas y demás estructuras. Siempre en ámbitos pequeños por el motivo antes explicado.

Otro modelo basado en la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave E.3 es el Modelo REFRAC. Se trata de un modelo numérico explícito que permite estimar la refracción y peraltamiento del oleaje lineal, incluyendo el efecto de la interacción ola-corriente. La gran ventaja frente al modelo REF/DIF es que puede ser usado en grandes áreas porque requiere muy pocos datos de entrada. Como desventaja, su incapacidad para simular efectos de difracción, reflexión e interacción no lineales ola-ola.

### E.1.1.3. Modelos de Boussinesq

Los modelos basados en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq se basan en la ecuación de la continuidad y conservación del momento de inercia para ondas de superficie libre en aguas poco profundas, modelando la propagación de ondas desde profundidades indefinidas hasta reducidas. Partiendo de las ecuaciones originales de Boussinesq se han realizado muchas aproximaciones y modificaciones lo que ha dado lugar a un gran número de modelos que incluyen los efectos de difracción, refracción, reflexión, interacción entre olas y corrientes e interacciones triádicas no lineales, así como la transferencia de energía por parte del viento y la disipación de energía.

Algunos de estos modelos son:

- BOUSS 2D (Nwogu y Demirbilek, 2001)
- FUNWAVE 2D (Wei et al., 1995)
- COULWAVE (Lynett y Liu, 2004)
- **MIKE 21 BW** desarrollado por Madsen y Sørensen (1992), es uno de los modelos basado en la ecuación de Boussinesq más utilizados y es capaz de simular flujos no es-

---

<sup>1</sup>Si bien la ecuación E.3 despreciaba la refracción al ser una aproximación, este modelo añade extensiones a la forma básica para aumentar el ámbito de aplicación de esta aproximación parabólica, incluyendo así el efecto de la refracción, además de las corrientes, transferencia de energía debida al viento, etc.

tacionarios en dos dimensiones. A diferencia de otros modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq, es capaz de modelar la propagación de oleaje desde profundidades indefinidas hasta profundidades reducidas sobre una batimetría variable teniendo en cuenta los efectos producidos por la refracción, difracción, reflexión e interacciones no lineales entre olas. Los problemas de este modelo son dos: El primero es que requiere varios datos de entrada para resolver la ecuación de olas, por lo tanto solo son aplicables en pequeñas regiones; el segundo es que no simula la disipación de energía.

### E.1.2. Modelos de promediado de fase o Modelos espectrales

Este tipo de modelos calcula cantidades medias en lugar de resolver cada ola en particular, para ello lo que hacen es describir el espectro de energía de la ola, y por lo tanto la superficie irregular del mar se describe mediante una función espectral de energía  $F(f, \theta, x, y, z)$

Estos modelos en su versión más simple permiten calcular alturas significativas de ola y periodos pico, sin embargo, en su versión mas moderna son capaces de predecir la evolución temporal y espacial del espectro de energía de la ola  $F$ . La ecuación que rige dicha evolución y por tanto, la que se resuelve en este tipo de modelos es la ecuación del transporte:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + C_g \nabla F = S_{tot} \quad (E.4)$$

$F = F(f, \theta, x, y, z)$ : Función espectral de energía.

$f$ : Frecuencia del oleaje.

$\theta$ : Dirección de propagación del oleaje.

$x, y$ : Coordenadas horizontales.

$t$ : Tiempo.

$C_g$ : Velocidad de grupo.

$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$ : Término fuente.

$S_{in}$ : Término fuente debido a la entrada de energía debida al viento.

$S_{nl}$ : Término fuente debido a la entrada de energía debido a las interacciones no lineales entre olas de diferente frecuencia dentro del espectro dando como resultado una transmisión de energía a otra componente (ola dentro del espectro). Si la energía se transfiere a una tercera ola, este proceso se conoce como TRIAD. Si hay cuatro componentes interactuando, esto se conoce como CUADRUPLETE.

$S_{ds}$ : Término fuente representativo de la pérdida/disipación de energía.

Son modelos menos costosos computacionalmente y por lo tanto son los más usados en la mayoría de las situaciones.

En función de la forma que tenga este término fuente  $S_{tot}$  podemos diferenciar entre:

### E.1.2.1. Modelos de primera generación

Fueron desarrollados a partir de 1957 y asumían que:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{ds} \quad (\text{E.5})$$

Estos modelos no incluyen los efectos de las interacciones no lineales entre olas (término  $S_{nl}$ )

Los modelos de primera generación han sido aplicados con buenos resultados en muchas ocasiones, pero valen solamente en aquellas situaciones concretas para los que han sido diseñados.

### E.1.2.2. Modelos de segunda generación

Aparecieron entorno a 1973 y ya incorporan el término correspondiente a las interacciones no lineales entre olas del espectro:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (\text{E.6})$$

Sin embargo, es preciso matizar. El término  $S_{ds}$  indica disipación por decrestamiento (*white-capping*) y con respecto al término  $S_{nl}$ , en primer lugar se intentó realizar un cálculo exacto de este término, pero resultó ser demasiado costoso computacionalmente, por lo que finalmente se implementó de manera paramétrica con un número entre 3 y 5 parámetros. Se toman los parámetros espectrales del JONSWAP (*JOint North Sea WAve Project*)

La inclusión de las representaciones paramétricas de  $S_{nl}$  hicieron mejorar la capacidad del modelo. El problema es que la simple formulación del término no lineal impedía resultados mejores.

### E.1.2.3. Modelos de tercera generación

Fueron presentados alrededor de 1985, aparentemente el término fuente es igual, pero consideran de forma distinta el cálculo del término no lineal  $S_{nl}$

$$S_{tot} = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (\text{E.7})$$

A diferencia de los anteriores, en los modelos de tercera generación todos los procesos relevantes están representados de forma explícita sin ninguna restricción, entre ellos  $S_{in}$  y  $S_{ds}$ . Además no se impone ninguna forma definida del espectro. Con respecto al término no lineal, un modelo de tercera generación debería obtener una solución completa para dicho término, sin embargo, esto es imposible actualmente en 2 dimensiones desde el punto de vista del cálculo computacional. Pero estos modelos ofrecen una gran mejora respecto de los anteriores al no utilizar las simples formulaciones paramétricas usadas por los modelos de segunda generación. En su lugar utilizan la aproximación de interacción discreta (DIA, *discrete interaction approximation*) de (Hasselmann, 1985). La característica de la aproximación de interacción discreta es que al contrario que las parametrizaciones de segunda generación que sólo tenían un pequeño número de grados de libertad (entre 3 y 5), la DIA tiene tantos grados de libertad como valores hay en el espectro ya discretizado.

Por todo lo anterior, los modelos de tercera generación supusieron un gran avance en la predicción con modelos numéricos del oleaje. Y es por ello que todos los modelos de promediado de fase usados hoy en día son de tercera generación.

Entre los modelos de este tipo más usados, podemos encontrar los siguientes:

- WAM (WAve Model): Fue de los primeros en aparecer y su desarrollo y publicación se debe al grupo WAMDI (WAve Model Development and Implementation) en 1988
- WAVEWATCH (Tolman, 1991)
- TOMAWAC (Benoit et al., 1996)
- SWAN (Booji et al., 1999; Ris et al., 1999)
- STWAVE (Simth et al., 2001)
- MIKE 21 (Spectral Wave): (DHI, 2005)

## Apéndice F

# Ecuaciones del software Delft3D: WAVE/SWAN

### F.1. Ecuación de balance de acción

En el SWAN el oleaje se encuentra descrito por el espectro bidimensional de la densidad de acción  $N(\sigma, \theta)$  en lugar del espectro de densidad de energía  $E(\sigma, \theta)$  debido a que en presencia de corrientes la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no. La relación entre ambos es  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ .

Este modelo se basa en la ecuación de balance de acción para describir la evolución del espectro de oleaje representada en coordenadas cartesianas y en el espacio frecuencia-dirección por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{F.1})$$

El primer término de la parte izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de acción, el segundo y el tercer término representan la propagación de  $N(\sigma, \theta)$  en el espacio geográfico (con velocidades de propagación  $c_x$  y  $c_y$ ), el cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo  $c_\sigma$  al velocidad de propagación en el espacio  $\sigma$ ). El quinto término representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación  $c_\theta$  en el espacio  $\theta$ ). Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal del oleaje [Whitham \(1974\)](#).

El término de la derecha de la ecuación F.1 ( $S = S(\sigma, \theta)$ ) es el término fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente de energía, los cuales se pasará a explicar a continuación.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (\text{F.2})$$

### F.1.1. Transferencia de energía al oleaje debida al viento, $S_{in}$

El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar.

De la radiación solar que incide sobre la superficie de la Tierra, una parte de ella se invierte en producir un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire de intensidad variable (viento).

La transferencia de energía del viento al oleaje es un proceso físico que aún no está del todo entendido, la diferencia de presión en la atmósfera produce un movimiento desigual de las masas de agua que más adelante son arrastradas en forma de oleaje debido a la fricción entre el mar y el viento.

La expresión del término fuente correspondiente a la transmisión de energía debida al viento se encuentra constituida por la suma de un término lineal  $A$  más un término de crecimiento exponencial  $B$ :

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (F.3)$$

El término de crecimiento lineal  $A$  se calcula mediante la expresión de [Cavaleri and Malanotte \(1981\)](#):

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{2\pi g^3} (U_* \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad (F.4)$$

donde  $\theta_w$  es la dirección del viento,  $H$  es un filtro para eliminar el crecimiento del oleaje a frecuencias menores que la frecuencia de Pierson-Moskowitz y viene dado por:

$$H = \exp \left[ - \left( \frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right] \quad (F.5)$$

donde  $\sigma_{PM}^*$  es la frecuencia pico del estado de mar completamente desarrollado y reformulado en términos de la velocidad friccional:

$$\sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi \quad (F.6)$$

El crecimiento exponencial (B) está representado por la expresión basada en la teoría de [Janssen \(1991\)](#):

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{U_*}{c_{ph}} \right)^2 \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma \quad (\text{F.7})$$

siendo:

$c_{ph}$ : Velocidad de fase

$\rho_a$ : Densidad del aire

$\rho_w$ : Densidad del agua

$U_*$ : Velocidad de fricción

$\theta$ : Dirección de propagación del oleaje

$\theta_w$ : Dirección del viento

$\beta$ : La constante de Miles, que se calcula a partir de la altura crítica no dimensional  $\lambda_h$ :

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda_h \ln^4(\lambda_h) \quad \lambda_h \leq 1 \quad (\text{F.8})$$

$$\lambda_h = \frac{gz_e}{c_{ph}^2} e^r \quad r = \frac{\kappa C}{|U_* \cos(\theta - \theta_w)|} \quad (\text{F.9})$$

siendo  $\kappa$  la constante de Von Karman de valor 0.41 y  $z_e$  la longitud de rugosidad efectiva. En el caso de que  $\lambda_h \geq 1$ , la constante de Miles  $\beta$  es igual a 0.

Cuando el usuario define los parámetros de entrada al modelo, uno de ellos es la velocidad del viento a 10 metros de altura de la superficie ( $U_{10}$ ), pero el SWAN en su modelo computacional trabaja con  $U_*$  de modo que es necesario convertirla. El programa la calcula mediante un proceso iterativo a partir de la  $U_{10}$

### F.1.2. Interacciones no lineales entre olas, $S_{nl}$

En primer orden, las olas marinas se pueden considerar como la superposición de componentes espectrales libres e independientes cada una con una frecuencia. Sin embargo, a órdenes más altos existen interacciones entre las diferentes componentes espectrales, las cuales producen un intercambio de energía, explicando así el crecimiento al principio de la formación de las olas.

Se consideran dos casos:

- **Interacción triádica** (*triad interactions*): Es la interacción de tres olas, en este caso dos olas interactúan de manera no lineal y transfieren energía a una tercera. Este tipo de interacciones son de mayor importancia en aguas someras, mientras que en aguas de mayor profundidad su importancia es mucho menor.

- **Interacción entre cuádrupletes** (*quadruplets interactions*): Son las interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas que pueden intercambiar energía entre ellas si se cumplen ciertas condiciones. Este tipo de interacciones es de mayor importancia en aguas profundas.

### Interacciones entre cuádrupletes

Hasselmann encontró en 1962 [Hasselmann \(1962\)](#) que en profundidades indefinidas las interacciones no lineales dominantes son las debidas a grupos de cuatro olas, las denominadas interacciones entre cuádrupletes. Éstas interacciones transfieren energía de las frecuencias altas a las bajas, produciendo el movimiento del pico espectral hacia frecuencias más bajas. Se vio que estos grupos de olas podían intercambiar energía cuando se cumplían la siguiente condición de resonancia:

$$\begin{aligned}\overline{k_1} + \overline{k_2} &= \overline{k_3} + \overline{k_4} \\ \overline{\sigma_1} + \overline{\sigma_2} &= \overline{\sigma_3} + \overline{\sigma_4}\end{aligned}\tag{F.10}$$

siendo  $\overline{k_i}$  el vector número de onda de la ola y  $\sigma = 2\pi f$  la frecuencia angular de la onda.

Para el cálculo exacto de la transferencia no lineal de energía  $S_{nl}$  se hace necesario resolver la integral de Boltzman <sup>1</sup> ya que la cantidad de cambio de las distribuciones de densidad de las partículas  $\frac{\partial n_1}{\partial t}$  está directamente relacionado con  $S_{nl}$

Sin embargo a pesar de la tecnología disponible hoy en día, la resolución exacta de dicha integral es demasiado costosa desde el punto de vista computacional como para ser usada en la mayoría de los modelos numéricos.

En este sentido [Hasselmann et al. \(1985\)](#) fue el responsable de encontrar un método aproximado para resolver las interacciones no lineales entre cuádrupletes mediante el método de **Aproximación de Interacción Discreta (DIA)**.

En este método se consideran dos cuádrupletes: El primero esta formado por cuatro ondas cuyos vectores número de onda son  $(k_1, k_2, k_3$  y  $k_4$ . Se asumen que los vectores  $k_1$  y  $k_2$  son iguales en módulo, dirección y sentido y están alineados. El vector  $k_3$  forma un ángulo  $\theta_3 = 11.5$  con respecto a  $k_1$  y  $k_2$ , mientras que el vector  $k_4$  forma un ángulo de  $\theta_3 = -33.6$ .

El segundo esta formado por otras cuatro ondas cuyos vectores número de ondas adoptan una configuración espejo del cuádruplete anterior, es decir,  $k'_1 = k_1$  y  $k'_2 = k_2$ . Y ahora  $k'_3$  forma un ángulo  $\theta_3 = -11.5$  y  $k'_4$  forma un ángulo de  $\theta_4 = 33.6$ .

En la figura F.1 se puede ver de forma más clara el esquema de los vectores número de onda:

---

<sup>1</sup>  $\frac{\partial n_1}{\partial t} = \int \int \int G(\overline{k_1}, \overline{k_2}, \overline{k_3}, \overline{k_4}) \delta(\overline{k_1} + \overline{k_2} - \overline{k_3} - \overline{k_4}) \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) [n_1 n_3 (n_4 - n_2) + n_2 n_4 (n_3 - n_1)] d\overline{k_1} d\overline{k_2} d\overline{k_3}$

---

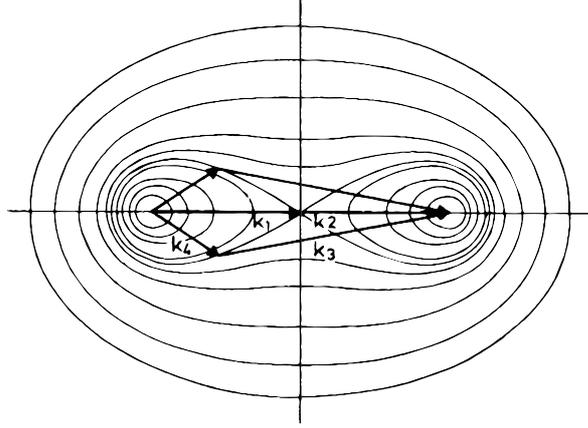


Figura F.1: Configuración de los cuadrupletes en el método de la Aproximación de Interacción Discreta. Fuente: [Hasselmann et al. \(1985\)](#)

En este método se asume que  $k_1 = k_2$ , de modo que las nuevas condiciones de resonancia están dadas por:

$$\begin{aligned}
 k_1 + k_2 &= k_3 + k_4 \\
 \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\
 \sigma_3 &= (1 + \lambda_n l) \sigma_1 \\
 \sigma_4 &= (+ - \lambda_n l) \sigma_1
 \end{aligned} \tag{F.11}$$

Donde  $\lambda_n l$  es una constante que toma un valor de 0.25

Con esta aproximación (la realizada por el método DIA), el término fuente  $S_{nl4}(\sigma, \theta)$  viene representado por:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \tag{F.12}$$

donde  $S_{nl4}^*(\sigma, \theta)$  se refiere al primer cuadruplete (con  $\theta_3 = 11.5$  y  $\theta_4 = -33.6$ ) y  $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$  se refiere al segundo (con  $\theta_3 = -11.5$  y  $\theta_4 = 33.6$ ):

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4} = (\alpha_1, \sigma, \theta) - \delta(\alpha_2, \sigma, \theta) - \delta(\alpha_3, \sigma, \theta) \tag{F.13}$$

con  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = (1 + \lambda)$  y  $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ .

### Interacciones triádicas

En profundidades reducidas, las interacciones no lineales que toman mayor fuerza son las triádicas, lo que hacen es redistribuir la energía de las altas frecuencias a otras menores, así los espectros pasan de tener un solo pico a tener varios a medida que se van acercando a la costa. El problema está en que el modelado de las interacciones triádicas en términos de densidad de energía  $E(\sigma, \theta) = N(\sigma, \theta) \cdot \sigma$  es sumamente complejo.

En 1995 Eldeberky y Battjes consiguieron una aproximación bastante buena para el cálculo de las interacciones triádicas, el DTA (*Discrete Triad Approximation*) (Eldeberky and Battjes, 1995). Partiendo del DTA, Eldeberky en 1996 modificó la formulación creando el LTA (*Lumped Triad Approximation*) (Eldeberky, 1996). El SWAN tiene implementado esta aproximación y su formulación es la siguiente:

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{F.14})$$

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \text{máx}[0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin(\beta_i)| E^2(\frac{\sigma}{2}, \theta) - 2E(\frac{\sigma}{2}, \theta) E(\sigma, \theta)] \quad (\text{F.15})$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{F.16})$$

siendo  $\alpha_{EB}$  <sup>2</sup>un coeficiente de proporcionalidad. Las velocidades de ola y de grupo son respectivamente  $c$  y  $c_g$ . La bifase  $\beta_i$  se aproxima con

$$\beta_i = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{U_r}\right) \quad (\text{F.17})$$

El número de Ursell  $U_r$  se define como:

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2} \quad (\text{F.18})$$

$$\bar{T} = \frac{2\pi}{\bar{\sigma}}$$

$H_s$ : La altura de ola significativa

$d$ : Es la profundidad o calado

$J$ : Coeficiente de interacción (Madsen y Sorensen, 1993)

Esta es la aproximación que el SWAN tiene implementada para el cálculo de las interacciones no lineales entre tres olas, las denominadas interacciones triádicas.

---

<sup>2</sup>Aunque aquí se estén explicando de forma teórica toda la formulación que hay detrás del programa, en el **Apéndice D: Parámetros del modelo numérico**. se definirán cada uno de los parámetros a introducir por el usuario en el modelo. Uno de ellos es  $\alpha_{EB}$

### F.1.3. Disipación de energía en aguas profundas debido al White-capping, $S_{ds,w}$

Esta forma de disipación de energía nada tiene que ver con el efecto que el fondo produce en las olas, está relacionado con la transferencia de energía del viento a las olas, la cual produce un aumento de la amplitud de éstas que alcanzado un punto se vuelven inestables y rompen. Esta forma de rotura se denomina decrestamiento (*white-capping*) y se reconoce por la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas.

En el Delft3D hay que elegir entre usar la formulación de [Komen et al. \(1984\)](#) o la de [Van der Westhuysen et al. \(2007\)](#).

Se ha elegido utilizar la formulación de Van der Westhuysen debido a que al ser más reciente incluye la de Komen y añade términos nuevos haciéndola mucho más completa.

La expresión de Van de Westhuysen se compone de dos partes denominadas: contribución a la disipación por rotura,  $S_{dis,break}$  y contribución mas débil de no rotura,  $S_{dis,non-break}$ :

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = f_{br}(\sigma)S_{dis,break} + [1 - f_{br}(\sigma)]S_{dis,non-break} \quad (F.19)$$

El primer término:

$$S_{dis,break}(\sigma, \theta) = C_{ds} \left[ \frac{B(k)}{B_r} \right]^{\frac{p}{2}} [\tanh(kd)]^{\frac{2-p}{4}} \frac{1}{g^2} \frac{1}{k^2} E(\sigma, \theta) \quad (F.20)$$

donde:

$C_{ds}$ : Es una constante de valor  $C_{ds} = 5.0 \times 10^{-5}$

$B(k)$ : Se denomina saturación espectral, su expresión es:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} k^4 \phi(k, \theta) d\theta \quad (F.21)$$

donde  $\phi(k, \theta)$  es el espectro expresado en función del número de onda en lugar de con frecuencias

$B_r$ : Es una constante denominada Nivel de saturación espectral, de valor  $1.75 \times 10^{-3}$

$k$ : Es el número de onda

$d$ : Es el calado o profundidad

$p$ : Es una función de  $u_*/c$ :

$$p\left(\frac{u_*}{c}\right) = 3 + \tanh \left[ 25 \left( \frac{u_*}{c} - 0.1 \right) \right] \quad (F.22)$$

$g$ : Constante de gravedad universal

$E(\sigma, \theta)$ : Espectro de densidad de energía

El segundo término:

$$S_{dis,non-break}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \left( \frac{k}{\tilde{k}} \right)^q \left( \frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right) \tilde{\sigma} E(\sigma, \theta) \quad (F.23)$$

$C'_{ds}$ : Constante de valor  $2.36 \times 10^{-5}$

$\tilde{k}$ : Es el número de ondas medio que viene dado por:

$$\tilde{k} = \left[ E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty dfrac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-2} \quad (F.24)$$

siendo  $E_{tot}$  la energía total, representada por:

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (F.25)$$

$\tilde{s}$ : Es la pendiente del oleaje media,  $\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}}$

$\tilde{s}_{PM}$ : Es una constante de valor  $\sqrt{3.02 \times 10^{-3}}$

$r$  y  $q$ : Son constantes y valen respectivamente 4 y 1

$\tilde{\sigma}$ : Frecuencia media

$$\tilde{\sigma} = \left[ E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty dfrac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right]^{-1} \quad (F.26)$$

Por último,  $f_{br}$  es factor que se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{br}(\sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \left[ 10 \left( \left( \frac{B(k)}{B_r} \right)^{1/2} - 1 \right) \right] \quad (F.27)$$

#### F.1.4. Término debido a la rotura por disminución de la profundidad, $S_{ds,br}$

La disminución de profundidad que las olas van experimentando a medida que éstas se propagan desde profundidades indefinidas hasta la costa provoca un aumento de la altura de dicho oleaje. Cuando la relación  $\frac{\text{Altura de ola}}{\text{Profundidad}}$  es muy grande, las olas comienzan a romper y la energía se disipa rápidamente. En aguas con poca profundidad este proceso es muy dominante.

En el SWAN se utiliza el modelo de [Battjes and Janssen \(1978\)](#):

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} = \frac{\alpha_{BJ} Q_b \bar{\sigma} H_m^2}{8\pi} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}} \quad (F.28)$$

con:

$D_{tot}$ : Tasa media de disipación de energía por unidad horizontal debida a la rotura

$$D_{tot} = -\frac{1}{4}\alpha_{BJ}Q_b \left( \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) \quad (\text{F.29})$$

$E(\sigma, \theta)$ : Espectro de densidad de energía

$E_{tot}$ : Es la energía total, su expresión está en la ecuación F.25

$\alpha_{BJ}$ : Es una constante que el usuario debe introducir manualmente en el modelo. se hablará de ella más adelante, por defecto su valor es igual a 1

$Q_b$ : Asumiendo una distribución de Rayleigh y que todas las olas por encima de una cierta altura rompen, la fracción de olas que rompen es  $Q_b$  y se puede calcular así:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2} \quad (\text{F.30})$$

$\bar{\sigma}$ : Es la frecuencia media. Su expresión viene dada por la ecuación F.26

$H_m^2 = \gamma d$ : Siendo  $\gamma$  un parámetro de rotura de valor constante que el usuario debe introducir manualmente en el modelo a la hora de calibrarlo. También se verá más adelante.

De modo que a la hora de calibrar el modelo, en lo que al término de rotura por disminución de la profundidad se refiere, el usuario debe introducir los valores de  $\alpha_{BJ}$  y  $\gamma$  de forma manual en el módulo WAVE del Delft3D.

### **F.1.5. Disipación de energía por fricción con el fondo $S_{ds,b}$**

En profundidades reducidas, las olas pierden energía debido a la interacción con el fondo. Esta pérdida de energía es suma de una serie de factores: fricción con el fondo, choque con las piedras y arenas, percolación, interacciones con las irregularidades del fondo, etc.

No se tiene evidencia experimental de que ningún modelo de la fricción con el fondo sea mejor que otro. Por este motivo se han implementado en el SWAN las formulaciones de los tres modelos más importantes para que sea decisión del usuario decidir que modelo se ajusta mejor a las condiciones de su zona de estudio.

Las formulaciones de los tres modelos de fricción con el fondo comparten la expresión general:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (\text{F.31})$$

La diferencia entre un modelo u otro es la forma de definir el coeficiente de fricción del fondo  $C_{bottom}$ .

### Modelo empírico de Hasselmann, (1973) (JONSWAP)

En este modelo, el coeficiente de fricción puede tomar dos valores diferentes en función del tipo de oleaje, para oleaje tipo SEA (Mar de viento)  $C_{bottom} = 0.038\text{m}^2\text{s}^{-3}$ , mientras que para estados de mar totalmente desarrollados en aguas someras (SWELL),  $C_{bottom} = 0.067\text{m}^2\text{s}^{-3}$

Este coeficiente debe ser elegido por el usuario, siendo libre de poder elegir cualquier otro valor diferente a la hora de intentar calibrar el modelo.

### Modelo empírico de Hasselmann y Collins, (1968)

Éste es el modelo empleado en este informe técnico.

Según Collins, el coeficiente de fricción es definido mediante la expresión:

$$C_{bottom} = C_{fw} g U_{rms} \quad (\text{F.32})$$

donde:

$C_{bottom}$  : Es el coeficiente de fricción. Éste es el valor que se deberá introducir en el programa a la hora de introducir los parámetros de entrada.

$C_{fw}$ : Es una constante cuyo valor es modificable y se debe calibrar de forma empírica, se vera más adelante. De modo que fijando una altura de ola media  $U_{rms}$  modificando este parámetro se obtiene el  $C_{bottom}$  que se ha introducir en el módulo WAVE.

$U_{rms}$ : Es el movimiento orbital del fondo, definido por:

$$U_{rms} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma}{2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{F.33})$$

### Modelo empírico de Madsen et al. (1988)

Es una formulación muy similar a la de Hasselmann y Collins, solo que el coeficiente de fricción con el fondo es función de la longitud de rugosidad del fondo,

$$C_{bottom} = f_{wr} \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (\text{F.34})$$

$f_{wr}$ : Coeficiente de fricción no dimensional:

$$\frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} + \log_1 0 \left[ \frac{1}{4\sqrt{f_{wr}}} \right] = m_f + \log_1 0 \left[ \frac{a_b}{K_N} \right] \quad (\text{F.35})$$

$m_f = -0.08$  (Jonsson y Carlsen, 1976)

---

$a_b$ : Coeficiente de expresión:

$$a_b^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (\text{F.36})$$

$K_N$ : Longitud de la rugosidad del fondo, éste es el valor que el usuario debe introducir en el modelo. Por defecto se adopta un valor de 0.05 m.



## Apéndice G

# Ecuaciones del software Delft3D: FLOW

### G.1. Ecuaciones de gobierno

El Delft3D-FLOW resuelve un sistema de ecuaciones formado por: Ecuación de la continuidad (conservación de masa), las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, la ecuación del transporte y el problema de cierre turbulento.

Antes de pasar a escribir las ecuaciones es necesario hacer dos aclaraciones:

#### Sistema de la coordenada $\sigma$ en vertical

En la dirección vertical el FLOW emplea una malla o grid regido por la coordenada  $\sigma$ . Este grid vertical consiste en capas limitadas arriba y abajo por planos con una coordenada  $\sigma$  constante, dichos planos no son estrictamente horizontales sino que se adaptan a la topografía del fondo y de la superficie libre.

El número de capas sobre toda el área computacional en horizontal es constante, sin embargo, el espesor de cada capa no es uniforme.

Dicha coordenada  $\sigma$  se puede definir como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{H} \quad (\text{G.1})$$

con:

$z$ : Coordenada vertical en el espacio físico

$\zeta$ : La elevación de la superficie libre sobre un plano de referencia situado a  $z = 0$

$H$ : Profundidad total del agua

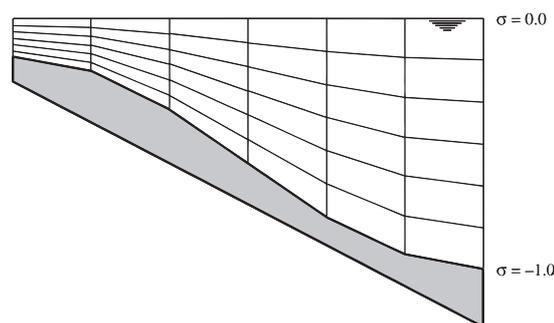


Figura G.1: Ejemplo de grid vertical con seis capas. Fuente: Manual del Delft3D-FLOW

### Generalized Lagrangian Mean (GLM)

En las simulaciones que incluyan oleaje, las ecuaciones hidrodinámicas del flow están escritas en un sistema de referencia lagrangiano (GLM). La formulación en coordenadas lagrangianas es muy similar a la Euleriana a excepción de las velocidades.

La relación entre la velocidad expresada en coordenadas lagrangianas y eulerianas viene dada por:

$$\begin{aligned} U &= u + u_s \\ V &= v + v_s \end{aligned} \tag{G.2}$$

Donde  $U$  y  $V$  son las componentes de la velocidad en coordenadas lagrangianas y  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad en coordenadas eulerianas. A los términos  $u_s$  y  $v_s$  son las "*Stokes drift components*" (componentes de deriva de Stokes).

Cuando una partícula se encuentra flotando en la superficie libre del mar junto con el oleaje, experimenta una velocidad de deriva de Stokes en la dirección de propagación de ola. Según la teoría lineal las olas producen un trayectoria elíptica y cerrada de las partículas del agua, sin embargo, esto no es real, los objetos que se encuentran cercanos a la costa al final terminan en la orilla de la playa debido a que son arrastrados por el mar. La razón es que el fenómeno no es lineal y las responsables de este movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las olas son estas componentes de Stokes de la velocidad.

Este fenómeno no lineal fue descubierto en 1847 por Geroge Gabriel Stokes

### Suposición de Presión Hidrostática

Bajo esta suposición, la ecuación de conservación de cantidad de movimiento en la dirección  $z$  se reduce a la ecuación de la presión hidrostática:

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho gh \quad (\text{G.3})$$

**G.1.1. Ecss. de conserv. de cantidad de movimiento en el plano horizontal X,Y**

$$\begin{aligned} x) \quad & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma} - fV = -\frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ y) \quad & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma} - fU = -\frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (\text{G.4})$$

Donde cada término representa:

$\frac{\partial U}{\partial t}$ : Este término representa la aceleración local, es la variación temporal de la velocidad en la dirección X

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial \sigma}$ : Es la aceleración convectiva, representa la variación de la velocidad en el espacio de un punto  $(x, y, z)$  a otro  $(x', y', z')$

$-fV$ : Representa el efecto de coriolis

$-\frac{1}{\rho_0} P_x$ : Las fuerzas de superficie se dividen en fuerzas de presión (ésta) y tensiones tangenciales. Las fuerzas de presión se aproximan mediante las expresiones de Boussinesq.

$F_x = \nu_H \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)$ : Son las tensiones tangenciales o tensiones de Reynolds<sup>1</sup>

$M_x$ : Contribución debido a fuerzas externas, por ejemplo de estructuras hidráulicas

$\frac{\partial V}{\partial t}$ : Este término representa la aceleración local, es la variación temporal de la velocidad en la dirección Y

$U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial \sigma}$ : Es la aceleración convectiva, representa la variación de la velocidad en el espacio de un punto  $(x, y, z)$  a otro  $(x', y', z')$

$-fU$ : Representa el efecto de coriolis

$-\frac{1}{\rho_0} P_y$ : Las fuerzas de superficie se dividen en fuerzas de presión (ésta) y tensiones tangenciales. Las fuerzas de presión se aproximan mediante las expresiones de Boussinesq.

---

<sup>1</sup>La relación entre las tensiones tangenciales y las derivadas segundas de la componente x de la velocidad se establece mediante las ecuaciones constitutivas del fluido newtoniano

$F_y = \nu_H \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right)$ : Son las tensiones tangenciales o tensiones de Reynolds<sup>2</sup>

$M_y$ : Contribución debido a fuerzas externas, por ejemplo de estructuras hidráulicas

### G.1.2. Ecuaciones de continuidad (Conservación de la masa)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = Q \quad (\text{G.5})$$

Donde  $Q$  representa la contribución por unidad de área debido a descargas, evaporación, precipitación, etc.

### G.1.3. Ecuación del transporte

El transporte de una sustancia puede producirse mediante dos mecanismos físicos:

- **Advección:** Transporte de sustancias debido al movimiento del medio fluido. Va asociado a la velocidad media del fluido.
- **Difusión:** Transporte de sustancia debido a las fluctuaciones (movimiento aleatorio) que se produce en el fluido

$$\frac{\partial[hc]}{\partial t} + \frac{\partial[hUc]}{\partial x} + \frac{\partial[hVc]}{\partial y} + \frac{\partial[\omega c]}{\partial \sigma} = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] + hQ \quad (\text{G.6})$$

Dónde:

$c$ : Es la concentración

$\frac{\partial[hc]}{\partial t} = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right]$ : Representa el transporte por difusión

$\frac{\partial[hUc]}{\partial x} + \frac{\partial[hVc]}{\partial y} + \frac{\partial[\omega c]}{\partial \sigma}$ : Representa el transporte por advección

$Q$ : Es el término fuente por unidad de área

---

<sup>2</sup>La relación entre las tensiones tangenciales y las derivadas segundas de la componente  $y$  de la velocidad se establece mediante las ecuaciones constitutivas del fluido newtoniano

### G.1.4. Problema del cierre turbulento

Se ha visto que el conjunto de ecuaciones que utiliza el FLOW son las ecuaciones de estado: la ecuación de continuidad deducida a partir del principio de conservación de masa bajo la aproximación de incompresibilidad y la ecuación de conservación de cantidad de movimiento bajo las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds. Además emplea también la ecuación del transporte.

En principio, dadas las condiciones iniciales y de contorno correspondientes al mencionado sistema de ecuaciones cabría pensar que es posible obtener las características del movimiento del fluido. Sin embargo, en el caso del flujo turbulento esto no es posible debido a la presencia de términos no lineales en dicho conjunto de ecuaciones (procedentes de las ecuaciones de Navier-Stokes) que posibilitan que las perturbaciones del movimiento se amplifiquen e interaccionen con otras perturbaciones. Aquí radica la dificultad del cálculo de todo movimiento turbulento. A parte de esto, la presencia de los mencionados términos no lineales provoca que el número de incógnitas sea mayor que el número de ecuaciones, de modo que el sistema no es resoluble. Esta situación se conoce como el problema de cierre turbulento.

De modo que la no linealidad del sistema de ecuaciones que gobierna un flujo turbulento impide su resolución y obliga a la búsqueda de nuevas técnicas para tratar de resolverlo siempre de forma aproximada. Los métodos más utilizados se basan en la parametrización de determinadas magnitudes físicas.

En el módulo FLOW del Delft3D se diferencia entre el coeficiente de viscosidad horizontal  $\nu_H$  y el vertical  $\nu_V$ .

#### Coefficiente de viscosidad horizontal $\nu_H$

Este valor debe ser introducido por el usuario de forma manual en el programa. Más adelante se volverá a este parámetro cuando se definan los datos de entrada introducidos al modelo.

#### Coefficiente de viscosidad vertical $\nu_V$

Para el cálculo de este valor el FLOW tiene cuatro formas de resolver el problema de cierre turbulento:

1. Coeficiente constante
2. Problema de cierre algebraico, AEM (*Algebraic Eddy viscosity closure Model*)
3. Problema de cierre turbulento  $k - L$
4. Problema de cierre turbulento  $k - \varepsilon$

En todos los modelos, el coeficiente de viscosidad tiene la misma forma:

$$\nu_V = c'_\mu L \sqrt{k} \quad (\text{G.7})$$

Dónde:

$c'_\mu$ : Constante que se determina mediante calibración empírica

$L$ : Longitud de mezcla

$k$ : Energía cinética turbulenta

El modelo que se ha empleado en las simulaciones realizadas en este informe técnico es el "Problema de cierre turbulento  $k - \varepsilon$ ."

En este modelo, los valores de la energía cinética turbulenta  $k$  y la disipación  $\varepsilon$  son producidos por términos relacionados con el esfuerzo cortante en la superficie y en el flujo. Las concentraciones de  $k$  y  $\varepsilon$  en cada celda del grid son calculadas mediante la ecuación del transporte.

Finalmente la longitud de mezcla  $L$  se determina a partir de  $\varepsilon$  y  $k$  a través de la expresión:

$$L = c_D \frac{k \sqrt{k}}{\varepsilon} \quad (\text{G.8})$$

Dónde  $c_D$  es otra constante que se debe calibrar.

# Bibliografía

- Battjes, J. and Janssen, J. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering*.
- Booij, N., Holthuijsen, L., and Ris, R. (1996). The "swan" wave model for shallow water. *Coastal Engineering*.
- Booij, N., Ris, R., and Holthuijsen, L. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. model description and validation. *Journal of geophysical research.*, 104:7649–7666.
- Cavaleri, L. and Malanotte, P. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical*.
- Collins, J. (1972). Predictions of shallow-water spectra. *Journal of Geophysical Research*.
- Deltares (2011). *Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual*. Rotterdamseweg 185, Delft.
- Eldeberky, Y. y Battjes, J. (1996). Spectral modelling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *Journal of Geophysical Research*.
- Eldeberky, Y. and Battjes, J. (1995). Parameterization of triad interactions in wave energy models. In *Process Coastal Dynamics Conference*.
- Elias, E. and Hansen, J. E. (2012). Understanding processes controlling sediment transports at the mouth of a highly energetic inlet system (san francisco bay, ca). *Marine Geology*.
- Gorman, R. and Neilson, C. (1999). Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary. *Coastal Engineering*.
- Gorrell, L., Raubenheimer, B., Elgar, S., and Guza, R. (2010). Swan predictions of waves observed in shallow water onshore of complex bathymetry. *Coastal engineering*.
- Hasselmann, K. (1962). *On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part 1. General Theory*. J. Fluid Mech.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut.
- Hasselmann, K. and T.P. Barnett, E. Bouws, H. C. D. C. K. E. J. E. H. G. D. H. P. K. A. M. P. M. D. O. K. R. W. S. H. W. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut.

- Hasselmann, S., K., H., Allender, J., and Barnett, T. (1985). Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part ii: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Physical Oceanography*.
- Hsiao, S. and Shemdin, H. (1978). Bottom dissipation in finite-depth water waves. *Coastal Engineering*.
- Janssen, P. (1991). Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*.
- Komen, G., Hasselmann, S., and Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of Physical Oceanography*.
- Lesser, G., Roelvink, J., Kester, J., and Stelling, G. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*.
- Álvarez, O., Tejedor, B., L. Tejedor, L., and Kagan, B. (2003). A note on sea-breeze-induced seasonal variability in the k1 tidal constants in cádiz bay, spain. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pages 805–812.
- Madsen, O., Poon, Y., and Graber, H. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Coastal Engineering*.
- Moghimi, S., Gayer, G., Günther, H., and Shafieefar, M. (2004). Application of third generation shallow water wave models in a tidal environment. *Ocean Dynamics*.
- Mulligan, R., Bowen, A., Hay, A., Westhuysen, A., and Battjes, J. (2008). Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay. *Journal of Geophysical Research*.
- Olabarrieta, M., Warner, J., and Kumar, N. (2011). Wave current interaction in willapa bay. *Journal of Geophysical Research*.
- Pawlowicza, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t tide. *Computers and Geosciences*, pages 929–937.
- Rusu, E., Gonçalves, M., and Soares, C. (2010). Evaluation of the wave transformation in an open bay with two spectral models. *Ocean engineering*.
- Van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., and Battjes, J. (2007). Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in swan for deep and shallow water. *Coastal Engineering*.
- Whitham, G. (1974). *Linear and nonlinear waves*. Wiley.