



ANÁLISIS DE LA REGENERACIÓN NATURAL DE PLAYAS MEDIANTE TÉCNICAS DE VÍDEO IMÁGENES: PLAYAS DE CARCHUNA (GRANADA) Y TRAFALGAR (CÁDIZ)

Proyecto Fin de Carrera

Alumno: Alejandro López Ruiz

Tutor: Prof. Dr. Ing. Miguel Ortega Sánchez

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

Septiembre 2009

ANÁLISIS DE LA REGENERACIÓN NATURAL DE PLAYAS MEDIANTE TÉCNICAS DE VÍDEO IMÁGENES: PLAYAS DE CARCHUNA (GRANADA) Y TRAFALGAR (CÁDIZ)

Proyecto Fin de Carrera

Alumno: Alejandro López Ruiz

Tutor: Prof. Dr. Ing. Miguel Ortega Sánchez

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

Septiembre 2009

Agradecimientos

A mi familia, por todo el apoyo recibido, especialmente a Paco por enseñarme que este camino es posible. A todos mis amigos, por tantas horas de trabajo y diversión compartidas en la escuela y fuera de ella, y por supuesto a mi tutor Miguel Ortega por su paciencia y por tanta motivación.

Índice general

Agradecimientos	I
Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de cuadros	XIII
Resumen	XV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Morfología de la costa andaluza	1
1.2.1. Litoral mediterráneo	2
1.2.2. Litoral atlántico	3
1.3. Uso del litoral andaluz	3
1.3.1. Datos generales	3
1.3.2. Problemática	4
1.3.3. Gestión Integral de Zonas Costeras	6
1.4. Estado del arte	7
1.5. Objetivos	9
1.5.1. Objetivo general	9
1.5.2. Objetivos específicos	9
2. Zonas de estudio	11
2.1. Playa de Carchuna	11
2.1.1. Morfología	11
2.1.2. Clima marítimo	14
2.1.2.1. Régimen medio	15
2.2. Playa de Trafalgar	20
2.2.1. Morfología	20
2.2.2. Clima marítimo	23
2.2.2.1. Régimen medio	24
2.3. Estaciones de video monitorización costera: faros de Sacratif y Trafalgar	28
3. Metodología de trabajo	33
3.1. Hidrodinámica	33
3.1.1. Definición de umbrales	33
3.1.2. Selección de tormentas	34
3.1.3. Selección de estados de mar	35
3.2. Propagación de estados de mar	35
3.2.1. Propagación: modelos numéricos	36
3.3. Evolución de la morfología	36
3.3.1. Criterios de selección de video imágenes	36

3.3.2.	Obtención de parámetros adimensionales	38
3.3.2.1.	Velocidad de caída adimensional	39
3.3.2.2.	Peralte de la ola	39
3.3.2.3.	Número de Iribarren	39
3.3.2.4.	Coefficiente de propagación	40
4.	Modelos de propagación de oleaje en las zonas de estudio	47
4.1.	Modelos de propagación	47
4.1.1.	Modelo SWAN	47
4.1.2.	Modelo Ref-dif	48
4.2.	Playa de Carchuna: calibración de modelos	48
4.2.1.	Modelo SWAN	49
4.2.2.	Modelo Ref-dif	49
4.2.3.	Campaña de campo	51
4.2.4.	Comparación de resultados	52
4.2.5.	Conclusiones parciales	53
4.3.	Playa de Trafalgar	53
4.3.1.	Modelo SWAN	54
4.3.2.	Modelo Ref-dif	54
5.	Resultados y análisis	57
5.1.	Playa semireflejante: Carchuna	57
5.1.1.	Tormentas seleccionadas	57
5.1.2.	Propagación de estados de mar	57
5.1.2.1.	Estados de mar seleccionados	57
5.1.2.2.	Resultados de la propagación	58
5.1.3.	Evolución morfodinámica	60
5.1.3.1.	Imágenes seleccionadas	60
5.1.3.2.	Estudios previos	61
5.1.3.3.	Tormentas procedentes del oeste	61
5.1.3.4.	Tormentas procedentes del este	68
5.1.4.	Parámetros adimensionales	75
5.1.4.1.	Coefficiente de propagación	75
5.1.4.2.	Número de Iribarren	77
5.1.4.3.	Velocidad de caída adimensional	78
5.1.4.4.	Peralte de la ola	81
5.1.5.	Conclusiones parciales	82
5.2.	Playa disipativa: Trafalgar	83
5.2.1.	Tormentas seleccionadas	83
5.2.2.	Propagación de estados de mar	83
5.2.2.1.	Estados de mar seleccionados	83
5.2.2.2.	Resultados de la propagación	84
5.2.3.	Evolución morfodinámica	86
5.2.3.1.	Imágenes seleccionadas	86
5.2.3.2.	Evolución de la morfología	87
5.2.3.3.	Evolución transversal de la línea de costa	90
5.2.3.4.	Punto singular: Faro de Trafalgar	98
5.2.3.5.	Regeneración de la playa	100
5.2.4.	Parámetros adimensionales	101
5.2.4.1.	Coefficiente de propagación	101
5.2.4.2.	Número de Iribarren	104
5.2.4.3.	Velocidad de caída adimensional	106
5.2.4.4.	Peralte de la ola	107
5.2.5.	Conclusiones parciales	107

6. Conclusiones. Recomendaciones	109
6.1. Conclusiones	109
6.2. Recomendaciones para futuras actuaciones	111
6.3. Futuras líneas de investigación	112
A. Estaciones de video monitorización.	115
A.1. Técnica de video monitorización	115
A.1.1. Estación de video monitorización	115
A.1.2. Base teórica de la Técnica	115
A.1.3. Tipos de datos	115
A.1.4. Análisis de imágenes	117
A.1.5. Información que se puede obtener a partir de los datos	118
A.1.6. Características de la Instrumentación	118
A.1.7. Otras aplicaciones de la técnica	118
A.2. Emplazamiento	119
A.2.1. Playa de Carchuna	119
A.2.2. Playa de Trafalgar	119
A.3. Instrumentación	120
A.4. Proceso de instalación	121
A.5. Imágenes de prueba	121
A.6. Reajuste de lentes	121
A.7. Instalación definitiva	122
A.8. Campaña topográfica	122
B. Modelos de propagación. Introducción teórica	125
B.1. Modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore)	125
B.1.1. Introducción	125
B.1.2. Ecuaciones de gobierno	126
B.1.3. Modelado de obstáculos	127
B.2. Modelo Ref-Dif (REFraction - DIFraction)	128
B.2.1. Introducción	128
B.2.2. Ecuaciones de gobierno	128
B.2.2.1. Ecuación de pendiente suave	128
B.2.2.2. Débil no linealidad	129
B.2.2.3. Modelización de la disipación de energía	130
B.2.2.4. Modelización de oleaje monocromático	131
B.2.2.5. Método de resolución	131
C. Tormentas seleccionadas en Trafalgar	133
Bibliografía	135

Índice de figuras

1.1.	Imagen del litoral andaluz [Fuente: Google Earth].	2
1.2.	Imagen de la playa de Carchuna (Granada). Ejemplo de playa mediterránea [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].	2
1.3.	Imagen de la playa de Trafalgar (Cádiz). Ejemplo de playa atlántica [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].	3
1.4.	Imagen representativa de la presión urbanística a la que se ve sometido el sistema litoral. Roquetas de Mar (Almería) [Fuente: elpais.com].	4
1.5.	Imagen del delta del río Guadalfeo, encauzado en su tramo final.	4
1.6.	Acantilado en proceso de ocupación en San José (Almería).	5
1.7.	Imagen en la que se pueden observar los efectos de un temporal de poniente en Motril (Granada)[Fuente: Diario Ideal de Granada].	5
1.8.	Imagen en la que se pueden observar los efectos de un temporal de poniente en Carchuna (Granada)[Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].	6
1.9.	Hotel en la playa del Algarrobico en Carboneras (Almería), situado dentro de la zona de servidumbre protegida por la Ley de Costas y cuya construcción se ha paralizado	7
2.1.	Situación de la zona de estudio en la playa de Carchuna (Granada): en la parte superior batimetría de la zona de estudio (H2-H3), esquema general de situación (parte inferior izquierda) y fotografía aérea de la zona H2-H3 (parte inferior derecha)	12
2.2.	Vista aérea del conjunto de formas rítmicas presentes en la zona de estudio, con detalle de la zona H2-H3	12
2.3.	Distribución del tamaño de grano en la playa de Carchuna: a) Imagen del sedimento fino superficial y b) sedimento grueso subyacente [Fuente: Ortega-Sánchez <i>et al.</i> , 2003]	13
2.4.	Vista en 3D de la batimetría de la zona, destacando la presencia del Cañón de Jolucar	14
2.5.	Imágen batimétrica de la situación de la boya WANA 2020013	15
2.6.	Dispersión del régimen medio de altura de ola y dirección de incidencia en la playa de Carchuna	16
2.7.	Dispersión del régimen medio de dirección de incidencia y periodo de pico en la playa de Carchuna	16
2.8.	Dispersión del régimen de altura de ola y periodo de pico en la playa de Carchuna	17
2.9.	Histograma de dirección de incidencia para la playa de Carchuna según la altura de ola	17
2.10.	Histograma de periodo de pico para la playa de Carchuna según la altura de ola	18
2.11.	Representación de la rosa de oleaje de régimen medio para la playa Carchuna según altura de ola y dirección de incidencia	18
2.12.	Batimetría de la playa de Trafalgar (arriba) con detalle de imagen del satélite (abajo).	20
2.13.	Imagen aérea de la zona de estudio.	20
2.14.	Imagen de las rip currents o corrientes de retorno en la playa de Trafalgar, donde se aprecia la presencia de estas de una forma regular a lo largo de la playa. En azul oscuro aparecen las corrientes superficiales, en azul claro la corriente de retorno sumergida [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	21
2.15.	Representación en 3D de la batimetría de la zona	22
2.16.	Imagen batimétrica de la distribución de las distintas zonas de la playa de Trafalgar, coincidentes con las tres cámaras disponibles	23
2.17.	Representación batimétrica de la situación de la boya WANA 1050545	24
2.18.	Dispersión de altura de ola y dirección de incidencia para el régimen medio de la boya WANA 1050545	25

2.19. Dispersión de dirección de incidencia y periodo de pico para el régimen medio de la boya WANA 1050545	25
2.20. Dispersión de altura de ola y periodo de pico para el régimen medio de la boya WANA 1050545	26
2.21. Histograma de dirección de incidencia para la playa de Trafalgar según la altura de ola	27
2.22. Histograma de periodo de pico para la playa de Trafalgar según la altura de ola	27
2.23. Representación gráfica de la rosa de oleaje obtenida para Trafalgar según altura de ola y dirección de incidencia	28
2.24. Representación batimétrica de la situación de la estación de video monitorización ARGUS en la playa de Carchuna con detalle de la zona de estudio	29
2.25. Representación batimétrica de la situación de la estación de video monitorización ARGUS en la playa de Trafalgar	29
2.26. Imagen instantánea de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	30
2.27. Imagen promediada de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	30
2.28. Imagen de varianza de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	31
2.29. Imagen media diaria de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	31
3.1. Umbrales de condiciones energéticas de oleaje para una tormenta ejemplo	34
3.2. Imagen de la playa de Trafalgar en marea baja (izquierda) y alta (derecha) en la misma jornada para la cámara C1. Pueden apreciarse las diferencias entre la línea de costa. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	37
3.3. Composición de imágenes de las tres cámaras disponibles en Trafalgar para su posterior restitución. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	38
3.4. Imagen rectificada de la playa de Trafalgar, en la que se aprecia su forma en planta y sus dimensiones reales. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	38
3.5. Representación batimétrica de los puntos de control para la playa de Carchuna	41
3.6. Representación batimétrica de los puntos de control para la playa de Trafalgar	42
3.7. Ejemplo de perfiles realizados en la playa de Trafalgar para la obtención de la pendiente requerida sobre la batimetría de la zona	43
3.8. Representación en ejes cordenados (distancia a la costa en horizontal y profundidad en vertical) de los perfiles realizados en Trafalgar (figura 3.7)	44
3.9. Esquema de la metodología descrita con la que se pretende alcanzar un modelo de predicción de la respuesta de las zonas de estudio	45
4.1. Representación de las mallas definidas para el modelo SWAN en la playa de Carchuna, donde se especifica la zona de estudio	49
4.2. Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Carchuna para el oleaje que incide con dirección este	50
4.3. Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Carchuna para el oleaje que incide con dirección oeste	50
4.4. Esquema de la situación de los diferentes instrumentos usados en la campaña de campo en carchuna. En la parte inferior derecha puede observarse una fotografía de la estación barométrica (E1)[Fuente: Ortega-Sánchez <i>et al.</i> , 2003]	52
4.5. Representación del ajuste entre las distintas series obtenidas	53
4.6. Representación de las mallas definidas para el modelo SWAN en la playa de Trafalgar.	54
4.7. Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Trafalgar para el oleaje que inciden con una dirección de aproximadamente 270 grados	55
4.8. Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Trafalgar para el oleaje que inciden con una dirección de aproximadamente 225 grados	55

5.1. Ejemplo de salida de Matlab para C03-t2-s propagado con el modelo SWAN en el que se representan la altura de ola y la dirección de incidencia. A la derecha escala de altura de ola. La dirección de incidencia aparece representada mediante vectores.	59
5.2. Ejemplo de representación gráfica para C03-t2-s propagado con el modelo Ref-Dif en el que se representan la altura de ola (módulo de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores).	60
5.3. Representación para C03-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	62
5.4. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t1. La línea negra representa la posición inicial de la línea de costa. Dentro del rectángulo resaltado se muestra la barra observada	63
5.5. Representación para C03-t3 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	64
5.6. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t3. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.	65
5.7. Representación para C04-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	66
5.8. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C04-t1. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.	67
5.9. Perfiles definidos para la playa de Carchuna en trabajos anteriores[Fuente: Ortega-Sánchez <i>et al.</i> , 2008]	68
5.10. Representación para C03-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	69
5.11. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t2. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.	70
5.12. Representación para T07-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	71
5.13. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C07-t1. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.	72
5.14. Representación para C07-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	73
5.15. Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C07-t2. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.	74
5.16. Relación de altura de ola para los estados de mar propagados en los distintos puntos de control, con la situación de ese puntos en la parte superior	75
5.17. Representación de la relación de altura de ola para el estado C04-t1-mw en los distintos puntos de control.	76
5.18. Representación gráfica para C04-t1-mw propagado con el modelo Ref-Dif en el que se representan la altura de ola y la dirección de incidencia	77
5.19. Número de Iribarren para los estados de mar propagados en Carchuna en los distintos puntos de control, con la situación de ese puntos en la parte superior	78
5.20. Velocidad de caída adimensional para $D_{50} = 2mm$ en Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior	79

5.21. Velocidad de caída adimensional para $D_{50} = 0,35mm$ en Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior	80
5.22. Peralte de la ola para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior	81
5.23. Representación gráfica sobre imagen batimétrica del resultado de la propagación mediante el modelo Ref-Dif para el estado de mar T03-t1-S1, para el que se representan la altura de ola (módulo de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores).	85
5.24. Representación gráfica del resultado de la propagación mediante el modelo SWAN para el estado de mar T03-t1-S1. A la derecha escala de altura de ola. La dirección de incidencia aparece representada mediante vectores.	85
5.25. Representación para T03-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	88
5.26. Selección de imágenes más representativas de la tormenta T03-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.	89
5.27. Representación para T06-t3 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	91
5.28. Selección de imágenes más representativas de la tormenta T06-t3. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.	92
5.29. Representación para T05-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.	94
5.30. Selección de imágenes más representativas de la tormenta T05-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.	95
5.31. Esquema de las distintas componentes que conforman el ascenso de la lámina de agua por el talud total [Fuente: Komar, 1998]	95
5.32. Cuadro con el resultado del cálculo del incremento de la superficie libre para cada estado de mar seleccionado. En gris el estado de mar con mayor $\delta\eta$	96
5.33. Perfil de altura de ola a lo largo de una línea paralela al eje X en un punto perpendicular a la costa. Queda realzada la altura de ola en rotura	97
5.34. Representación SIG de la zona que quedaría inundada tras el paso de T05-t1-S (en rojo) frente a otros estados de mar de esa tormenta (amarillo y verde)	98
5.35. Representación para T06-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo negro los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas. En discontinuo rojo aparece indicado el día 28 de octubre	99
5.36. Selección de imágenes más representativas de la tormenta T05-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación. Dentro de los rectángulos rojos aparece la zona singular antes y después del proceso de regeneración acelerado	100
5.37. Coeficiente de propagación para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior	102
5.38. Representación del coeficiente de propagación para el estado de mar T03-t1-S	103
5.39. Ilustración gráfica de los resultados de la propagación del modelo Ref-Dif para el estado de mar T03-t1-S en la playa de Trafalgar, donde se representan la altura de ola (longitud de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores)	104
5.40. Números de Iribarren para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior	105

5.41. Velocidad de caída adimensional para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior	106
5.42. Peralte de la ola para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior	107
A.1. Imagen instantánea de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	116
A.2. Imagen promediada de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	116
A.3. Imagen de varianza de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	117
A.4. Imagen media diaria de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	117
A.5. Representación de la situación del Faro de Sacratif [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	119
A.6. Imagen aérea de la situación del Faro de Trafalgar	120
A.7. Puntos elegidos para el ajuste de una de las cámaras en la playa de Carchuna [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	122
A.8. Puntos elegidos para el ajuste de una de las cámaras en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]	123

Índice de cuadros

3.1. Coordenadas UTM de los puntos de control en Carchuna	41
3.2. Coordenadas UTM de los puntos de control en la playa de Trafalgar	42
4.1. Características geométricas de las mallas SWAN definidas para Carchuna. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x.	49
4.2. Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Carchuna para oleaje incidente del este. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x	50
4.3. Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Carchuna para oleaje incidente del oeste. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x	51
4.4. Características geométricas de las mallas SWAN definidas para Trafalgar. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x	54
4.5. Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Trafalgar para oleajes que inciden con una dirección de aproximadamente 270 grados. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x	55
4.6. Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Trafalgar para oleajes que inciden con una dirección de aproximadamente 225 grados. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x	56
5.1. Tormentas seleccionadas para el estudio en la playa de Carchuna	57
5.2. Estados de mar seleccionados para el estudio en la playa de Carchuna. Por columnas: estado de mar, altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de procedencia, velocidad del viento, dirección del viento.	58
5.3. Tormentas encontradas durante el periodo de estudio para la playa de Trafalgar. Se describe su fecha de inicio, de pico y final, y la altura de ola significativa máxima.	83
5.4. Estados de mar seleccionados para el estudio en la playa de Trafalgar. Por columnas: estado de mar, altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de procedencia, velocidad del viento, dirección del viento.	84

Resumen

Las regiones litorales, donde interactúan los medio terrestre, marino y humano, son las más pobladas del planeta. Ello hace necesaria una correcta Gestión Integral de Zonas Costeras que asegure un desarrollo sostenible y que garantice la correcta administración de sus recursos. Es por tanto imprescindible un conocimiento preciso del comportamiento de la costa, bajo los diferentes agentes que la pueden forzar (p.ej. oleaje), que permita así predecir su respuesta ante futuros eventos. De entre esos eventos, los más importantes son las tormentas asociadas al paso de borrascas, ya que debido a su alto contenido energético son las que provocan los mayores cambios en la costa a corto y medio plazo.

Por ello, el objetivo fundamental de este proyecto fin de carrera ha sido analizar y comparar (1) el efecto que eventos de contenido energético moderado y extremo tienen sobre playas de sedimentos fino y mixto y (2) la regeneración natural (en su caso) tras el paso del evento. Se han seleccionado dos playas para llevar a cabo el estudio: Trafalgar (Cádiz) y Carchuna (Granada), que son representativas de los dos tipos principales de playa existentes en la costa andaluza: la atlántica y la mediterránea.

Las playas atlánticas, de carácter disipativo, están caracterizadas por suaves pendientes, sedimento homogéneo y de tamaño medio-fino, un clima marítimo con oleaje de gran contenido energético y periodos largos (asociados a oleajes plenamente desarrollados) generado en el atlántico y rangos de marea astronómica mesomareales. Por el contrario, las mediterráneas, con carácter semireflejante, presentan mayores pendientes, sedimento heterogéneo de tamaño fino a grueso, un oleaje con menores alturas de ola y periodos bajos y una carrera media de marea astronómica con frecuencia despreciable.

La playa de Trafalgar tiene una longitud de unos 2 km y está caracterizada por una alineación noroeste-sureste, un tamaño medio de sedimento de 0.5mm y una carrera media de marea de 2m. La zona representativa de litoral mediterráneo ha sido la playa de Carchuna (Granada), con una alineación este-oeste, tamaño de grano medio entre 0.1 y 50 mm y carrera media de marea de unos 50 cm.

La metodología para llevar a cabo el estudio se ha basado en tres aspectos esenciales: (1) datos de oleaje en profundidades indefinidas (red de medida de Puertos del Estado, Ministerio de Fomento), (2) video-imágenes procedentes de las estaciones de video monitorización costera que el Grupo de Dinámica de Fluidos Ambientales (Universidad de Granada) tiene instaladas en las dos zonas de estudio y (3) modelos numéricos de propagación de oleaje. La secuencia metodológica se resume en:

- Análisis del clima marítimo de las zonas de estudio a partir de datos de oleaje en profundidades indefinidas.
- Selección de tormentas y los estados de mar característicos de cada una de ellas. Posteriormente, se han propagado dichos estados de mar mediante los modelos numéricos SWAN y Ref-Dif. Además, para la playa de Carchuna se han calibrado dichos modelos con datos de campo procedentes de una campaña de campo específica realizada en marzo de 2008. Finalmente, con los datos obtenidos, se han calculado los parámetros adimensionales para el estudio de la morfodinámica.
- A partir de las imágenes seleccionadas para cada tormenta, se ha analizado la morfodinámica de las zonas de estudio, prestando especial atención a las variaciones de anchura de playa, cata máxima de inundación, posición de la línea de costa y a la posible regeneración de las playas. Estos resultados se han comparado con los parámetros adimensionales para obtener así un modelo de comportamiento.

Los resultados obtenidos han permitido extraer una serie de conclusiones sobre del comportamiento morfodinámico de las dos playas. En la playa de Carchuna, el hecho más significativo es la influencia de la dirección de incidencia del oleaje (este y oeste) en los cambios en la forma en planta de la línea de costa. Los temporales

procedentes del oeste producen una erosión generalizada que se recupera paulatinamente hasta una regeneración casi total. Los eventos moderados pueden acelerar este proceso de recuperación. Sin embargo, tras el oleaje extremo de las tormentas procedentes del este se ha observado una repentina ganancia en la anchura de playa al día siguiente, de hasta decenas de metros en la parte oeste de la zona de estudio. Esto es producido por la deposición de todo el material movilizado en el momento del pico de tormenta por parte del oleaje posterior al pico que posee menor contenido energético. En este caso, la playa no llega a recuperar el estado inicial una semana después del evento extremo.

En el caso de Trafalgar, los cambios morfológicos están relacionados con los valores de la altura de ola y periodo de pico en su evolución, ya que el clima marítimo está caracterizado por un oleaje procedente de forma predominante del sector W. La forma en planta no ofrece grandes variaciones, que sí se observan en el perfil. Durante la tormenta se generan unas formas rítmicas base, presentes la gran mayoría del tiempo: las grandes formas cuspidales. Se ha comprobado que esta morfología sólo pasa a un perfil de playa plana cuando el oleaje incidente supera los 4 metros de altura de ola significativa. Otro aspecto muy importante, que no se produce de forma frecuente en la playa, es el aumento de la cota máxima de inundación con oleajes de largo periodo, combinación poco frecuente en el clima marítimo de la zona. Bajo estas condiciones, se puede llegar a producir la inundación de un gran área que puede afectar a varias infraestructuras presentes en la zona. Se ha calculado que en esas condiciones de oleaje, la cota de inundación supera los 4 metros sobre el nivel medio del mar.

Para evaluar la necesidad de actuaciones como la regeneración artificial de las playas, habría que realizar un estudio más profundo y a largo plazo de las zonas de estudio. Sin embargo, todo parece indicar que las dos playas son sistemas cerrados en equilibrio dinámico que no necesitarían de esas actuaciones. Otras futuras líneas de investigación, como la realización de campañas de campo para estudiar el perfil de playa y la validez de los modelos de propagación de oleaje, así como un análisis preciso del efecto y causas de la subida de la cota máxima de inundación en Trafalgar, serían muy apropiadas para un conocimiento más exacto del comportamiento de estas playas, y por tanto de los tipos de playas típicos del litoral andaluz.

Los resultados obtenidos indican que en zonas con fuerte presión urbanística, pero donde la línea de costa sea relativamente estable a medio plazo, la protección de la costa frente a eventos puntuales (tormentas) se debe realizar mediante una reubicación de los recursos (p.ej. traslado de construcciones próximas a la línea de costa), ya que la ejecución de estructuras costeras puede alterar el equilibrio del sistema y su capacidad de regeneración natural (p.ej. Carchuna). En zonas aún vírgenes (p.ej. Trafalgar) los resultados han puesto de manifiesto la necesidad de realizar simulaciones a medio y largo plazo sobre la evolución de la línea de costa y la cota de inundación, que permitan definir en términos probabilistas el deslinde del dominio marítimo terrestre y, por tanto, diseñar correctamente futuras ordenaciones de los recursos compatibles con el desarrollo sostenible.

1.1. Antecedentes

Este Proyecto Fin de Carrera se encuadra en los siguientes proyectos de investigación del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada:

- *Procesos hidrodinámicos en la franja costera y el margen continental durante el paso de una borrasca (BORRASCAS)*. Referencia: CTM 2005-06853/MAR. Financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

- *Modelado de los procesos y evolución del litoral de Andalucía. Marco global: estudio de los flujos hidrodinámicos y biogeoquímicos en los mares, litoral y estuarios de Andalucía*. Referencia: Proyecto de excelencia RNM 968. Financiado por la Junta de Andalucía.

- *Campañas de campo en el litoral andaluz y modelado de procesos morfodinámicos*. Referencia: Proyecto de excelencia, P06-RNM-01573. Financiado por la Junta de Andalucía.

Estos proyectos tienen como finalidad principal mejorar el conocimiento de los procesos costeros y su aplicación directa al litoral andaluz. En particular, dos de las zonas de estudio seleccionadas por sus condiciones son las playas de Carchuna (Granada) y Trafalgar (Cádiz).

1.2. Morfología de la costa andaluza

La costa de Andalucía se extiende desde la desembocadura del río Guadiana, formando frontera con Portugal, hasta la desembocadura del río Almanzora, cerca del límite con la Comunidad Autónoma de Murcia con un total de más de mil kilómetros de costa bordeando el encuentro entre el mar Mediterráneo y el océano Atlántico. Este encuentro se ubica en la provincia de Cádiz donde se encuentra en estrecho de Gibraltar que divide el litoral andaluz en dos, el litoral atlántico y el mediterráneo. El primero de ellos está caracterizado por la presencia de infinidad de playas y costas bajas, mientras que en el mediterráneo abundan los acantilados y las playas con grandes pendientes. Por esta y otras características, el comportamiento de ambos litorales es muy distinto, exigiendo un estudio por separado de cada uno de ellos.



Figura 1.1: Imagen del litoral andaluz [Fuente: Google Earth].

1.2.1. Litoral mediterráneo

Al este del estrecho de Gibraltar las Cordileras Béticas forman un relieve montañoso que deslinda la tierra del mar y define el litoral andaluz de Alborán. El clima mediterráneo templado, caracterizado por inviernos suaves con precipitaciones irregulares y veranos secos con precipitaciones torrenciales, da lugar a tramos de costa con cuencas de relleno, lagunas y deltas con tamaño de sedimento heterogéneo desde fino hasta muy grueso, pendientes acusadas y formas más irregulares.



Figura 1.2: Imagen de la playa de Carchuna (Granada). Ejemplo de playa mediterránea [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].

El oleaje incidente en este tramo del litoral andaluz se genera por borrascas del seudo frente del Mediterráneo (oleaje de levante), o por borrascas sudatlánticas (oleaje de poniente) acompañadas de trenes de olas largas procedentes del Atlántico y propagados por el estrecho de Gibraltar. El contenido energético del oleaje es inferior al del litoral atlántico, con periodos de onda entre 7 y 12 segundos y alturas máximas de ola de unos 9 metros.

La carrera media de marea astronómica también es inferior en esta zona, siendo de aproximadamente 50 cm (Losada *et al.*, 2009).

1.2.2. Litoral atlántico

Al oeste del estrecho, el litoral atlántico andaluz se desarrolla en el frente de la depresión del Guadalquivir, área deprimida tras la orogenia alpina y rellenada por sedimentos en las épocas geológicas más recientes. El sustrato geológico y el clima húmedo han dado lugar a una costa caracterizada por la presencia de valles de suaves pendientes y tamaño de sedimento homogéneo fino-medio.

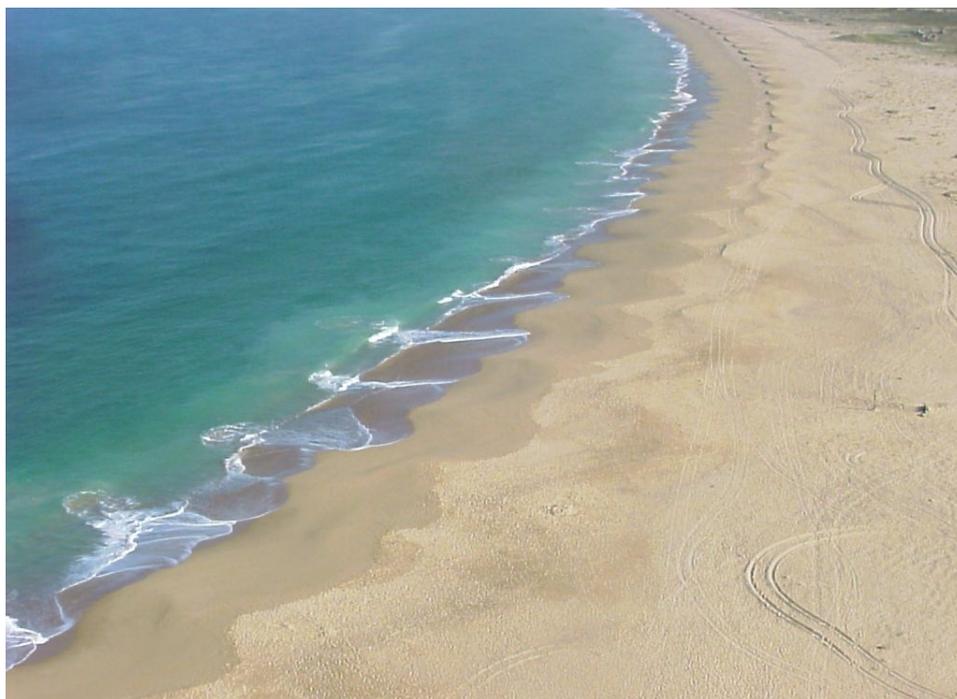


Figura 1.3: Imagen de la playa de Trafalgar (Cádiz). Ejemplo de playa atlántica [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].

Sobre este tramo de costa actúan oleajes generados por vientos regionales relacionados con la dinámica del estrecho y aquéllos generados en el Atlántico, de gran contenido energético y con un fetch de mucha mayor extensión. Estos últimos poseen periodos de onda de entre 8 y 16 segundos y alturas máximas de ola que pueden superar los 12 metros, siendo el clima marítimo más severo que en el litoral mediterráneo. En cuanto a la carrera media de marea astronómica, en esta zona llega a los 3 metros, dado el gran tamaño de la masa de agua que conforma el océano Atlántico (Losada *et al.*, 2009).

1.3. Uso del litoral andaluz

Desde la última glaciación ocurrida hace 9000 años, el litoral andaluz ha acogido diferentes civilizaciones humanas, pero fue hace 3000 años cuando a partir de la colonización llevada a cabo por pueblos que provenían del Mediterráneo oriental, estas costas se convirtieron en un centro socio-cultural de pueblos, ciudades, salinas y puertos. Pero en los últimos tiempos el desarrollo de una agricultura intensiva de invernaderos y los procesos urbanísticos creados alrededor del sector turismo, han provocado la mayor y más rápida transformación del litoral andaluz de toda su historia. Se han ocupado los deltas, llenado de bancales las laderas y construido sobre las playas y dunas.

1.3.1. Datos generales

Ya sea en el litoral atlántico o en el mediterráneo, en Andalucía se ha llevado a cabo en las últimas décadas un incremento en la presión urbanística, turística y agrícola en la costa. Se está haciendo un uso intensivo de

los recursos costeros explotando al máximo el posible beneficio económico derivado del turismo y la agricultura intensiva. En los últimos cincuenta años se ha acelerado la ocupación del litoral andaluz, de tal forma que en el año 2005 más del 60 % de la población andaluza, de ocho millones de habitantes, residían en el entorno de los 1000 kilómetros de litoral andaluz, con una expansión notable de las ciudades y pueblos costeros. De hecho, según el Instituto Geográfico Nacional dependiente del Ministerio de Fomento, y tras el estudio de imágenes aéreas, la superficie urbanizada en el litoral ha aumentado un 22 % en los últimos seis años, lo que supone 140,000 m² de nueva ocupación diarios.



Figura 1.4: Imagen representativa de la presión urbanística a la que se ve sometido el sistema litoral. Roquetas de Mar (Almería) [Fuente: elpais.com].

1.3.2. Problemática

La consecuencia de esta ocupación masiva es que en el litoral andaluz existen numerosos tramos de costa que presentan distintos problemas de sostenimiento ambiental, como:

1. Estuarios colapsados por la presión urbanística y agrícola (p. ej. Piedras, Guadalquivir)
2. Deltas en regresión (p. ej. río Guadalfeo)



Figura 1.5: Imagen del delta del río Guadalfeo, encauzado en su tramo final.

3. Playas sin zona seca (p. ej. Torremolinos)
4. Acantilados blandos en continuo proceso de ocupación como el de San José en la provincia de Almería



Figura 1.6: Acantilado en proceso de ocupación en San José (Almería).

5. Acantilados duros convertidos en núcleos de edificaciones (p. ej. Almuñecar)
6. Lagunas litorales rellenadas y edificadas (p. ej. Zahara de los Atunes)

Además se ha generalizado la construcción de edificaciones y paseos marítimos en lugares muy próximos a la costa, invadiendo incluso parte de la playa. Así, en la costa granadina ha ocurrido recientemente un ejemplo de cómo la ocupación masiva e incontrolada de las playas ha provocado un deterioro importante en algunas de esas construcciones, con la consecuente repercusión económica y social. En las playas de Motril (figura 1.7), Carchuna y Calahonda (figura 1.8) se produjeron grandes destrozos en paseos marítimos y edificaciones construidas en la playa debido a un fuerte temporal de poniente en el invierno de 2008.



Figura 1.7: Imagen en la que se pueden observar los efectos de un temporal de poniente en Motril (Granada)[Fuente: Diario Ideal de Granada].

Las autoridades locales se apresuraron a pedir la construcción de espigones que facilitarían la regeneración de playas y su protección frente a temporales. Pero esta problemática debe estudiarse desde un punto de vista más profundo y a largo plazo, planteando realmente una cuestión vital como es saber hasta dónde llega la influencia

del oleaje en nuestras costas. Una vez conocido esto se podrá definir exactamente hasta dónde pueden llevarse a cabo actuaciones y si las ya existentes están ubicadas en puntos peligrosos.



Figura 1.8: Imagen en la que se pueden observar los efectos de un temporal de poniente en Carchuna (Granada)[Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)].

Por la gran riqueza medioambiental de la costa andaluza, las diferentes administraciones han ido promoviendo distintas figuras de protección como Parques Nacionales (Doñana, Cabo de Gata), Parques Naturales, Parajes Naturales, etc. De esta forma una gran parte del patrimonio natural de la costa andaluza está protegido tras la creación de la Red de Espacios Naturales de Andalucía (RENA). Pero esta protección ha llegado en muchos casos demasiado tarde y en otros ha aislado a zonas con singularidades ecológicas que fuera de un amplio sistema medioambiental no son sostenibles.

Otro gran problema al que se ven sometidas nuestras costas es la falta de unidad entre las distintas administraciones. Existen numerosos conflictos entre las tres administraciones principales, el Estado, la Junta de Andalucía y las distintas entidades locales. Estos conflictos acaban en muchas ocasiones en los tribunales estando paralizados durante años con el consecuente deterioro de una costa que la mayoría de las veces necesita actuaciones inmediatas. Ejemplo de esta situación es el Hotel Azata del Sol (figura 1.9), en la playa del Algarrobico en Carboneras (Almería), que tras la construcción ilegal del mismo por realizarse esta en la zona de servidumbre definida por la Ley de Costas, se encuentra paralizada su demolición durante ya varios años.

Por otra parte, esta problemática aumentará en los próximos años debido al incremento que se estima en la presión urbanística y al aumento del nivel del mar debido a la variabilidad climática. Esta última circunstancia incide negativamente en la disponibilidad de los tres elementos esenciales para alcanzar los desarrollos socioeconómicos y ambientales en las inmediaciones de la costa: suelo, agua y energía.

1.3.3. Gestión Integral de Zonas Costeras

Esta situación hace necesaria la implantación de un sistema de Gestión Integral de Zonas Costeras sostenible, cuantitativa y no especulativa, para analizar a largo plazo el riesgo de las distintas estrategias de gestión y uso del litoral evaluando la simultaneidad y compatibilidad de los desarrollos socioeconómicos y ambiental. Esta Gestión Integral de Zonas Costeras debe integrar a todos los sectores y administraciones implicadas. Una de las funciones primordiales de esta gestión es definir la línea de costa, elemento básico dentro de la Ley de Costas y en el que se basan todas las delimitaciones del suelo.

Para llevar a cabo esta gestión integral sostenible, es imprescindible el conocimiento preciso y científico de los procesos morfodinámicos costeros que intervienen en la evolución de las playas y su línea de costa. De esta forma, el estudio de eventos de gran contenido energético como son las tormentas y su posterior regeneración, parece de vital importancia a la hora de evaluar y predecir el comportamiento de nuestras costas.



Figura 1.9: Hotel en la playa del Algarrobico en Carboneras (Almería), situado dentro de la zona de servidumbre protegida por la Ley de Costas y cuya construcción se ha paralizado

A pesar de lo expuesto, *no existe un buen conocimiento del comportamiento de la costa frente a eventos de contenido energético moderado a muy alto, ya que los estudios realizados son escasos y parciales*. Tampoco se conoce bien las diferencias en ese comportamiento entre los dos tipos de playas reseñados anteriormente, debido sobre todo a que apenas existen trabajos de investigación dedicados al conocimiento de la evolución de playas de sedimento medio, típicas en el litoral andaluz.

De esta problemática surge la motivación para la realización de este estudio, en el que se pretende dar algo de luz en este campo estudiando una playa típicamente atlántica, como es la de Trafalgar en la provincia de Cádiz, y otra playa característica mediterránea, como es la de Carchuna en el litoral granadino. Para ello se han fijado los objetivos que se presentan en apartados posteriores.

1.4. Estado del arte

Muchos autores han realizado estudios sobre la identificación, clasificación y evolución temporal de la morfología costera. Wright y Short (1984) establecieron la clasificación más aceptada de tramos de playa, distinguiendo entre disipativas, intermedias y reflectivas. Para ello usaron como criterio el parámetro ω que representa la relación entre la velocidad de caída de una partícula de agua y la velocidad de caída del sedimento. Masselink y Short (1993) incluyeron los efectos del periodo y la altura de ola en la rotura, las características de los sedimentos y la carrera media de marea. A parte de estudios como el de Ranashinge *et al.* (2004), en el que se describía un modelo conceptual para predecir variaciones en la morfología general de la playa relacionadas con las condiciones ambientales de la zona (altura, peralte y energía de la ola), el interés por la morfología litoral intermareal ha sido escaso.

Es muy común encontrar formas rítmicas en la topografía de las playas. En el caso de las formas cuspidales, como las que se pueden observar en la playa de Trafalgar, numerosos autores se han dedicado al estudio de estas formas. En la actualidad, dos teorías parecen dar una explicación adecuada a la formación de las formas cuspidales con una separación regular en playas naturales:

- Según sugirieron Guza y Inman (1975), el movimiento producido por las olas incidentes se impone al movimiento producido por las ondas de borde para producir una variación sistemática a lo largo de la línea de costa de la altura del swash que redunda en una perturbación erosiva regular.
- La otra teoría propuesta por Werner y Fink (1993), sugiere que las formas cuspidales aparecen por una combinación de dos factores:

- Una retroalimentación positiva entre la morfología de la playa y las corrientes en la línea de costa que pueden aumentar la escala de las formas irregulares de la topografía ya existentes.
- Una retroalimentación negativa que provoca que una vez que las formas cuspidales están desarrolladas se inhiban los procesos de erosión y acreción en la playa, confiriéndole cierta estabilidad a las formas creadas.

Otros autores también han sugerido que el espaciamiento entre las formas cuspidales depende de hasta qué altura llegan las olas tras su rotura (Dean y Maurmeyer, 1980). En general, se ha aceptado que las características geométricas de estas formas rítmicas dependen del oleaje que se propaga hasta la zona, así como que su espaciamiento y la dimensión perpendicular a la línea de costa dependen de la altura y el periodo de la ola (Coco *et al.* 1999).

Asimismo, ha habido algunos intentos de relacionar las características de estas formas rítmicas con el clima marítimo. Holland (1998) concluyó que las formas cuspidales se formaban principalmente tras la incidencia de un oleaje medio durante de 2 a 4 días después del pico de una tormenta. Masselink *et al.* (2004) se concentraron en la relación entre el campo de oleaje a cierta distancia de la costa y las formas rítmicas, concluyendo que estas se formaban bajo condiciones de calma y eran destruidas bajo las condiciones más energéticas a las que se ve sometida la costa. Sunamura (2004) estudió la importancia de la distribución longitudinal de alturas de ola a lo largo de la playa y su influencia a la hora de iniciar la creación de estas formas cuspidales. A pesar de todos estos estudios, no se ha encontrado una relación clara entre la presencia o ausencia de estas formaciones y el campo de oleaje. Este documento pretende hacer un estudio más profundo en este sentido.

También ha habido una serie de autores que se han concentrado en el estudio de otras formas regulares en la morfología costera, como la presencia de series regulares de pequeños cabos. Estas formas son las que se pueden observar en playas como la de Carchuna, caracterizadas por formas cuasi-periódicas con espaciamientos de centenares de metros (Coco y Murray, 2007). Komar (1998) estudió los cabos a gran escala de la costa este de Estados Unidos. Se encontraron dos posibles mecanismos para su formación (Dolan *et al.* 1979):

- Ondas de borde estacionarias atrapadas por cabos mayores debido a cambios bruscos en la alineación de la línea de costa.
- Bancos lineales en la batimetría de la zona que afectan a la refracción del oleaje.

Pero la mayoría de los estudios realizados para este tipo de formaciones, se han centrado en playas de sedimento fino. Casi ninguno se ha centrado en playas de grava o arena mixta como Carchuna, aunque en los últimos años sí han aparecido estudios que esencialmente examinan los procesos físicos y hacen experimentos de campo y laboratorio. Estos experimentos suelen centrarse en la zona de rompientes e intentan reproducir la evolución morfológica de la playa. Así, se ha encontrado que la hidrodinámica de la zona más cercana a la costa está dominada por esa zona de rompientes, aunque los flujos de energía de pre y post rotura parecen también muy importantes (Buscombe y Masselink, 2006). Ortega-Sánchez *et al.* (2003) estudiaron los principales mecanismos que en teoría podrían ser responsables de la formación de estas formas regulares a lo largo de la playa de Carchuna. Encontraron dos mecanismos principales:

- Refracción del oleaje sobre los valles submarinos de la zona (como el del Jolúcar), que crea concentraciones y divergencias de energía en la playa.
- Vórtices turbulentos de viento sobre la superficie del agua a sotavento de los obstáculos.

Además describieron otros dos mecanismos que pueden afectar a la morfología:

- Ondas de borde atrapadas.
- Inestabilidad en oleaje con gran ángulo de incidencia.

En este escrito se pretende relacionar la evolución de estas formas en la playa de Carchuna con la incidencia de eventos de diferente contenido energético, usando para ello la ayuda de video imágenes.

Precisamente esta técnica de video imágenes ha sido una herramienta muy importante en estudios sobre la morfología costera, particularmente en el estudio de la batimetría y la formación de barras de arena (Holman

y Stanley, 2007). Por el contrario, raras veces ha sido usada esta técnica en el estudio de formas en planta y en perfil de playas. Una de las principales investigaciones con este enfoque fue llevada a cabo por Holland (1998) mediante un análisis de una serie temporal de datos de 9 años para el estudio de la formación de formas cuspidales. En otros estudios se ha descrito la distancia a la que llega la zona de rompientes, combinando estas imágenes con campañas de campo detalladas (Masselink *et al.* 2004).

En este proyecto se usará la técnica de las video imágenes para hacer un estudio de la influencia de determinados eventos con distinto contenido energético en la morfología de las dos playas en las que se centrará la investigación.

1.5. Objetivos

Con el fin de ahondar en el comportamiento de playas caracterizadas por sedimentos finos y sedimentos mixtos en el litoral andaluz frente a la acción de eventos de gran contenido energético, se pretenden alcanzar una serie de objetivos que se detallan en el presente epígrafe.

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general que se pretende conseguir con este trabajo es *analizar el efecto que eventos de contenido energético moderado y extremo tienen sobre playas de sedimentos fino y mixto, estudiando cómo estas se regeneran posteriormente de forma natural, usando para todo ello técnicas de video imágenes y modelos numéricos de propagación de oleaje*. Las playas elegidas han sido las de Trafalgar (Cádiz) y Carchuna (Granada).

1.5.2. Objetivos específicos

Para la consecución del objetivo general, se han marcado una serie de objetivos específicos:

1. Zona de estudio

- Estudio y caracterización morfológica y de clima marítimo de la zona de estudio
- Análisis de los trabajos previos: [?], Ortega-Sánchez et al. (2004), Quevedo et al. (2008), Ortega-Sánchez et al. (2008a,2008b,2008c)

2. Datos climáticos

- Estudio y análisis de los datos del sistema WANA proporcionado por Puertos del Estado de los puntos próximos a las zonas de estudio
- Elaboración de series temporales (curvas de estados de mar) de altura de ola significativa, período medio de paso por cero y dirección media de incidencia
- Elaboración del régimen medio y gráficos de dispersión correspondientes
- Determinación de los umbrales de las condiciones energéticas medias, moderadas y extremas para la altura de ola significativa
- Selección de los dos tipos de eventos a analizar en este trabajo: moderados y extremos

3. Modelos numéricos

- Estudio de los modelos Ref-Dif y SWAN
- Calibración de ambos modelos de propagación mediante datos de campo
- Preparación de la batimetría y datos de entrada al modelo
- Simulación de condiciones energéticas moderadas y extremas en las zonas de estudio
- Análisis de resultados de los modelos

4. Análisis mediante técnicas de video imágenes

- Descripción de la técnica de video imágenes

- Análisis de las imágenes de las fechas seleccionadas antes, durante y después de la tormenta seleccionada
 - Comparación entre los modelos numéricos y la instrumentación
5. Elaboración de modelos conceptuales de la evolución de las zonas de estudio
- Modelo conceptual playas atlánticas
 - Modelo conceptual playas mediterráneas
 - Comparación
 - Tiempos de respuesta / relajación
6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Zonas de estudio

En este capítulo se analizarán las dos zonas de estudio elegidas para representar a las dos principales tipologías de playa presentes en el litoral andaluz, la atlántica y la mediterránea. Para ello se hará una descripción de su morfología atendiendo a criterios como sedimento, forma en planta, geología de la zona o impacto antrópico. También se describe el clima marítimo que se ha obtenido a partir del análisis de los datos del sistema WANA proporcionados por Puertos del Estado para boyas cercanas a las zonas de estudio y partir de los cuales se harán las propagaciones de los estados de mar seleccionados en capítulos posteriores.

2.1. Playa de Carchuna

La primera de las dos playas en las que se va a concentrar este estudio es la playa de Carchuna, que se encuentra en la costa granadina y que es representativa del tipo de playa mediterránea de sedimento heterogéneo de fino a muy grueso.

2.1.1. Morfología

Carchuna es una playa semireflejante delimitada por el Cabo Sacratif al oeste y la Punta de Carchuna al este, en la ladera sur de la Sierra de Lújar y de la Sierra de Carchuna y en las aguas del Mar de Alborán. Es una formación de alrededor de 3900 metros de longitud con una alineación aproximadamente oeste-este (W-E).

Se caracteriza por la presencia de una serie de formaciones rítmicas de gran escala conformando un total de seis pequeños cabos separados centenares de metros, siendo el primero de ellos el propio Cabo Sacratif. En adelante, cada uno de estos salientes se denominarán H(1-6), siendo H1 en Cabo Sacratif. Nuestro estudio se concentrará entre H2 y H3, zona de unos 700 metros de longitud aproximada, ya que es en esta zona donde se dispone de las imágenes tomadas desde la estación de video monitorización costera situada en el Cabo Sacratif (figuras 2.1 y 2.2).

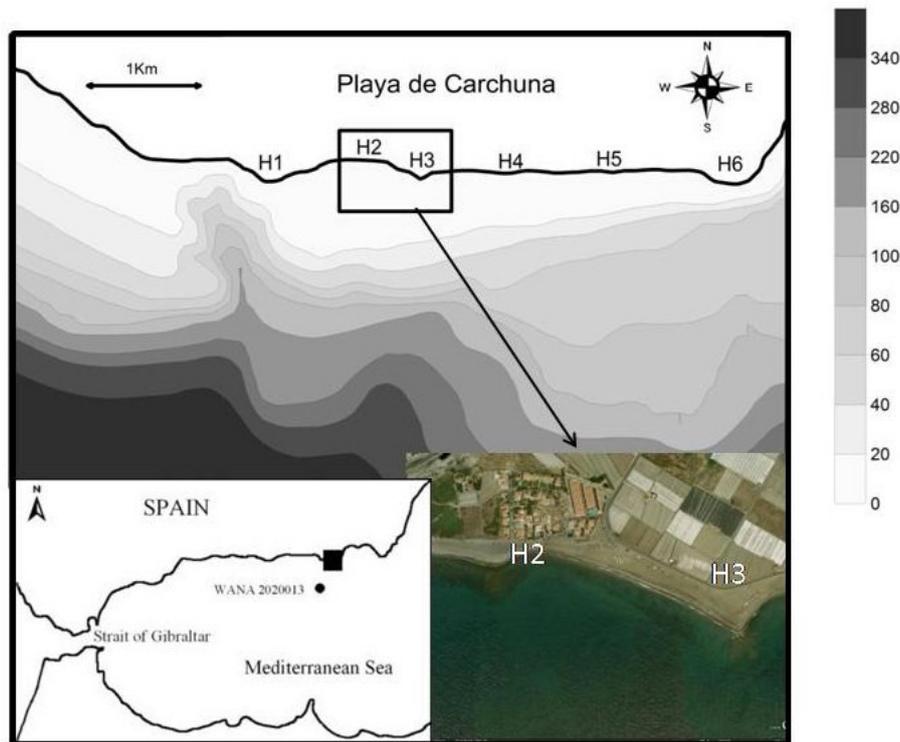


Figura 2.1: Situación de la zona de estudio en la playa de Carchuna (Granada): en la parte superior batimetría de la zona de estudio (H2-H3), esquema general de situación (parte inferior izquierda) y fotografía aérea de la zona H2-H3 (parte inferior derecha)



Figura 2.2: Vista aérea del conjunto de formas rítmicas presentes en la zona de estudio, con detalle de la zona H2-H3

Los sedimentos presentes en la playa varían desde partículas finas a gruesas, con un D_{50} entre 0.1 y 50 mm (Ortega-Sánchez *et al.*, 2003), siendo por lo tanto una playa mixta de arena y grava (figura 2.3).

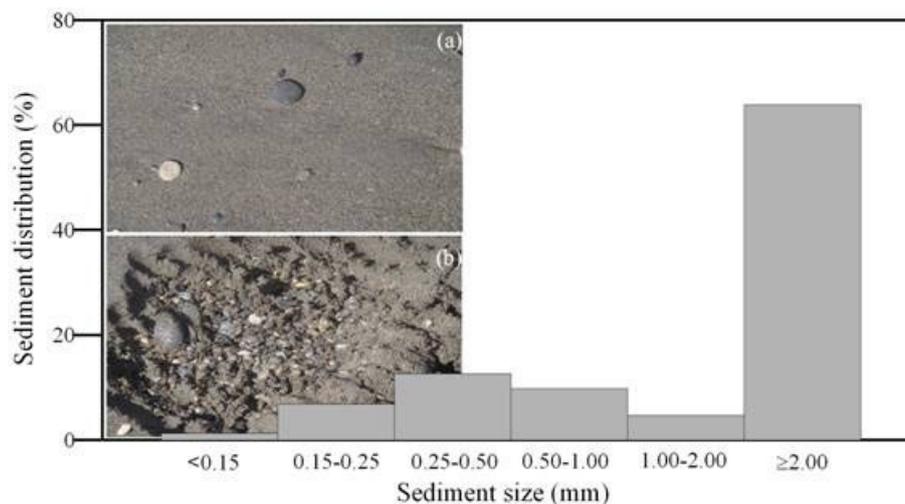


Figura 2.3: Distribución del tamaño de grano en la playa de Carchuna: a) Imagen del sedimento fino superficial y b) sedimento grueso subyacente [Fuente: Ortega-Sánchez *et al.*, 2003]

La playa de Carchuna no se encuentra en su estado natural, ya que hay una gran presencia de actividades humanas en la zona. Existen numerosos invernaderos que cubren la mayoría de la zona salpicados por pequeños grupos de edificaciones residenciales, puesto que esta playa tiene gran interés turístico en los meses más cálidos del año. Destacan pedanías como Calahonda y urbanizaciones como La Perla. Es reseñable que en la zona, debido a eventos de gran contenido energético, se han producido erosiones fuertes en la costa que han llegado a afectar a construcciones que por una excesiva presión sobre el litoral y el desconocimiento del comportamiento de la línea de costa dentro de la gestión del litoral, se encontraban demasiado cerca de la misma. En los últimos años se han tenido que realizar algunas actuaciones de emergencia en chiringuitos y duchas de estas playas, que se habían visto afectados por temporales de poniente muy severos. Esto hace patente la necesidad de un estudio pormenorizado de los procesos costeros en este tipo de zonas.

La batimetría de la zona es el resultado de procesos marítimos y fluviales. Estos últimos vienen dados por los cauces irregulares que desembocan en la playa y que aportan sedimentos únicamente cuando se producen lluvias torrenciales especialmente en la época estival, como es propio de climas semidesérticos como el de la zona.

En cuanto a los procesos marítimos, se caracterizan fundamentalmente por las tormentas que se producen durante el invierno y que afectan a esta zona del mar Mediterráneo. Éstas serán el objeto del siguiente apartado. Para comprender el comportamiento de la playa también habrá que tener en cuenta la presencia de diversos valles sumergidos como el Cañón de Jolúcar (figura 2.4), en el que en pocos metros se alcanzan profundidades muy grandes, y que influirán notablemente en el comportamiento del oleaje en aguas poco profundas responsable en parte de la formación de la topografía rítmica presente en la playa.

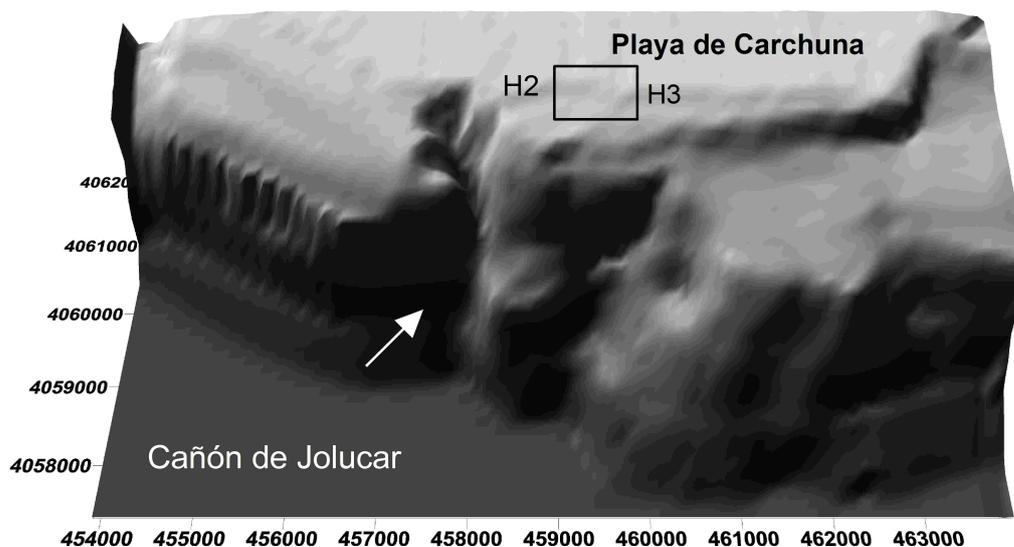


Figura 2.4: Vista en 3D de la batimetría de la zona, destacando la presencia del Cañón de Jolucar

2.1.2. Clima marítimo

En esta sección se va a realizar un estudio del clima marítimo de la Playa de Carchuna. Para ello se describirán las fuentes de datos y las herramientas utilizadas para su manipulación. Después se hará una descripción del régimen medio de oleaje, haciendo especial hincapié en aquellos estados de mar que sean más energéticos o más comunes.

En general, el clima marítimo de la zona está dominado por dos tipos de frentes, los pseudofrentes del Mediterráneo (oleaje de levante), y los sudatlánticos (oleaje de poniente) acompañados de trenes de olas largas procedentes del Atlántico y propagados por el estrecho de Gibraltar. El contenido energético del oleaje es inferior al del litoral atlántico. La carrera media de marea es de aproximadamente 0.5 metros.

En esta primera fase del estudio se va a analizar el oleaje utilizando la base de datos del proyecto WANA (Puertos del Estado, Ministerio de Fomento).

La base de datos WANA es el resultado de un modelo numérico espectral de propagación de oleaje de tercera generación que incluye generación de oleaje por viento, refracción, disipación por fricción con el fondo y por rotura del oleaje, e interacciones no lineales. Los datos de entrada del modelo de oleaje son campos de viento a 10 m de altura procedentes del modelo numérico HIRLAM. En la ejecución de los modelos se han asimilado datos reales de viento.

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WAM. Dicha aplicación es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis a priori sobre la forma del espectro de oleaje. Este modelo trabaja en el Atlántico con una resolución de 0.25 grados (30 Km) y en el Mediterráneo con una resolución de 0.125 grados (15 Km). La aplicación utilizada no incluye esquema de asimilación de datos instrumentales.

Para este estudio se ha solicitado al Programa de Clima Marítimo de Puertos del Estado la información correspondiente al punto WANA 2020013 (figura 2.5), de coordenadas 36.625° N, 3.50° W, situado a una profundidad de aproximadamente 50 m, y que es el más cercano a la zona de estudio situada entre H2 y H3.

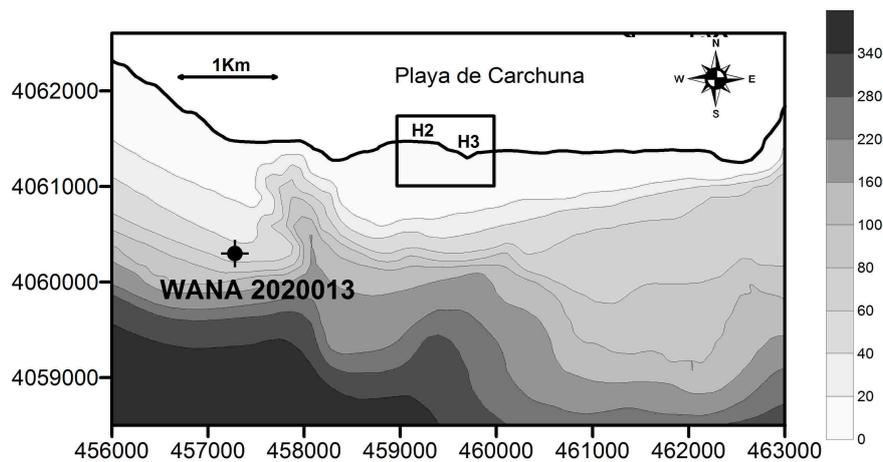


Figura 2.5: Imágen batimétrica de la situación de la boya WANA 2020013

Se han analizado los datos entre las 03:00 horas del 14 de enero de 1996 y las 00:00 horas del 31 de marzo de 2008. La información se divide en estados de mar de tres horas de duración. La información utilizada de cada estado de mar es la siguiente:

- Altura de ola significativa espectral (H_s)
- Periodo de pico espectral (T_p)
- Dirección del periodo de pico (DirM)
- Velocidad media del viento (VelV)
- Dirección media de procedencia del viento (DirV)

El total de estados de mar analizados es de 33504, que servirán para establecer el régimen medio en el punto WANA. Todo este paquete de datos contiene ventanas en las que no existen datos, no siendo nunca superiores a 184 medidas. Esto puede deberse a problemas técnicos de las boyas o a fallos en su alimentación eléctrica o en la transmisión de datos. Se han analizado las diferentes series que faltan, observando que en ningún caso se ha producido el fallo de la boya durante un periodo de tiempo en el que el oleaje presentaba un alto contenido energético, no perdiéndose por tanto información a la hora de estudiar las tormentas. Se ha estimado por tanto, que los periodos en los que faltan datos no corresponden con temporales. Dentro de estos últimos, que nos servirán para la elaboración del régimen extremal, se van a estudiar los acaecidos desde el año 2003 al 2007, fechas en las que se dispone de las imágenes obtenidas por la estación de monitorización. La cantidad de datos disponible permite sobradamente un estudio de régimen medio en la zona.

2.1.2.1. Régimen medio

Para la obtención del régimen medio de oleaje en el punto WANA 2020013, con la información proporcionada por el mismo se han obtenido los gráficos de dispersión de altura de ola significativa espectral (H_s), periodo de pico espectral (T_s) y dirección del periodo de pico (DirM) (figuras 2.6, 2.7 y 2.8). Para ello se ha mantenido el convenio de los puntos WANA para los ángulos de dirección del oleaje. De esta forma 0 grados corresponden con un oleaje de procedencia sur y 90 grados con uno de procedencia este.

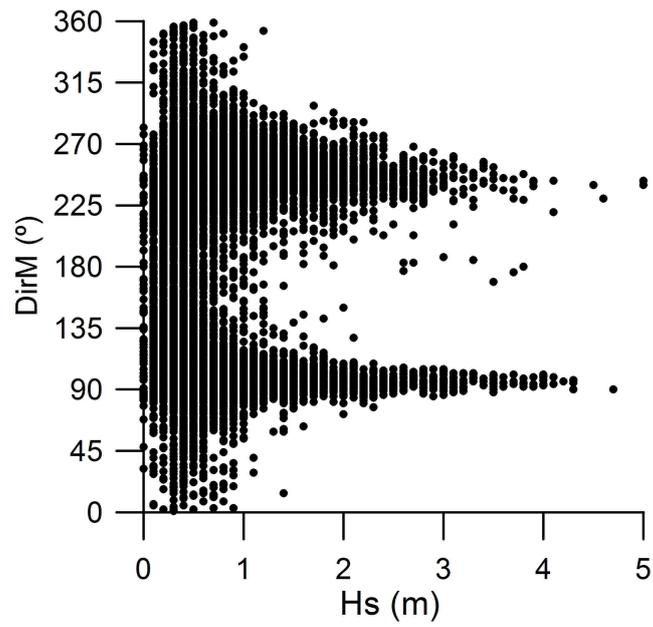


Figura 2.6: Dispersión del régimen medio de altura de ola y dirección de incidencia en la playa de Carchuna

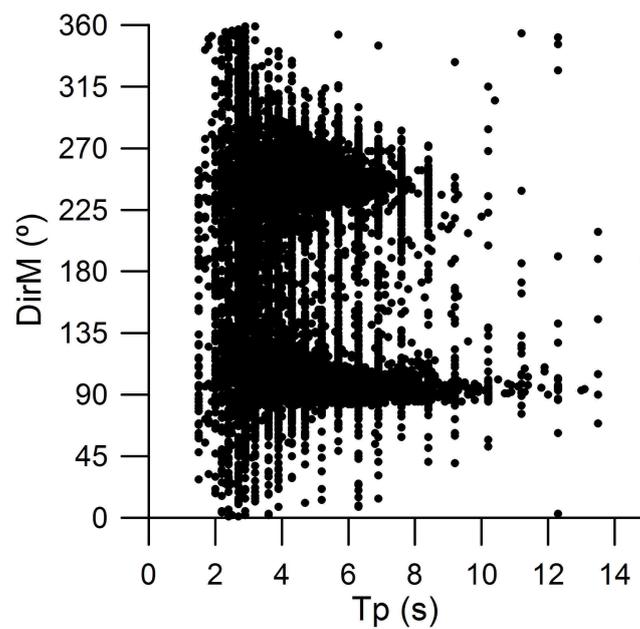


Figura 2.7: Dispersión del régimen medio de dirección de incidencia y periodo de pico en la playa de Carchuna

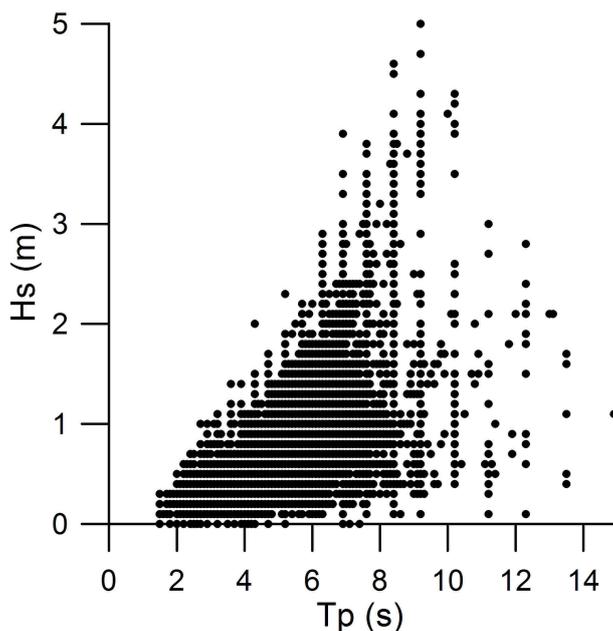


Figura 2.8: Dispersión del régimen de altura de ola y periodo de pico en la playa de Carchuna

Se puede observar cómo hay dos direcciones predominantes en la procedencia del oleaje, ya que la mayoría de los puntos obtenidos corresponden con una procedencia aproximadamente este u oeste. Esto se debe a que en general el clima atmosférico de la región está dominado por dos tipos de borrascas. Las procedentes del Atlántico norte provocan vientos del oeste, mientras que las que proceden del Atlántico sur provocan vientos del este.

Para ver con más detalle cuáles son las direcciones más significativas y que determinaran el estado de mar y el tipo de oleaje en la playa, así como los periodos de pico más comunes, se han realizado sendos histogramas haciendo un análisis estadístico de la procedencia del oleaje y del periodo de paso por cero para cada intervalo de altura de ola significativa de 0.5 m.

Dirección media (º)																	
Hs(m)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total (%)
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0,01
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
4.0-4.5	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05
3.5-4.0	0	0	0	0	0,08	0	0	0	0	0	0,01	0,04	0	0	0	0	0,14
3.0-3.5	0	0	0	0	0,13	0,02	0	0	0	0	0,02	0,1	0,01	0	0	0	0,27
2.5-3.0	0	0	0	0	0,33	0,04	0	0	0	0	0,12	0,29	0,03	0	0	0	0,81
2.0-2.5	0	0	0	0,01	1,1	0,12	0	0	0	0,01	0,17	0,98	0,16	0,01	0	0	2,57
1.5-2.0	0	0	0	0,01	2,22	0,51	0,01	0	0,01	0,05	0,38	2,8	0,61	0,03	0	0	6,63
1.0-1.5	0	0,01	0,01	0,06	5,5	1,85	0,07	0,05	0,04	0,09	1,13	6,81	1,87	0,14	0,01	0,01	17,64
0.5-1.0	0,03	0,06	0,1	0,45	13,26	7,11	0,5	0,23	0,25	0,43	3,39	13,84	3,24	0,49	0,1	0,02	43,49
0.0-0.5	0,01	0,03	0,03	0,23	8,99	6,37	0,95	0,44	0,61	0,88	3,61	5,24	0,79	0,15	0,06	0,01	28,39
Total (%)	0,04	0,09	0,14	0,76	31,66	16,01	1,54	0,72	0,91	1,46	8,83	30,11	6,7	0,82	0,17	0,04	100

Figura 2.9: Histograma de dirección de incidencia para la playa de Carchuna según la altura de ola

Periodo de pico (s)												
Hs(m)	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	Total (%)
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0,01
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0,01
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0,03	0,02	0	0	0	0,05
3.5-4.0	0	0	0	0	0,01	0,07	0,04	0,01	0	0	0	0,14
3.0-3.5	0	0	0	0,02	0,14	0,1	0,01	0	0	0	0	0,27
2.5-3.0	0	0	0	0,28	0,41	0,09	0,02	0,01	0	0	0	0,81
2.0-2.5	0	0	0,09	1,63	0,66	0,1	0,03	0,03	0	0,01	0,01	2,57
1.5-2.0	0	0,06	2,22	3,52	0,55	0,13	0,08	0,02	0,01	0,01	0,01	6,63
1.0-1.5	0,18	3,1	9,22	4,01	0,71	0,24	0,08	0,07	0,01	0	0	17,64
0.5-1.0	11,46	15,09	12,19	3,29	0,84	0,33	0,15	0,07	0,03	0,02	0	43,49
0.0-0.5	15	8,1	3,3	1,4	0,32	0,16	0,06	0	0,02	0,02	0	28,39
Total (%)	26,65	26,36	27,03	14,16	3,65	1,24	0,5	0,23	0,08	0,06	0,03	100

Figura 2.10: Histograma de periodo de pico para la playa de Carchuna según la altura de ola

Para ver más gráficamente estos datos, pueden representarse mediante una rosa de oleaje, en la que se representan los porcentajes de oleaje incidentes según altura y procedencia.

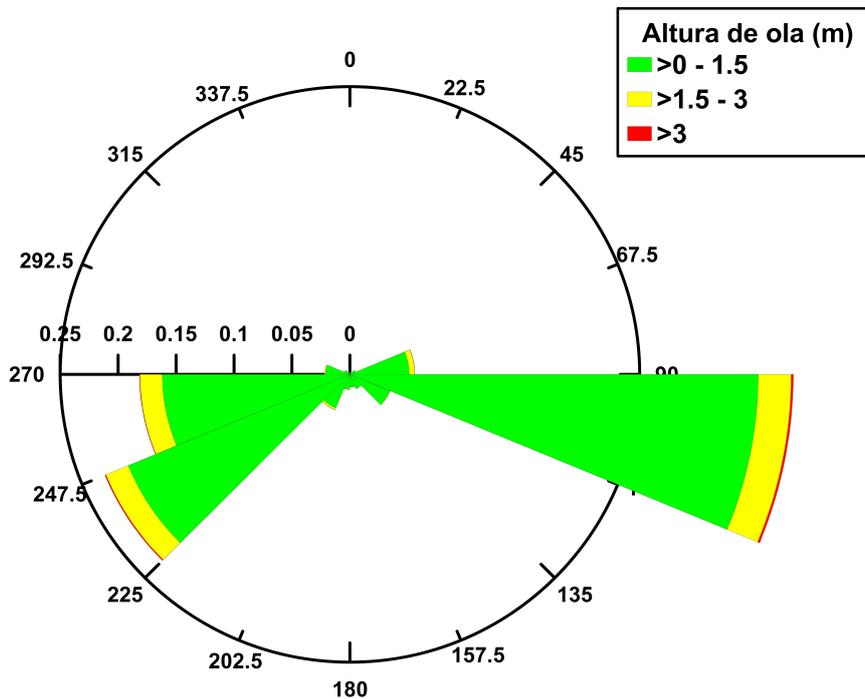


Figura 2.11: Representación de la rosa de oleaje de régimen medio para la playa Carchuna según altura de ola y dirección de incidencia

Puede observarse que el oleaje procedente del este tiene una variación direccional muy pequeña, concentrándose entre los 90 y los 112.5 grados. En total, esta procedencia suma más de un 40 % del oleaje que incide en la playa de Carchuna. El procedente del oeste, sin embargo, puede incidir en una horquilla más amplia de direcciones, que va desde los 225 a los 270 grados, sumando entre ese intervalo aproximadamente un 45 % de todas las olas que llegan a Carchuna. Por tanto, nueve de cada diez de las olas que se propagan hasta esta playa

lo hacen en dirección este u oeste. El oleaje superior a tres metros de altura, correspondiente a condiciones energéticas extremas, es en cualquier caso muy bajo siendo siempre menor del 1 %, con lo que los periodos de tormenta son muy escasos y puntuales, predominando las condiciones energéticas medias en más del 90 % del tiempo.

2.2. Playa de Trafalgar

La otra zona de estudio es la playa de Trafalgar, situada en la provincia de Cádiz al sur de su capital. Representa un buen ejemplo del tipo de playa atlántica que podemos encontrar en Andalucía.

2.2.1. Morfología

Trafalgar es una playa de arena de aproximadamente 2 km de longitud con una alineación NNW-SSE, caracterizada por carreras de marea medias de 2 m (mesomareal) y un oleaje predominante del W, de tipo swell, con mayores alturas de ola y periodos de paso por cero que en el caso mediterráneo, ya que el fetch en el que se genera el oleaje es de mayor extensión y está situado a mayor distancia de la costa, en el Atlántico.

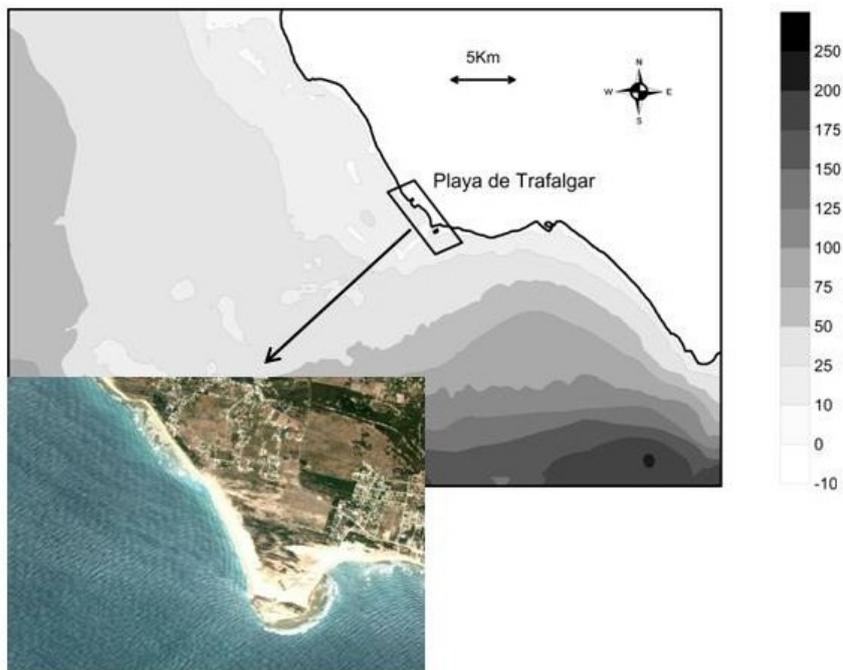


Figura 2.12: Batimetría de la playa de Trafalgar (arriba) con detalle de imagen del satélite (abajo).



Figura 2.13: Imagen aérea de la zona de estudio.

La playa está limitada en el sur por el cabo Trafalgar, donde la costa cambia su alineación abruptamente hacia el este. Es en este punto donde se encuentra situada la estación de video monitorización que servirá como base para la toma de imágenes reales de la playa. Este cabo además tiene gran influencia en los procesos morfodinámicos de la zona, caracterizados por fuertes corrientes y formas rítmicas en la línea de costa, siendo las más frecuentes las formas cuspidales. Esta tipología de morfología costera está asociada a las corrientes de circulación de agua que provocan las *rip currents*, que son corrientes de retorno de una velocidad de hasta 2 m/s que provocan la denominada *resaca* y que pone en peligro la seguridad de los bañistas. Estos procesos implican asimismo un importante transporte de sedimentos.



Figura 2.14: Imagen de las rip currents o corrientes de retorno en la playa de Trafalgar, donde se aprecia la presencia de estas de una forma regular a lo largo de la playa. En azul oscuro aparecen las corrientes superficiales, en azul claro la corriente de retorno sumergida [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

Sin embargo, y a pesar de ser una playa de sedimento medio, no presenta barras en el perfil. Las formaciones rítmicas existentes presentan una gran variabilidad en el tiempo y en el espacio, ya que están muy influenciadas por eventos de gran contenido energético, bastante frecuentes en la zona de estudio. La plataforma continental tiene una anchura de unos 30-14 km donde la profundidad alcanza los 120 metros. Así, existe una pendiente relativamente suave de 1.5 grados. Aproximadamente a unos 30 metros de profundidad existe un banco de arena que es explotado para alimentar la mayoría de las regeneraciones de las playas de la Bahía de Cádiz.

La topografía de la playa y la batimetría en aguas poco profundas fue estudiada en mayo y junio de 2006 (Ortega-Sánchez *et al.*, 2008) mediante técnicas GPS y ondas sonoras y con ayuda de diferentes software de reconocimiento. Se observó que la zona de playa seca, zona situada entre la marca de la marea máxima media y que sólo se ve afectada por oleajes severos tiene una anchura que varía desde los 40 a los 70 metros, incrementándose conforme nos acercamos al cabo Trafalgar. La zona entre ésta y la orilla puede considerarse plana sin presencia de barras de arena y con alguna formación rocosa tipo flysch principalmente en el norte de la playa.

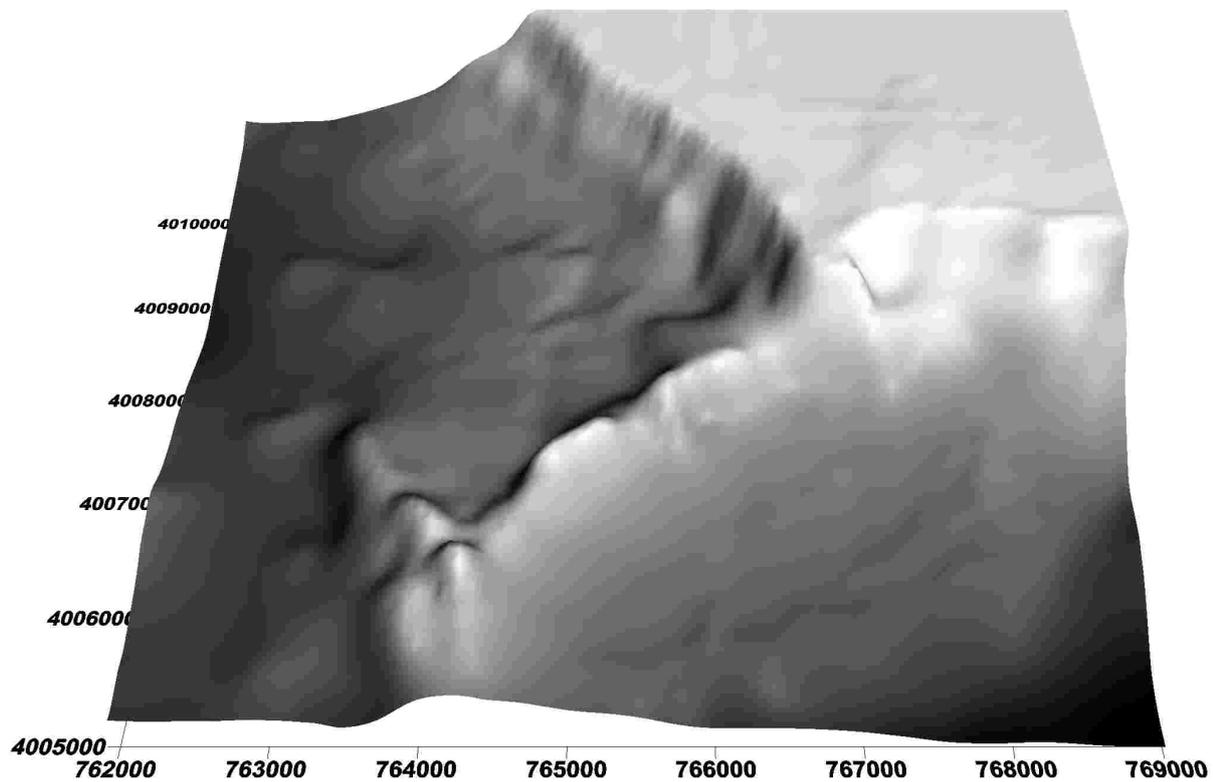


Figura 2.15: Representación en 3D de la batimetría de la zona

Los sedimentos que se pueden encontrar en la zona (Ortega-Sánchez *et al.*,2008) indican la presencia de arenas desde medias (0.25-0.5 mm) a gruesas (0.5-1 mm). También se ha observado que la rotura del oleaje se produce en una estrecha franja, principalmente cuando el oleaje es medio con $H_s < 1$ m.

Dada la longitud de la playa, esta se puede dividir en distintas zonas en las que el comportamiento y la evolución morfodinámica de la forma en planta y el perfil son diferenciables (Ortega-Sánchez *et al.*,2008). Así, se ha dividido el área de estudio en tres zonas distintas, (C1, C2 y C3) según nos alejamos del cabo Trafalgar y hacia el norte de la playa (figura 2.16). Esta división coincide con las diferentes cámaras situadas en la estación de video monitorización, ya que para cada una de ellas se ha orientado una cámara.

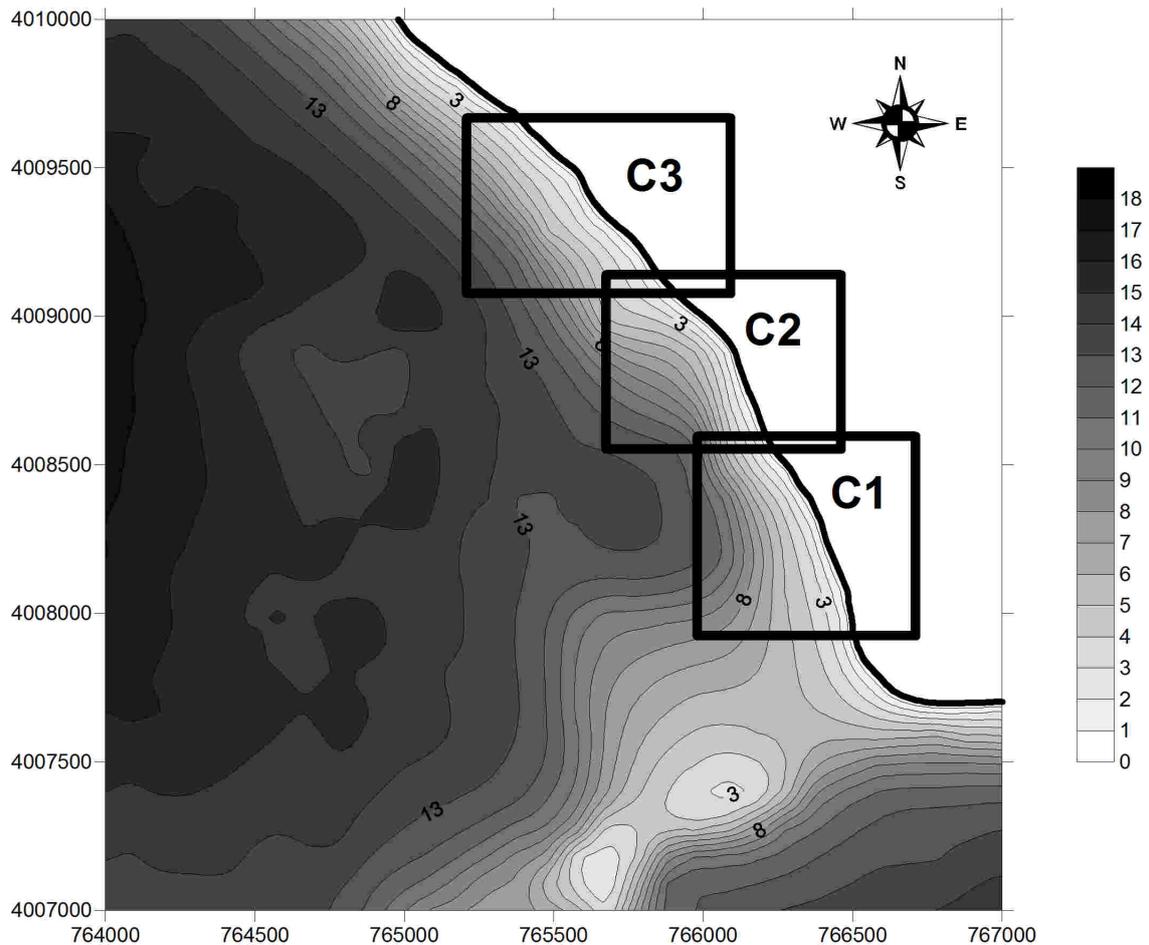


Figura 2.16: Imagen batimétrica de la distribución de las distintas zonas de la playa de Trafalgar, coincidentes con las tres cámaras disponibles

A parte de estos aspectos morfológicos, existe otro factor que diferencia a esta playa de la playa de Carchuna. Trafalgar se encuentra prácticamente en estado natural, ya que por ahora se ha visto al margen de planes urbanísticos y no hay ninguna población importante en su cercanía. En este caso tras la playa se puede encontrar una barrera de vegetación y no de construcciones o invernaderos. La topografía de la zona de Cádiz es más suave y con pendientes tierra adentro menores, lo que en parte determina las características citadas anteriormente.

2.2.2. Clima marítimo

Para el estudio del clima marítimo de Trafalgar se ha procedido de la misma forma que en el caso anterior. También se ha recurrido a Puertos del Estado para la obtención de la información de puntos WANA. En esta ocasión, y por ser el más representativo por su localización del clima de la zona, se ha elegido el punto 1050545, de coordenadas latitud 36.25°N y longitud 6.25°W, a unos 30 metros de profundidad.

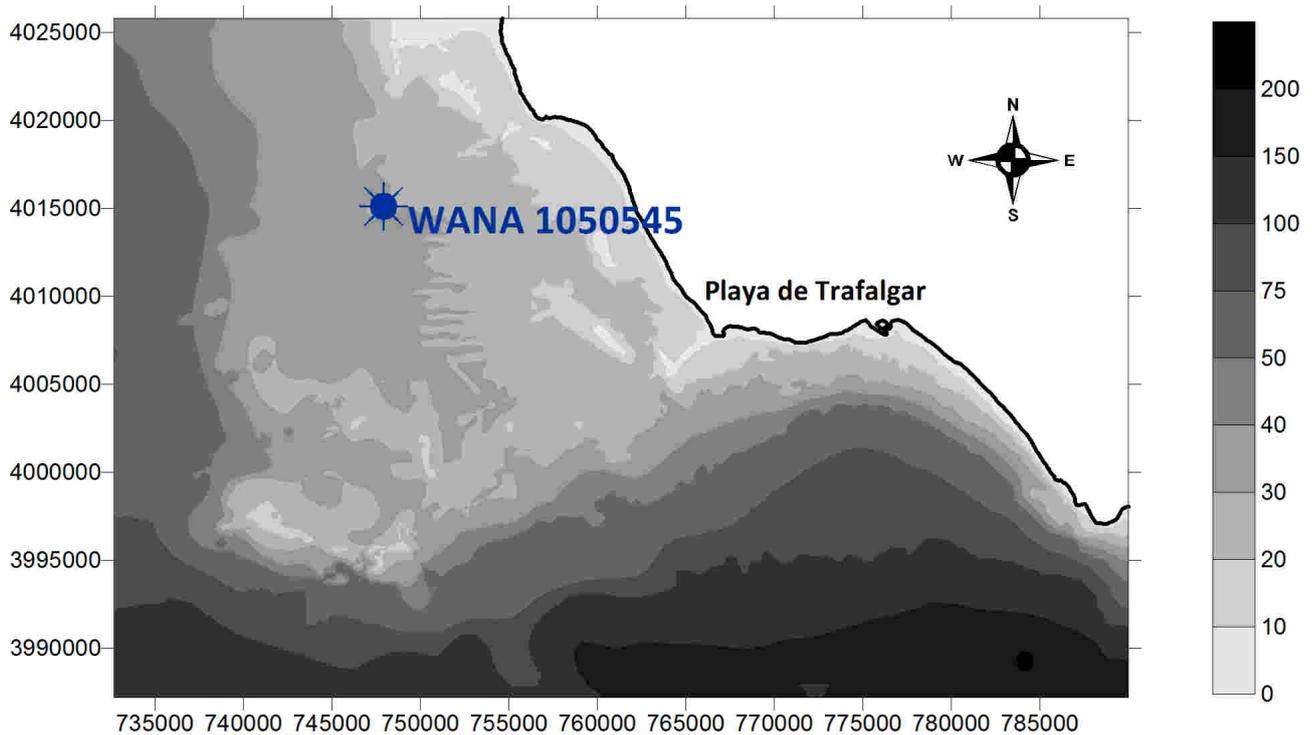


Figura 2.17: Representación batimétrica de la situación de la boya WANA 1050545

El registro usado tiene las mismas características y variables que el usado en el caso de Carchuna y explicado anteriormente, con datos desde el 22 de octubre de 1995 hasta el 16 del mismo mes del año 2007. En total se dispone de 32898 mediciones, que han servido para la elaboración del régimen medio de oleaje. Por otra parte, faltan algunos datos como en el caso de Carchuna, aunque de igual modo se han estudiado comprobando que en ningún caso pertenecen a episodios de gran contenido energético que serán los que se estudiarán de manera pormenorizada. Para esto último se han escogido los datos de entre octubre del año 2003 y octubre de 2007 (con más de 10000 medidas). La fiabilidad de los datos y su posterior análisis en cuanto al tamaño de la muestra queda asegurada.

2.2.2.1. Régimen medio

Como ya se ha comentado, para la elaboración del régimen medio se han usado un total de 32898 datos a lo largo de 12 años meteorológicos. En este caso también se han obtenido los gráficos de dispersión de altura de ola significativa espectral (H_s), periodo de pico espectral (T_s) y dirección del periodo de pico ($DirM$). Para ello se ha mantenido el convenio de los puntos WANA para los ángulos de dirección del oleaje. De esta forma 0 grados corresponden con un oleaje de procedencia sur y 90 grados con uno de procedencia este. Los resultados obtenidos han sido:

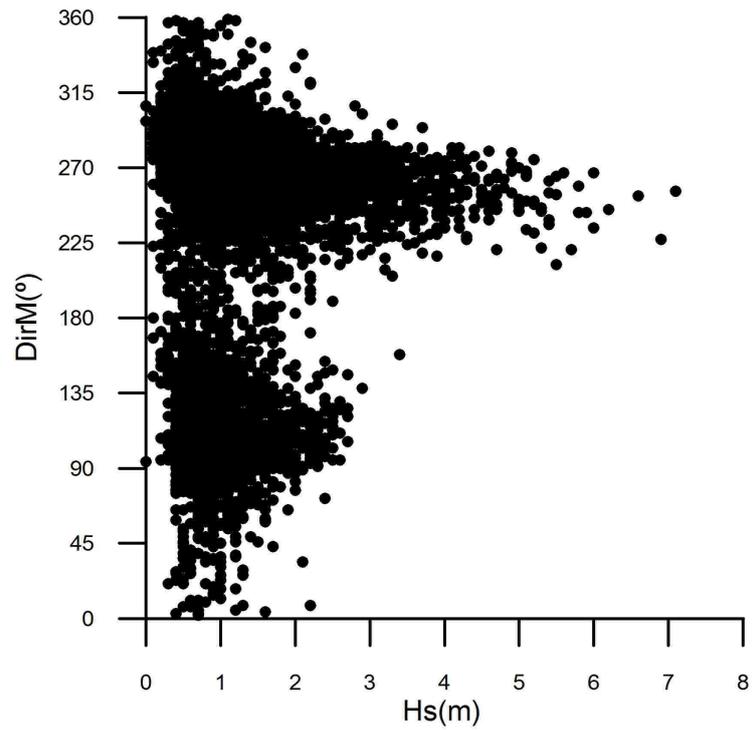


Figura 2.18: Dispersión de altura de ola y dirección de incidencia para el régimen medio de la boya WANA 1050545

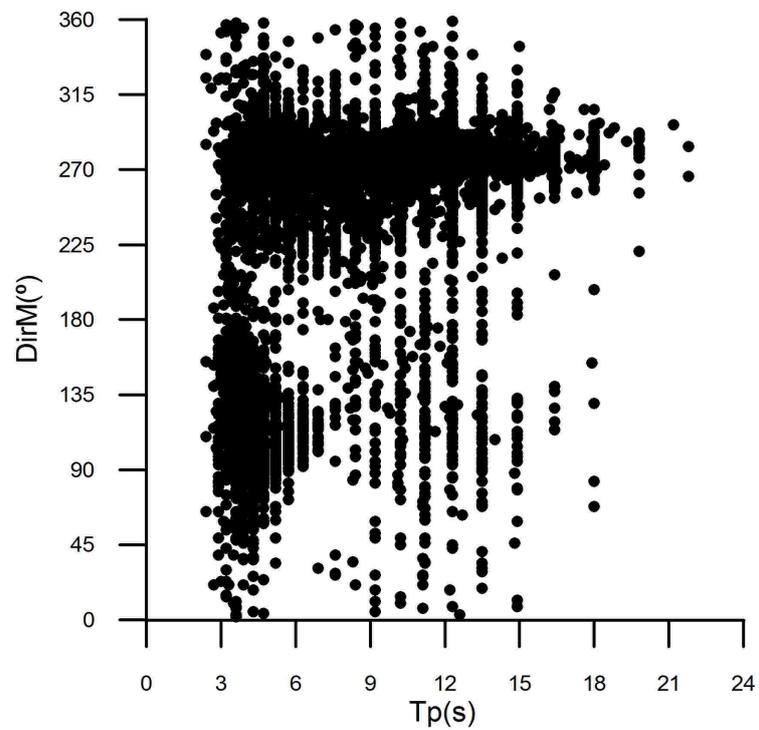


Figura 2.19: Dispersión de dirección de incidencia y periodo de pico para el régimen medio de la boya WANA 1050545

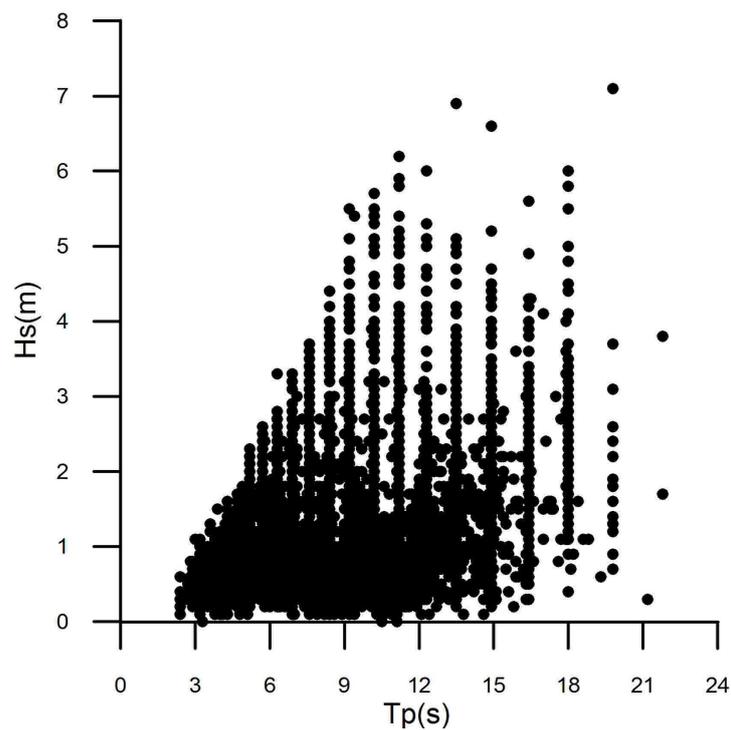


Figura 2.20: Dispersión de altura de ola y periodo de pico para el régimen medio de la boya WANA 1050545

Se puede observar que el oleaje predominante es el que proviene del oeste (270° con el convenio de medida adoptado) con un porcentaje altísimo respecto a la incidencia. Este oleaje proviene del océano Atlántico y está generado en un fetch de viento de gran superficie y a cierta distancia de la costa, lo que permite que el oleaje se desarrolle completamente. En cuanto a la altura de ola, se puede observar que durante el invierno, periodo en el que el clima es más severo, H_s está en la mayoría del tiempo contenida entre 1 y 2 metros. En la época estival, sin embargo, desciende la altura de ola situándose por debajo de 1 metro en más de un 80 % del tiempo.

Para llevar a cabo un análisis estadístico de éstos datos de oleaje, se han realizado sendos histogramas haciendo un estudio proporcional de la procedencia del oleaje y del periodo de paso por cero para cada intervalo de altura de ola significativa de 0.5 m.

Dirección Media																	
Hs(m)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total (%)
7.0-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0,02
6.5-7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0	0,02
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0,02
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,05	0,02	0	0	0	0,09
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,12	0,07	0	0	0	0,22
4.5-5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,13	0,11	0	0	0	0,26
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,2	0,21	0,02	0	0	0,49
3.5-4.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,33	0,4	0,02	0	0	0,85
3.0-3.5	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,11	0,44	0,76	0,06	0	0	1,4
2.5-3.0	0	0	0	0	0,02	0,16	0,05	0,02	0,01	0,03	0,17	0,68	1,47	0,16	0,01	0,01	2,78
2.0-2.5	0,01	0	0,01	0,01	0,16	0,39	0,13	0,05	0,02	0,06	0,27	0,97	2,67	0,66	0,01	0,01	5,4
1.5-2.0	0,01	0,01	0,02	0,1	0,53	0,85	0,45	0,16	0,14	0,15	0,41	1,53	5,83	2,24	0,09	0,02	12,54
1.0-1.5	0,06	0,07	0,1	0,35	1,12	1,54	1,48	0,35	0,16	0,13	0,53	2,15	11,51	6,54	0,39	0,06	26,56
0.5-1.0	0,19	0,15	0,24	0,36	0,98	1,53	1,34	0,51	0,3	0,25	0,66	1,99	17,07	12,52	0,68	0,3	39,08
0.0-0.5	0,02	0,03	0,01	0,02	0,13	0,18	0,2	0,14	0,09	0,12	0,16	0,28	3,16	5,43	0,24	0,07	10,29
Total (%)	0,28	0,27	0,37	0,85	2,95	4,65	3,66	1,23	0,72	0,76	2,53	8,9	43,29	27,65	1,42	0,46	100

Figura 2.21: Histograma de dirección de incidencia para la playa de Trafalgar según la altura de ola

Periodo de pico (s)																				
Hs(m)	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0	15.0-16.0	16.0-17.0	17.0-18.0	18.0-19.0	19.0-20.0	20.0-21.0	21.0-22.0	Total (%)
7.0-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0,02
6.5-7.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,02
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,03	0	0	0,01	0	0,01	0	0,02	0	0	0	0,09
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,01	0	0	0	0,02	0	0	0	0,22
4.5-5.0	0	0	0	0	0,01	0,03	0,05	0,08	0,06	0,06	0,02	0,01	0	0,01	0	0,03	0	0	0	0,26
4.0-4.5	0	0	0	0	0,01	0,02	0,08	0,08	0,06	0,06	0,02	0,06	0	0,06	0,01	0,03	0	0	0	0,49
3.5-4.0	0	0	0	0,01	0,05	0,1	0,12	0,14	0,07	0,05	0,09	0,08	0	0,06	0,02	0,05	0	0	0	0,85
3.0-3.5	0	0	0	0,05	0,16	0,13	0,14	0,16	0,09	0,1	0,11	0,14	0,01	0,17	0,01	0,13	0,01	0	0	1,4
2.5-3.0	0	0	0,02	0,46	0,24	0,25	0,26	0,18	0,17	0,16	0,25	0,29	0,03	0,25	0,03	0,18	0,02	0	0	2,78
2.0-2.5	0	0,01	0,36	1,19	0,39	0,32	0,35	0,31	0,24	0,39	0,58	0,56	0,07	0,37	0,01	0,23	0,03	0	0,01	5,4
1.5-2.0	0,01	0,33	2,45	1,64	0,62	0,53	0,51	0,48	0,69	1,36	1,7	1,31	0,09	0,48	0,04	0,24	0,04	0	0,02	12,54
1.0-1.5	0,36	4,52	4,18	2,29	0,96	0,86	1,59	1,77	2,61	3,24	2,34	1,27	0,07	0,35	0,03	0,1	0,02	0	0,01	26,56
0.5-1.0	4,62	5,76	4,76	2,22	1,79	2,92	4,05	4,04	3,86	2,6	1,38	0,73	0,06	0,21	0,02	0,03	0,02	0	0	39,08
0.0-0.5	1,22	1,12	0,52	0,51	1,02	1,79	1,41	1,11	0,81	0,4	0,18	0,12	0,03	0,03	0	0,01	0,01	0	0,01	10,29
Total (%)	6,21	11,73	12,28	8,36	5,22	6,93	8,58	8,37	8,76	8,43	6,71	4,59	0,36	2,02	0,17	1,06	0,15	0	0,06	100

Figura 2.22: Histograma de periodo de pico para la playa de Trafalgar según la altura de ola

Estos datos pueden ser representados como una rosa de oleaje (2.23).

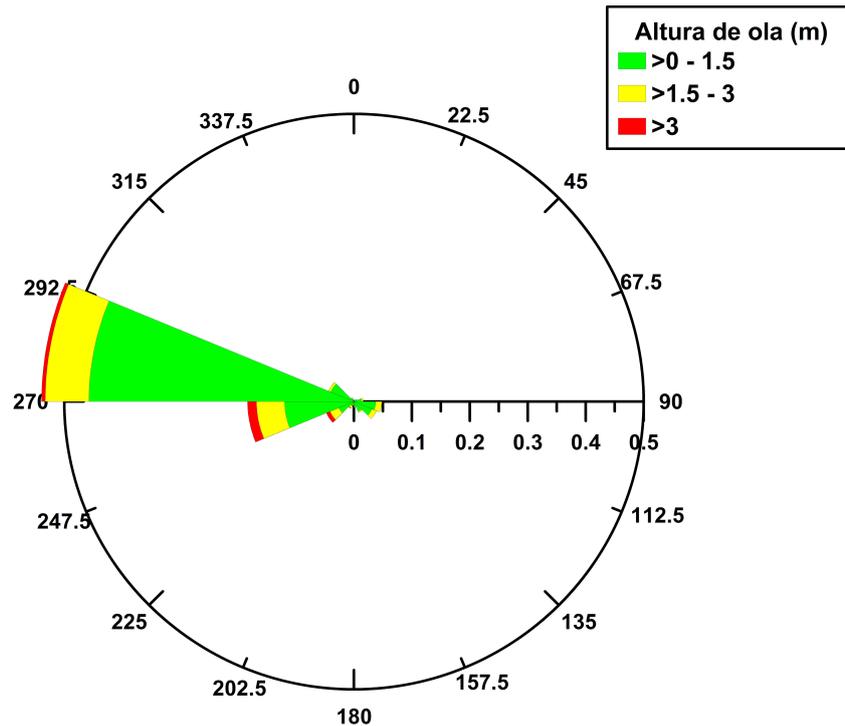


Figura 2.23: Representación gráfica de la rosa de oleaje obtenida para Trafalgar según altura de ola y dirección de incidencia

Puede observarse como, a diferencia de Carchuna, en Trafalgar sí que hay un porcentaje significativo de oleaje incidente de contenido energético extremo, siendo este mayor de un 5 %. También puede verse como más de la mitad del oleaje incide con un ángulo de entre 270 y 292.5 grados y como casi todo lo hace con un ángulo entre 247.5 y 292.5 grados con lo que la variabilidad en cuanto a dirección de incidencia del oleaje es muy pequeña.

2.3. Estaciones de video monitorización costera: faros de Sacratif y Trafalgar

Para realizar un estudio riguroso de la morfodinámica costera es necesario disponer de datos en condiciones naturales tomados *in situ*, que calibren y apoyen a los modelos usados para el estudio de la evolución de la línea de costa. Con este fin se colocaron en el año 2003 dos estaciones de video monitorización ARGUS en el litoral andaluz, gestionadas por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

La primera de ellas está situada en el faro Sacratif, en el extremo oeste de Carchuna, lo que en nuestro estudio correspondería con el punto H1. La otra estación se encuentra en el faro de Trafalgar, al sur de la playa del mismo nombre. Ambas estaciones entraron en funcionamiento en noviembre de 2003 y se componen de una serie de cámaras visualizando oblicuamente la línea de costa. Estas cámaras se conectan a un procesador de imágenes en un ordenador que transmite los datos para su tratamiento a una estación de trabajo situada en la Universidad de Granada. Esta técnica permite la obtención de datos de forma efectiva, barata y permanente para el planeamiento, evaluación y gestión de zonas costeras. De esta forma, con estas imágenes se puede comprobar la evolución real de la forma de la playa ante diferentes eventos de los cuales se conozca su fecha de ocurrencia (ver Apéndice A).

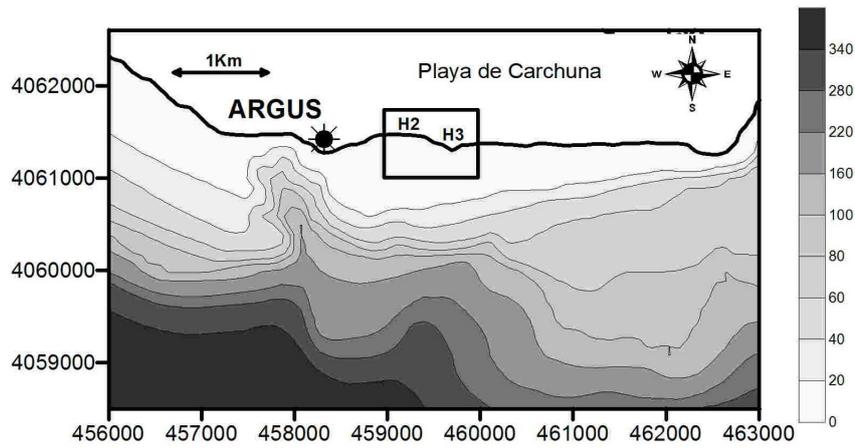


Figura 2.24: Representación batimétrica de la situación de la estación de video monitorización ARGUS en la playa de Carchuna con detalle de la zona de estudio

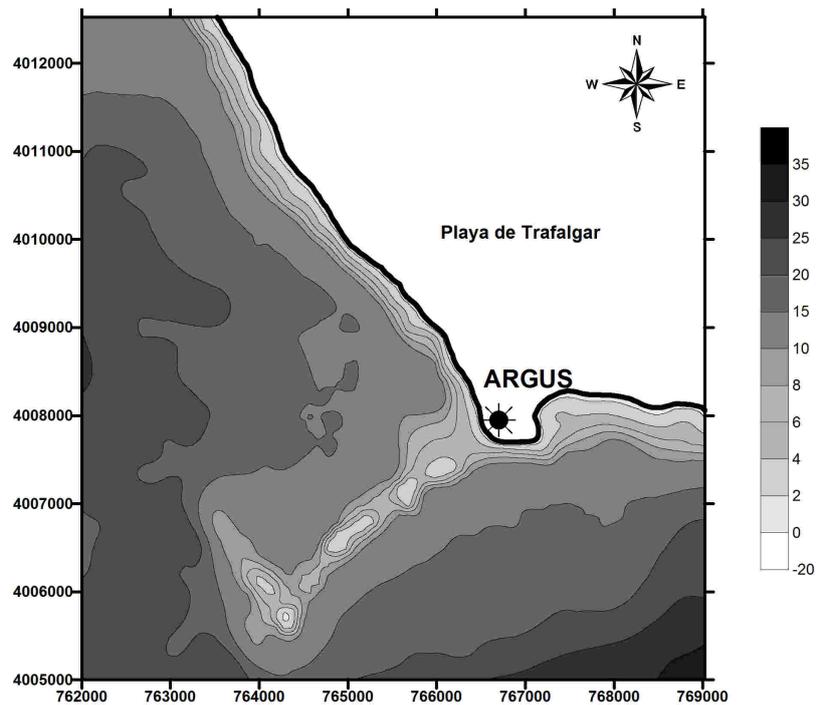


Figura 2.25: Representación batimétrica de la situación de la estación de video monitorización ARGUS en la playa de Trafalgar

El sistema en cada estación se compone de tres cámaras que realizan capturas con una frecuencia de 2 Hz durante los primeros 10 minutos de cada hora en la que haya luz solar. Con estas cámaras se realiza:

- **Imagen instantánea (snap-shot):** muestra una visión general del estado de la zona de estudio, pero no son útiles para análisis más profundos.

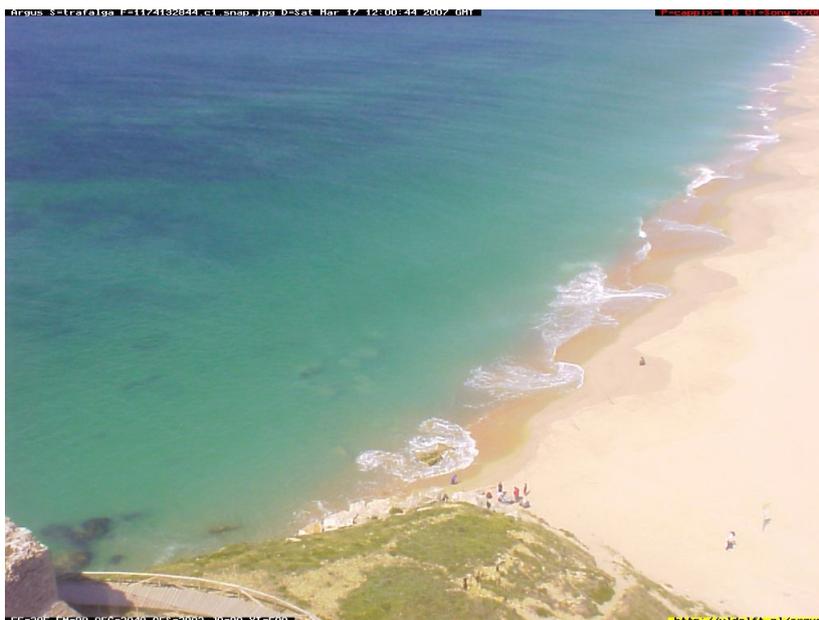


Figura 2.26: Imagen instantánea de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Imagen promediada (time-exposure image):** es el resultado de promediar 1200 imágenes instantáneas tomadas con una frecuencia de 1 Hz durante los 10 primeros minutos de cada hora de servicio. Esta imagen permite la definición de los cambios en la morfología sumergida de la playa, ya que se suavizan los efectos del oleaje y se diferencian según los tonos de la imagen la línea de costa y las variaciones en la batimetría.

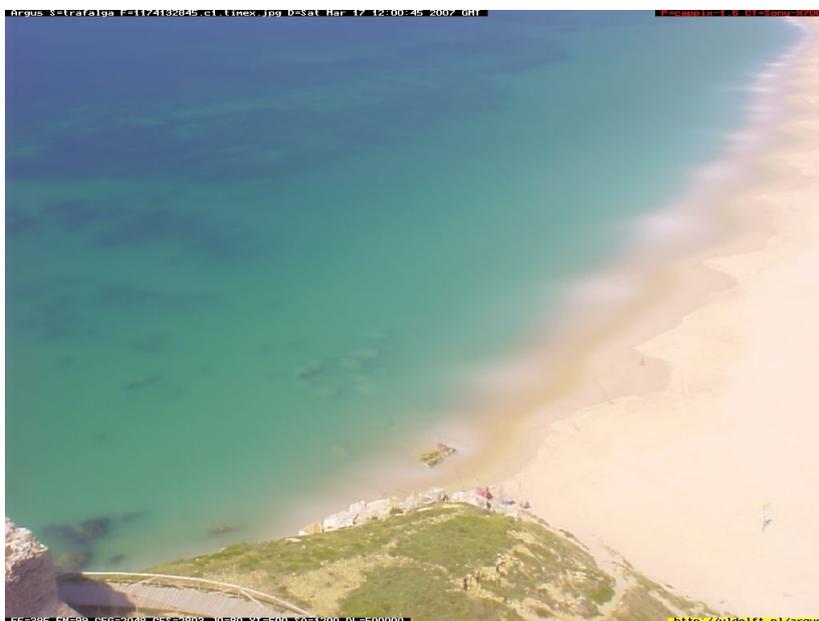


Figura 2.27: Imagen promediada de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Varianza de la imagen (variance image):** reflejan la variación de la intensidad de la luz durante el mismo periodo de 10 minutos, permitiendo la identificación de las zonas que están cambiando con el tiempo. Como ejemplo, una zona de playa emergida aparecerá brillante en las imágenes promediadas, pero oscura en la imagen de la varianza.

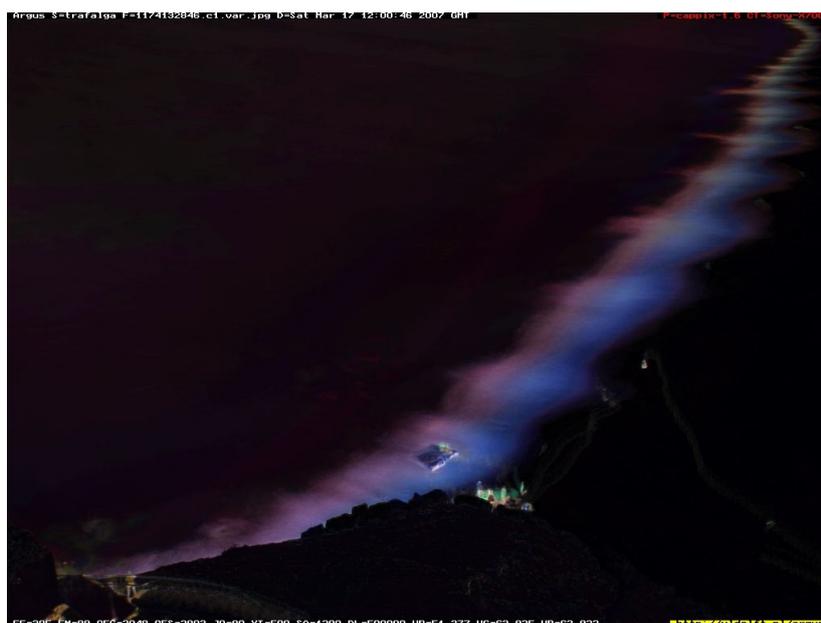


Figura 2.28: Imagen de varianza de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Imagen media diaria (daytime average image):** se obtienen tras el postproceso de las imágenes horarias promediadas de cada día para tener una imagen promediada de toda la jornada y caracterizar así la morfología predominante del día.



Figura 2.29: Imagen media diaria de la estación ARGUS tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

De entre todas las imágenes captadas por el sistema habrá que seleccionar aquellas que tengan interés en este estudio para que después mediante una restitución fotogramétrica, sean tratadas como se verá en el siguiente capítulo.

Metodología de trabajo

Para alcanzar los objetivos expuestos en el capítulo 1, se va a seguir una metodología que permita el estudio del comportamiento real bajo eventos moderados y extremos de estas dos playas. La metodología consta de tres pasos fundamentales: (1) selección de eventos extremos a estudiar; (2) propagación de los estados de mar que componen cada uno de los eventos seleccionados desde la ubicación de los puntos WANA hasta la costa; (3) análisis de las video imágenes de las estaciones de video monitorización costera correspondientes a los eventos seleccionados. A continuación se describe en detalle dicha metodología.

3.1. Hidrodinámica

En esta sección se estudiarán las características hidrodinámicas de las dos zonas de estudio, a partir del estudio de los datos facilitados por *Puertos del Estado* a través del sistema WANA. Como ya se ha dicho, se usarán la boya 2020013 para la playa de Carchuna y la número 1050545 para la de Trafalgar. A partir de estos datos se definirán los umbrales según el contenido energético del oleaje que ayudarán para poder realizar la selección de tormentas que servirá a su vez de base para elegir los estados de mar a propagar con los modelos numéricos correspondientes.

3.1.1. Definición de umbrales

Para conocer los eventos y consecuentemente los intervalos temporales y los correspondientes estados de mar que se van a estudiar, se deben fijar unos criterios de selección. Como se ha dicho, el objetivo de este trabajo se centra en estados de contenido energético extremo y los moderados asociados con ellos, aunque generalmente también se consideran las condiciones energéticas medias, mucho más frecuentes y duraderas en el tiempo, pero con menor capacidad modeladora.

Esta clasificación energética propuesta por (Ortega-Sánchez *et al.*,2003) se realiza según los efectos y la probabilidad de ocurrencia que el oleaje tiene sobre la costa, por lo que sus intervalos no son iguales para todo los tramos del litoral. En este caso se ha elegido la altura de ola significativa como factor de decisión a la hora de tipificar los distintos estados de mar que se han obtenido en el análisis de los datos WANA. Para determinar esos intervalos se han estudiado las evoluciones de la altura de ola significativa en el tiempo identificando los picos de H_s y observando posteriormente la evolución de esta variable antes y después de ese pico.

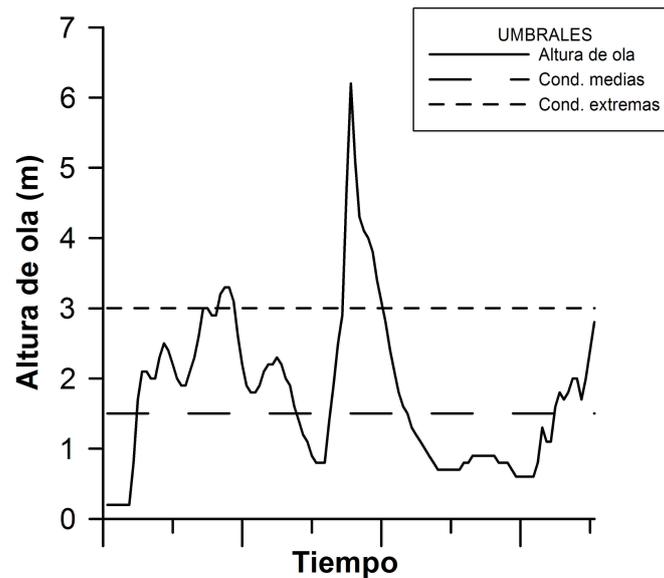


Figura 3.1: Umbrales de condiciones energéticas de oleaje para una tormenta ejemplo

Estos intervalos definidos por los umbrales expuestos en 3.1 están caracterizados por:

- **Condiciones energéticas medias:** estas condiciones son las de menor contenido energético y las que prevalecen a lo largo del año meteorológico, llegando a sumar más del 90% de los estados de mar registrados a lo largo de ese periodo. Su acción prácticamente no modela la costa a corto plazo.
- **Condiciones energéticas moderadas:** con un contenido energético intermedio, estas condiciones tienen mayor influencia que las anteriores a corto plazo en la morfología costera, por lo que tendrán una importancia mayor en lo que al tiempo de respuesta de la playa se refiere. Además, suelen concentrarse antes y después de cada tormenta, por lo que tendrán gran relevancia dentro del comportamiento morfodinámico del litoral, así como en el sistema de circulación costera, influyendo en el tiempo de respuesta y regeneración de la playa en estudio.
- **Condiciones energéticas extremas:** estas son las más severas, considerando tormenta a aquellos estados de mar en los que se supera el umbral de estas condiciones. Por tanto, serán las de mayor influencia e importancia a la hora de evaluar la evolución de la línea de costa y por tanto para este trabajo, ya que también son los eventos con menor tiempo de respuesta y con una mayor variación en la geometría en un corto plazo de tiempo tanto en forma en planta como en el perfil de playa.

3.1.2. Selección de tormentas

Una vez establecidos los umbrales a partir de los cuales se consideran condiciones energéticas extremas, ya pueden seleccionarse las tormentas a estudiar y que servirán de base para estimar los estados de mar a propagar y las imágenes a considerar.

El criterio para dicha selección se ha basado en la simultaneidad de las siguientes condiciones:

- Un valor umbral de la altura de ola significativa igual a 3m ($H_s \geq 3m$)
- Una duración mínima de la tormenta de 24 h
- Un intervalo entre dos tormentas consecutivas de 36 h

Estudiando todos los estados de mar que proporcionan los histogramas de H_s con datos cada 3 horas se observa cuál de ellos presenta una H_s mayor cumpliendo las condiciones anteriores. Esos estados de mar conforman el conjunto de oleaje de condiciones extremas de una tormenta, y dentro de él se seleccionará aquél que presente mayor altura de ola ya que será el de pico de la tormenta y consecuentemente uno de los elegidos

para la propagación y a partir del cual se estime los demás estados de mar a considerar y que conformarán la totalidad de la tormenta.

De esta forma, una vez conocido el momento más intenso de la tormenta, se han considerado también todos aquellos estados de mar que inciden en la costa antes y después del pico, en concreto una semana antes y una semana después, con el objeto de estudiar cuál es la evolución de la línea de costa antes durante y después de la tormenta. Así se podrá estudiar el tiempo de recuperación y respuesta natural de las playas en las dos zonas de estudio, observando cómo varía la configuración de la playa a lo largo de ese intervalo y las diferencias que existen entre la situación inicial y la final.

3.1.3. Selección de estados de mar

Conocidas las tormentas a estudiar y a partir de sus histogramas de H_s , altura de ola significativa, se van a seleccionar los estados de mar registrados por la boya WANA que van a ser propagados hasta la costa. Los elegidos para cada playa son:

- Los correspondientes a la altura de ola máxima registrada en el boya, que aproximadamente corresponderán con los de H_s máxima en la playa, y con los que se han construido los intervalos temporales tomando una semana anterior y posterior a los mismos.
- Aquellos estados de mar que no siendo los de H_s máxima constituyen picos dentro de las jornadas adyacentes y que pertenezcan a condiciones energéticas moderadas o extremas. Se han elegido estos de tal forma que representen una dirección o un periodo de paso por cero característicos, es decir, escogiendo un pico de entre los que provengan de una dirección concreta o posean un periodo concreto.

De esta forma dentro de cada tormenta se pueden encontrar con varios estados de mar a propagar seleccionados. De cada uno de ellos se han recogido los datos necesarios para ser introducidos en los modelos numéricos:

- Altura de ola significativa espectral (H_s)
- Periodo de pico espectral (T_p)
- Dirección del periodo de pico (DirM)
- Velocidad media del viento (VelV)
- Dirección media de procedencia del viento (DirV)

3.2. Propagación de estados de mar

Una vez seleccionadas las tormentas que se van a estudiar, el siguiente paso consiste en caracterizar todos los estados de mar recogidos por la boya WANA para las tormentas seleccionadas en unos cuantos estados de mar característicos de la tormenta, consiguiendo así un conjunto de datos suficientemente representativo pero manejable. Además, no se debe olvidar que las medidas con las que se está trabajando fueron tomadas por instrumentos situados a kilómetros de la costa, con lo que a partir de ellos no se podrán obtener datos fiables sobre parámetros que posteriormente tengan que calcularse en la costa. Esto es debido a los procesos físicos asociados a la propagación del oleaje como asomeramiento, rotura del oleaje, refracción o reflexión, y que modifican las características del oleaje incidente en la costa desde profundidades indefinidas hasta la línea de costa. De esta forma, se estudian los estados de mar obtenidos de las boyas en profundidades indefinidas para elegir después aquellos que finalmente serán propagados hasta la costa.

Para ello, una vez seleccionados los estados de mar representativos, se utilizarán dos modelos de propagación de oleaje, SWAN y Ref-Dif, que nos permitirán conocer cuáles son los valores de las magnitudes de estos (H_s , T_p , dirección de incidencia) en puntos muy cercanos a la costa. Se definirán por tanto una serie de puntos de control representativos de la playa y que la cubran en toda su longitud, en los que se obtendrán como salida de los modelos los datos necesarios, y a partir de estos valores se obtendrán los parámetros necesarios que permitirán conocer el comportamiento morfodinámico de la costa.

3.2.1. Propagación: modelos numéricos

La propagación de los estados de mar seleccionados se ha llevado a cabo mediante dos modelos numéricos distintos, SWAN y Ref-Dif. En el siguiente capítulo (4.1) se hace una pequeña introducción a su funcionamiento y limitaciones, así como una descripción de la modelización que se ha definido para cada zona de estudio.

3.3. Evolución de la morfología

Para el estudio de la evolución morfológica de las zonas de estudio es necesaria la obtención de datos *in situ* tomados con la suficiente frecuencia como para apreciar los cambios existentes en la playa. Para ello, como ya se ha explicado anteriormente, se usarán video imágenes procedentes de estaciones de monitorización ARGUS situadas en el Cabo Sacratif para la playa de Carchuna y en el Cabo Trafalgar para la playa de Trafalgar. Además se obtendrán ciertos parámetros adimensionales que servirán para evaluar la fiabilidad de los modelos de propagación de oleaje y estudiar así la representatividad del estudio.

3.3.1. Criterios de selección de video imágenes

Dada la gran cantidad de imágenes disponibles es necesaria la selección de las mismas, para obtener un número de capturas manejable y que sea representativo del comportamiento de la playa. Por ello, una vez seleccionadas las tormentas y por tanto escogidos los periodos a estudiar correspondientes a una semana antes y otra después del evento más energético, se seleccionarán las imágenes diarias (1 ó 2) según las características de la playa.

El siguiente problema radica en minimizar el efecto de las mareas en la observación y estudio de estas imágenes. Este efecto puede confundir al observador ya que la línea de costa puede aparecer con varios metros de diferencia tierra adentro bajo oleajes con el mismo contenido energético. Por tanto, dentro de las imágenes habrá que considerar dos efectos:

- El efecto del oleaje, que provoca un cambio irregular en la morfología de la playa y que varía aleatoriamente en el tiempo, estando asociado a variaciones en la altura de ola provocadas por la presencia de centros de bajas presiones. Este es el objeto del presente estudio y por lo tanto habrá que aislarlo.
- El efecto de la marea, mucho más acusado en la Playa de Trafalgar ya que se encuentra bañada por el Océano Atlántico y tiene características mesomareales. En este caso la línea de costa varía más regularmente sin que esos cambios vayan asociados a variaciones en las condiciones energéticas del oleaje. Este efecto no es objeto de nuestro estudio.

Por tanto, para una correcta selección de las imágenes se deberá elegir aproximadamente un mismo nivel de marea para establecer a partir de él comparaciones en la morfología de la playa teniendo sólo en cuenta variaciones en la altura de ola entre las fotografías. Así, se han elegido para cada día de las tormentas elegidas las imágenes instantáneas, promediadas y de varianza correspondiente a la hora con luz solar de marea más baja en ambas playas. Asimismo, para la playa de Trafalgar se han escogido también las de marea más alta, ya que las principales variaciones en esta playa aparecen en su perfil y no en su forma en planta. Estudiando imágenes en marea baja y alta de cada jornada dentro de la tormenta, se podrá observar con mayor claridad variaciones en la pendiente y en las morfologías que como veremos posteriormente aparecen en esta playa (figura 3.2).

También hay que considerar que en la playa de Trafalgar existen tres cámaras que obtienen imágenes de zonas distintas de la playa, que coinciden con las descritas en 2.16. Al solaparse en las imágenes las cámaras que cubren la zona C2 con las contiguas, se ha decidido obtener para cada hora seleccionada de marea baja y alta las imágenes de C1 y C3, con lo que todo el frente de la playa queda cubierto para su estudio.

Para poder tener una mayor fiabilidad en cuanto a la representatividad de las imágenes escogidas se va a recurrir al apoyo de un software de predicción de mareas, ya que con la mera observación de las fotografías y dado que los efectos de oleaje y marea se superponen, es complicado obtener las imágenes representativas de los eventos. El programa elegido ha sido el *XTide* de libre distribución.

Así, para la selección de imágenes se han comparado las observaciones de las mismas con los resultados de las predicciones del modelo para obtener así las imágenes de marea baja y alta requeridas. Para el estudio de la

variación en la morfología de la playa se han escogido, de entre los cuatro tipos de imágenes que proporcionan las estaciones de video monitorización, las de imagen promediada, ya que eliminan algunos efectos puntuales que podrían contaminar las observaciones, como la subida en la altura de ola por el paso de alguna embarcación, etc. y que podrían confundir el estudio.



Figura 3.2: Imagen de la playa de Trafalgar en marea baja (izquierda) y alta (derecha) en la misma jornada para la cámara C1. Pueden apreciarse las diferencias entre la línea de costa. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

Una vez seleccionadas todas las imágenes a estudiar, se procederá a comparar la evolución de la playa con el paso de las tormentas, y cómo estas cambian su morfología. Para ello se establecerá una línea de costa inicial en condiciones energéticas medias que se representará en todas las restantes imágenes para evaluar así de forma objetiva la evolución de la forma de la zona de estudio en cuestión. Para que este estudio tenga validez, se buscará para cada tormenta que las imágenes del primer y último día sean de jornadas con las condiciones medias ya señaladas. De esta forma se podrá estudiar un ciclo completo de tormenta desde el estado inicial antes de la incidencia de oleaje con contenido energético alto hasta el estado final una vez que este ya ha pasado. Así podrá evaluarse en tiempo de respuesta y de regeneración de la playa con el paso de las tormentas para una correcta definición de la línea de costa. Esto requerirá en algunos casos escoger imágenes de días anteriores o posteriores a los pertenecientes al intervalo de dos semanas definido anteriormente, ya que en algunos casos el primer o el último día de esos intervalos no correspondía con jornadas de oleaje medio.

Con todas las imágenes ya seleccionadas, puede llevarse a cabo una de las posibilidades más útiles que ofrece la técnica de las video imágenes, que consiste en proceder a la restitución de la imagen (usando principios de fotogrametría), gracias a lo cual se pueden obtener medidas del ancho de la playa, tamaño, localización y evolución de formas costeras (barras...). Éstas medidas son ya datos reales sobre las dimensiones de los elementos de la playa. Para llevar a cabo este proceso es necesaria la composición de las imágenes (figura 3.3) y su posterior restitución mediante programas informáticos para obtener la imagen definitiva (figura 3.4).



Figura 3.3: Composición de imágenes de las tres cámaras disponibles en Trafalgar para su posterior restitución. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

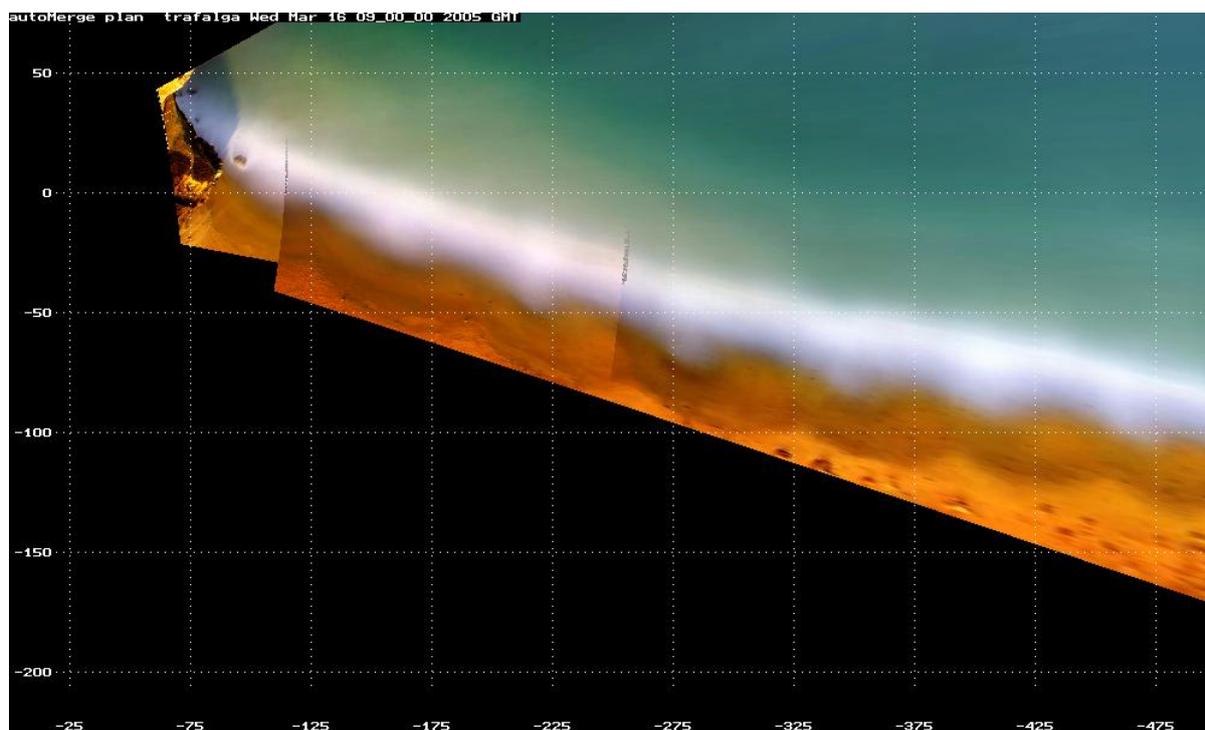


Figura 3.4: Imagen rectificada de la playa de Trafalgar, en la que se aprecia su forma en planta y sus dimensiones reales. [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

3.3.2. Obtención de parámetros adimensionales

Para poder llevar a cabo un control sobre los resultados obtenidos en la propagación y estudiar de forma más detallada el sistema circulatorio en la costa, responsable de la morfodinámica de las zonas de estudio, van a obtenerse una serie de parámetros adimensionales en puntos de control previamente elegidos. De esta manera podrá estudiarse en qué zonas se produce concentración de energía (y por tanto de altura de ola) y en cuales no, lo que estará íntimamente relacionado con los procesos de erosión y sedimentación de las zonas de estudio y que será los responsables de los cambio en planta y perfil en la morfología de las playas.

Los parámetros a calcular serán cuatro, que cuantificarán la erosión y la posterior recuperación de la playa como función de la magnitud de la tormenta, la distribución del sedimento y la batimetría de la playa. A continuación se hace una breve descripción de estos parámetros:

3.3.2.1. Velocidad de caída adimensional

Este parámetro se define como:

$$N_0 = \frac{H}{\omega_s T}$$

con:

$$\omega_s = \frac{\mu}{\rho D} \left[\sqrt{(10,36^2 + 1,049 D_*^3)} - 10,36 \right]$$

y:

$$D_* = D_{50} \left[\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

representando ω_s la velocidad de caída del sedimento calculada según (Soulby, 1997), siendo D_* el diámetro adimensional de las partículas, μ la viscosidad del agua, $D = D_{50}$ el diámetro medio de las partículas, g la aceleración de la gravedad, ν la viscosidad cinemática y ρ_s, ρ_w las densidades de las partículas y del agua respectivamente. Este número, también conocido como número de Dean, está relacionado con el tiempo durante el cual una partícula se mantiene suspendida en una columna de agua y sometida, por tanto, a las corrientes orbitales onshore y offshore. También se puede relacionar con el peralte de la ola. Asimismo, puede usarse este valor para evaluar la posible erosión en una playa. Para ello se han establecido una serie de límites para los que se definen diferentes estados erosivos:

- $N_0 < 2,4$ Es muy posible tener acreción
- $N_0 < 3,2$ Es posible tener acreción
- $N_0 \geq 3,2$ Es posible tener erosión
- $N_0 > 4$ Es muy posible tener erosión

3.3.2.2. Peralte de la ola

Se define como:

$$\frac{H}{L}$$

siendo L la longitud de la onda y H la altura de ola. Para el caso de profundidades indefinidas, este peralte se relaciona con los parámetros de las pendientes del lecho mediante la ecuación de Sunamura y Horikawa (1974) de la siguiente manera:

$$\frac{H_0}{L_0} = C (\tan \beta')^{-0,27} \left(\frac{D}{L_0} \right)^{0,67}$$

donde $C = 18$ es una constante empírica, $\tan \beta'$ es la pendiente media de la playa a 20 metros de profundidad, H_0 y L_0 la altura de ola y la longitud de onda en profundidades indefinidas y D el diámetro de las partículas.

3.3.2.3. Número de Iribarren

Se define como:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

Este parámetro considera la interacción entre altura de ola (H), longitud de onda en profundidades indefinidas (L_0) y pendiente de la playa en el punto en el que se calcula ($\tan \beta$). El número de Iribarren define el tipo de rotura que tendrá lugar (si se produce) al interactuar un oleaje con un talud, indicando la forma en la que se disipará la energía sobre éste y por tanto dando una respuesta hidráulica distinta para cada tipo de rotura. Con este parámetro, puede calcularse qué tipo de rotura de la ola tendrá lugar en la costa. Existen cuatro tipos de rotura fundamentales:

- Rotura en decrestamiento ($I_r \in (0, 0,5)$), en la que se produce un peraltamiento progresivo en la ola sin que haya una deformación excesiva. Pueden romper varias olas a la vez.
- En voluta o *plunging* ($I_r \in (0,5, 2,5)$), en la que hay peralte y deformación por igual.
- En colapso o *collapsing* ($I_r \in (2,5, 3,5)$). En esta rotura hay muy poco peralte y mucha deformación, rompiendo sólo una ola a la vez.
- Oscilación o *surging* ($I_r > 3,5$), en la que sólo hay deformación, no hay rotura y se disipa la energía con la subida y bajada sobre taludes muy pronunciados, ya que $\tan \beta$ alcanza un valor muy alto.

En playas sin acantilados ni obras marítimas, sólo se dan los dos primeros tipos de rotura.

3.3.2.4. Coeficiente de propagación

Éste parámetro se define como:

$$\frac{H_{cp}}{H_0}$$

siendo H_{cp} la altura de ola en el punto de control correspondiente y H_0 la altura de ola en profundidades indefinidas obtenida de la red WANA. Este parámetro indica las zonas en las que se produce concentración de energía, es decir, zonas en las que el oleaje incide con mayores alturas de ola y concentraciones debidas a los procesos de transformación de las ondas en su propagación (asomeramiento, refracción, difracción, etc.)

Con estos parámetros se obtendrán datos que ayudarán a establecer el comportamiento morfodinámico de cada una de las playas, permitiendo a la vez poder comparar los resultados obtenidos con cada uno de los modelos de propagación pudiendo discernir cuál de ellos tiene mayor validez.

Los puntos de control han sido elegidos de manera que estén situados tan cerca de la línea de costa como sea posible sin que se haya producido aún la rotura del oleaje, fenómeno que habrá que evitar para que no desvirtue los datos obtenidos. Teniendo en cuenta que el índice de rotura en profundidades reducidas para rotura en decrestamiento es aproximadamente:

$$\gamma = \frac{H}{h} \simeq 0,88$$

siendo h la profundidad en el momento de la rotura.

Estos puntos de control estarán situados en ambas playas en toda su longitud a una profundidad de cerca de 5 metros, teniendo en cuenta las alturas de ola máximas que se han registrado. En el caso de Carchuna, se han elegido 11 puntos de control, numerados de oeste a este, con la siguiente disposición:

Punto de control	X (m)	Y (m)
PC1	459100	4061280
PC2	459180	4061300
PC3	459240	4061300
PC4	459320	4061340
PC5	459380	4061340
PC6	459440	4061320
PC7	459500	4061280
PC8	459560	4061260
PC9	459650	4061230
PC10	459720	4061200
PC11	459756	4061230

Cuadro 3.1: Coordenadas UTM de los puntos de control en Carchuna

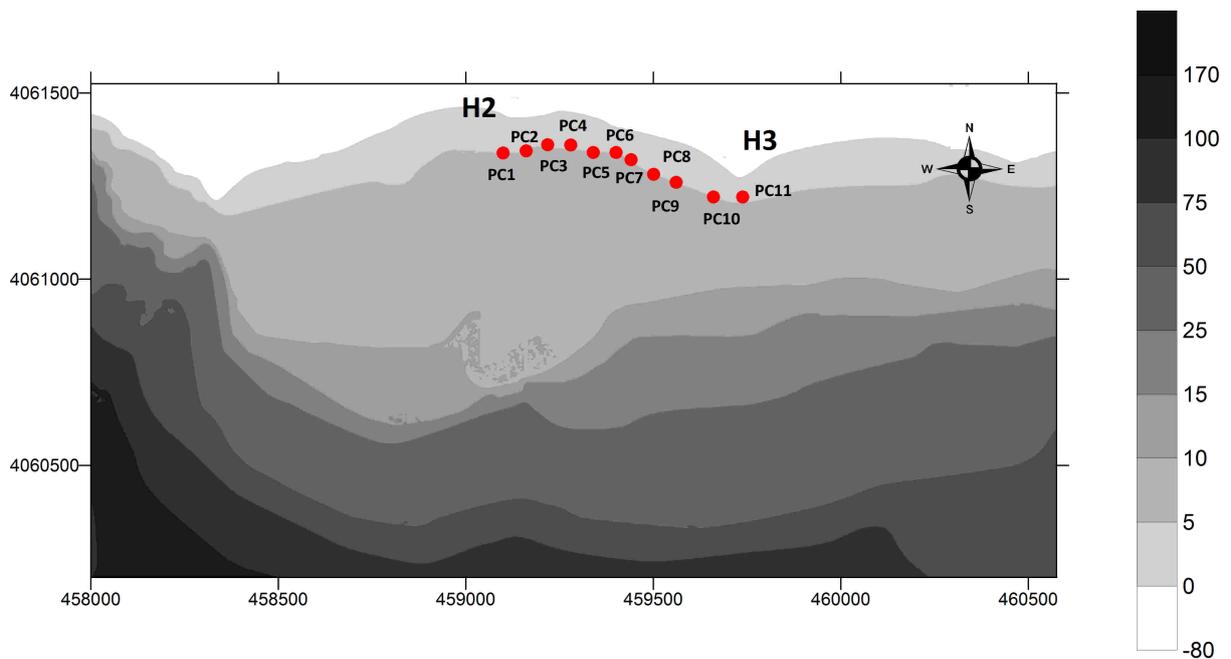


Figura 3.5: Representación batimétrica de los puntos de control para la playa de Carchuna

Con estos puntos se consigue cubrir toda la longitud de la playa, obteniendo los parámetros adimensionales necesarios a lo largo de toda la línea de costa y haciendo un control sobre los resultados de la propagación. Esto mismo se consigue con los siguientes 11 puntos de control definidos para la playa de Trafalgar, numerados de norte a sur:

Punto de control	X (m)	Y (m)
PC1	764150	4010750
PC2	764400	4010400
PC3	764600	4010200
PC4	764800	4010000
PC5	765000	4009800
PC6	765200	4009600
PC7	765400	4009400
PC8	765600	4009200
PC9	765800	4009000
PC10	766000	4008800
PC11	766200	4008400

Cuadro 3.2: Coordenadas UTM de los puntos de control en la playa de Trafalgar

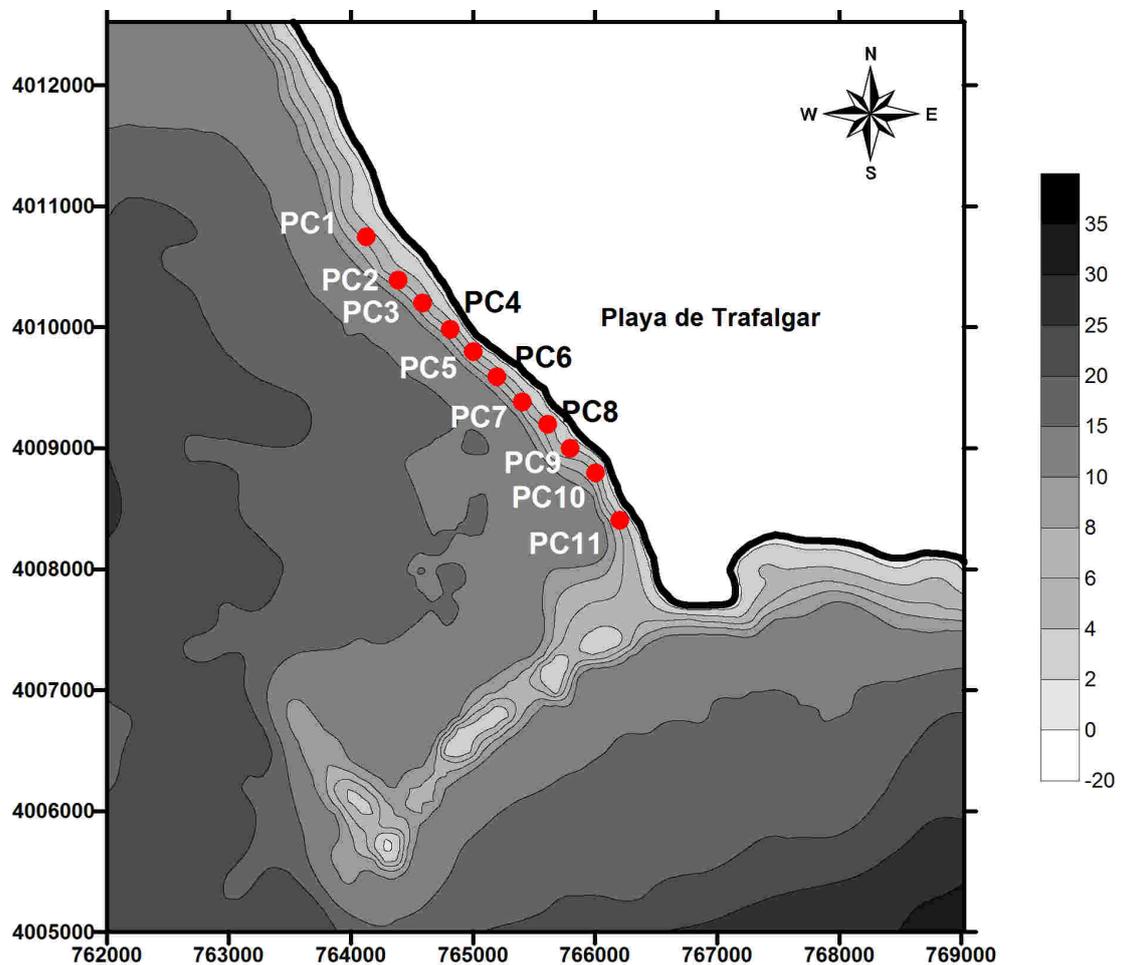


Figura 3.6: Representación batimétrica de los puntos de control para la playa de Trafalgar

Para cada uno de estos puntos de control se han obtenido en ambos modelos las siguientes magnitudes para cada estado de mar propagado:

- Altura de ola (m)
- Dirección media del oleaje ($^{\circ}$)
- Longitud de la onda (m)

- Profundidad (m)

Con estos datos se podrán calcular todos los parámetros adimensionales descritos. Asimismo se han obtenido las pendientes de la playa a unos 5 metros de profundidad mediante la realización de perfiles de la batimetría perpendiculares a la línea de costa en las dos playas, obteniéndose unos valores medios de $\tan \beta = 0,12$ para Carchuna y $\tan \beta = 0,022$ para Trafalgar (ver figuras 3.7 y 3.8).

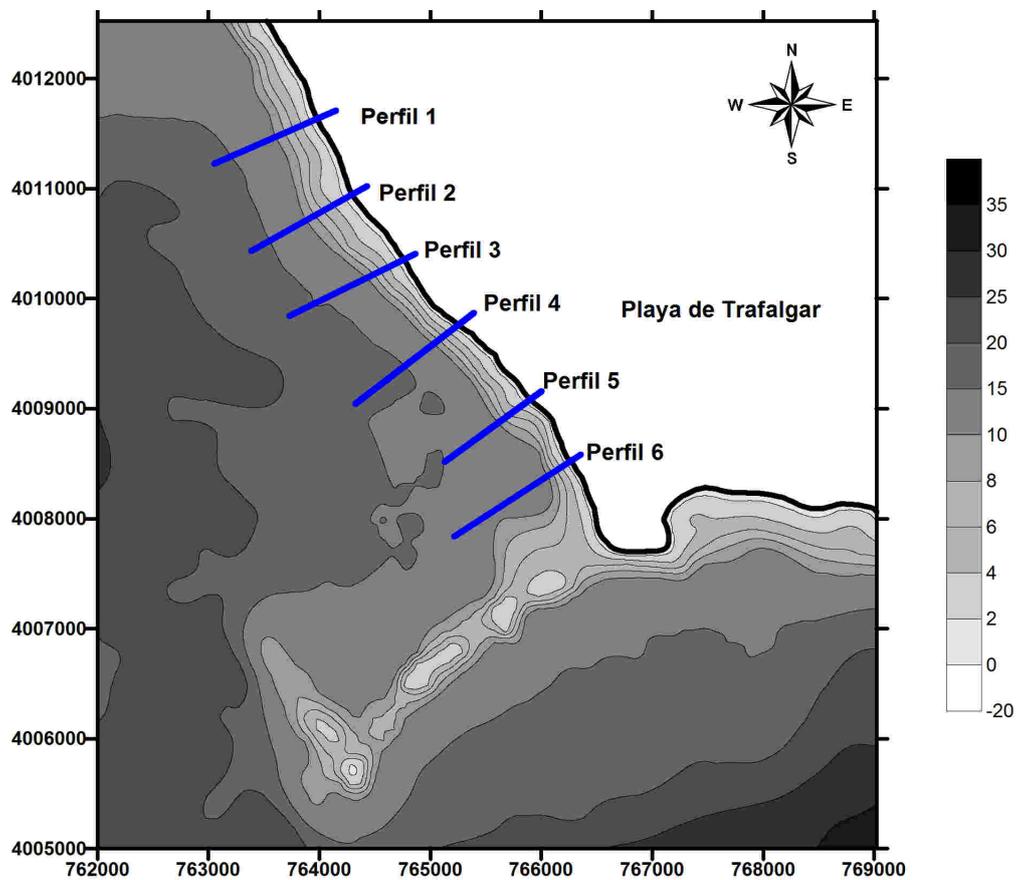


Figura 3.7: Ejemplo de perfiles realizados en la playa de Trafalgar para la obtención de la pendiente requerida sobre la batimetría de la zona

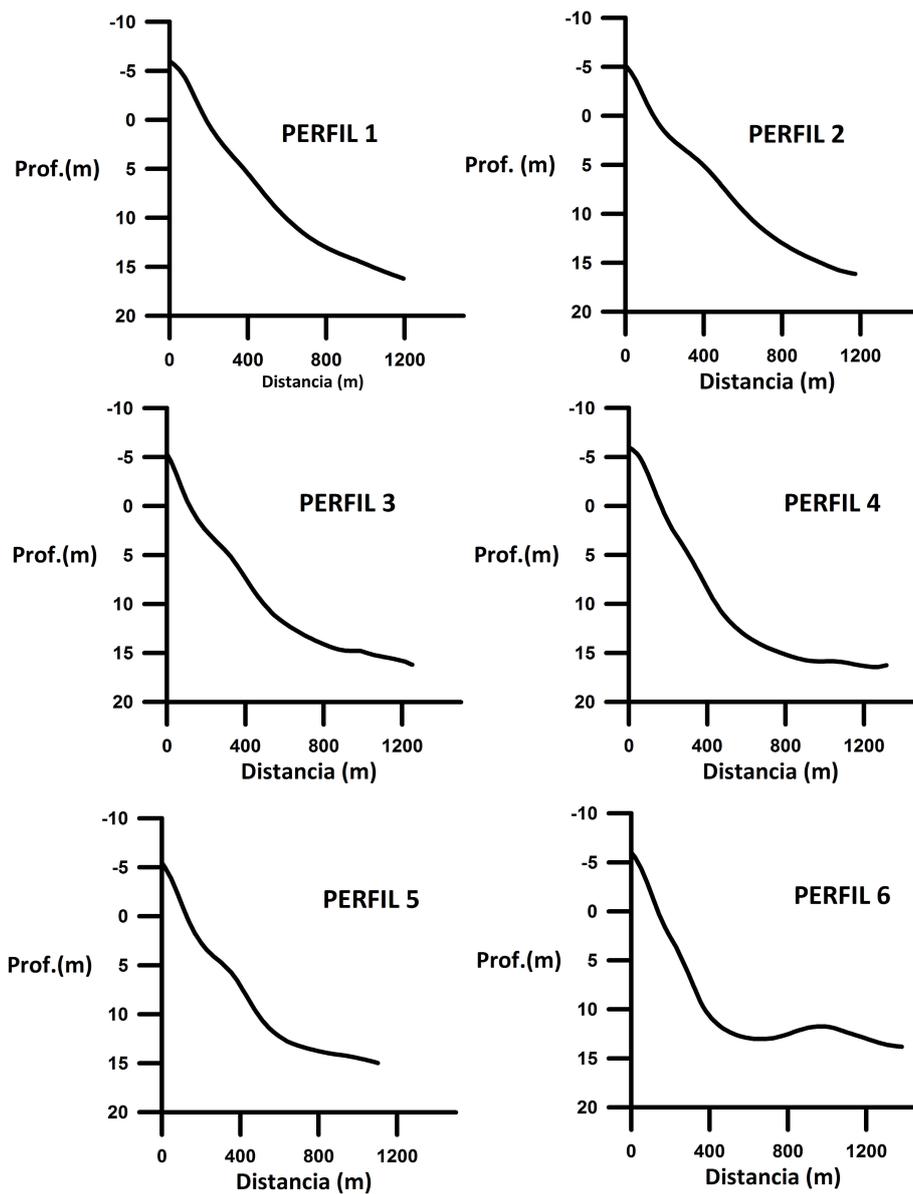


Figura 3.8: Representación en ejes coordenados (distancia a la costa en horizontal y profundidad en vertical) de los perfiles realizados en Trafalgar (figura 3.7)

La metodología adoptada, puede resumirse en el esquema de la figura 3.9

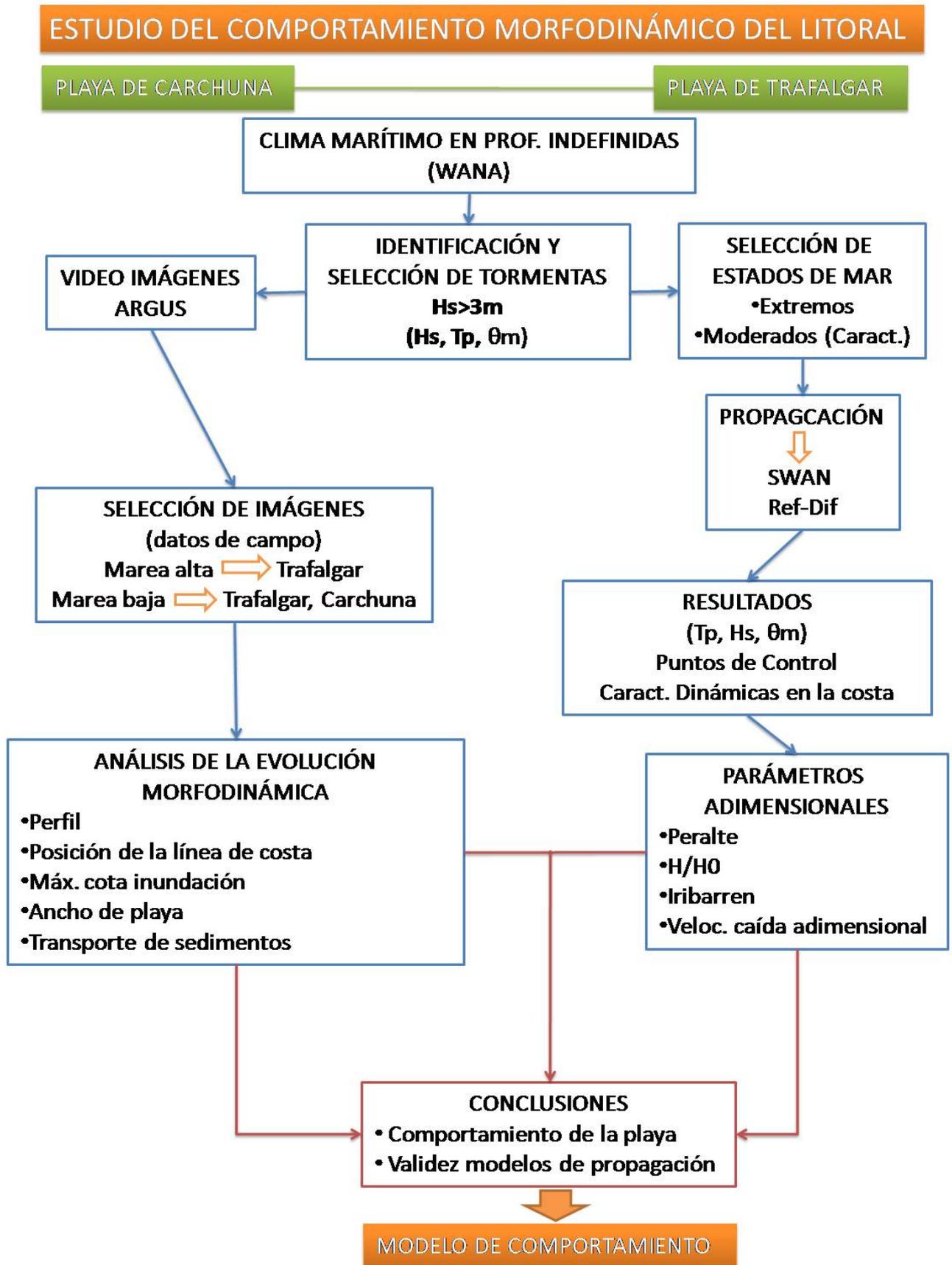


Figura 3.9: Esquema de la metodología descrita con la que se pretende alcanzar un modelo de predicción de la respuesta de las zonas de estudio

Modelos de propagación de oleaje en las zonas de estudio

En este capítulo se hará una breve introducción teórica de los dos modelos numéricos de propagación de oleaje que se han usado para conocer las condiciones y características del oleaje incidente en las dos zonas de estudio a partir de los datos de la red WANA en profundidades indefinidas. Asimismo se realizará una descripción de la modelización numérica de las dos playas que se ha definido, así como de los datos de entrada y la batimetría usada. En el caso de Carchuna, además, se hará una calibración de ambos modelos buscando cuál de los ellos simula más fielmente el comportamiento real del oleaje. Para ello se tomarán los datos provenientes de una campaña de campo realizada en esta playa por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

4.1. Modelos de propagación

Los datos del sistema WANA de Puertos del Estado (Ministerio de Fomento) descritos en el capítulo anterior, se proporcionan a una profundidad de unos 50 metros de profundidad y a una distancia considerable de la costa. Por tanto, y debido a los fenómenos de transformación que experimentan las ondas en su propagación hacia la costa, esos datos no coinciden con el oleaje que realmente incide en las dos zonas de estudio. Para conocer realmente cuáles son los valores de las magnitudes necesarias en cuanto a oleaje se refiere en la costa y que servirán de base para el cálculo de los parámetros adimensionales (altura de ola, periodo de pico, etc.), es necesaria la propagación de los datos WANA a través de modelos numéricos, que sirviéndose de una batimetría de la zona simulen los procesos físicos ocurren en la situación real. En este caso se han elegido dos modelos, con el fin de poder comparar los resultados entre ambos y poder elegir el que presente un mejor ajuste a las condiciones reales.

4.1.1. Modelo SWAN

El modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*)[Booij, 1981], es un modelo espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta las zonas costeras, teniendo en cuenta cambios de altura, forma y dirección de la ola como resultado de la acción del viento, rotura de ola, transferencia de energía entre componentes y variaciones de la profundidad del fondo así como la aparición de corrientes.

Está basado en los llamados modelos de tercera generación, para la propagación de oleaje en aguas profundas y a su vez, dichos modelos, están basados en la ecuación de balance de energía. Estos modelos no pueden ser aplicados a zonas costeras con unas escalas de longitud (resolución espacial) menores de 20-30 km y profundidades menores de 20-30 m.

El modelo SWAN se desarrolló con el objetivo de mejorar dichos modelos mediante:

- Uso de esquemas implícitos, incondicionalmente estables
- Modelado de rotura inducida por la profundidad e interacción onda-onda

Con estas mejoras el modelo es aplicable en situaciones reales (escalas 20-30km y profundidades 20-30m).

En cuanto a los datos de entrada, teniendo en cuenta que este modelo considera la acción del viento, habrá que introducir todos los reseñados en el apartado anterior. Además es necesario introducir un archivo con la batimetría de la zona de estudio que comprenda a las mallas definidas. Este archivo deberá tener formato grid en código ASCII, en el que para cada punto de la red rectangular que la compone se indica el valor de la profundidad.

Este modelo utiliza una serie de mallas que se colocan anidadas y en cuyos nudos se calculará las variables del oleaje. Los datos de entrada se introducirán en los contornos adecuados de la malla mayor, que deberá por tanto coincidir aproximadamente con la situación del punto WANA, origen de los datos para la propagación. Para las siguientes que se coloquen anidadas tomará los datos procedentes de la primera propagación en un lado, habiendo creado previamente un espectro de datos coincidente con ese lado de la malla menor. Por tanto, los datos de partida sólo tienen que ser introducidos una vez. Para más información ver apéndice B.1.

4.1.2. Modelo Ref-dif

El modelo Ref-Dif es otro modelo numérico de propagación de oleaje que resuelve el problema de la propagación de distintos estados de mar monocromáticos o espectrales a través de una batimetría irregular y con la presencia de obstáculos ya sean naturales o construidos por el hombre. Este modelo tiene en cuenta los procesos principales que experimentan las ondas en su propagación como asomeramiento, refracción, disipación de energía y difracción. Para tener en cuenta este último proceso es necesario el uso de un modelo de diferencias finitas, ya que los que anteriormente se desarrollaron basados en la teoría de rayos no ofrecían resultados fiables cuando la difracción dominaba en la zona de estudio.

Para su uso se ha utilizado el programa SMC (Sistema de Modelado Costero) desarrollado en la Universidad de Cantabria. Dentro de este se ha usado el módulo Oluca-MC para la propagación de oleaje monocromático y el Oluca-SP para el espectral. Las principales limitaciones de este modelo son:

- Las pendientes del fondo deben ser menores que 1:3, para garantizar la condición de pendiente suave.
- El ángulo de propagación en la primera fila ($x = 0$) de la malla, debe estar dentro del rango ± 45 grados, con respecto al eje de propagación principal (eje x).
- Para obtener buenos resultados en la malla de detalle, en este eje la equidistancia entre nodos no debe ser superior a $L/8$, siendo L la longitud de la onda de los estados a propagar.
- Se debe tener especial cuidado para que la zona de estudio no se encuentre dentro de ángulos de propagación mayores a ± 45 grados con respecto al eje x , dado que los errores comienzan a ser importantes para estos ángulos. Por ello se debe orientar en lo posible, el eje x de la malla en la dirección principal de propagación del oleaje.
- El modelo ha sido diseñado principalmente para ser aplicado en zonas costeras y playas, donde los fenómenos de propagación dominantes son la refracción, asomeramiento, difracción y rotura en playas. No es aplicable en casos donde la reflexión es un fenómeno importante, como es el caso de resonancia y agitación en puertos.

Este modelo trabaja con mallas encadenadas, al contrario que el modelo SWAN que lo hace con mallas anidadas. Esto quiere decir que la malla de detalle se coloca a partir del lado opuesto al de entrada de datos de la malla exterior, con lo que los puntos en común sólo se encuentran en la fila última de esta malla y la primera de la siguiente. Es en estos puntos donde la malla encadenada toma los datos de partida de la propagación de la anterior, teniendo de nuevo que introducir los datos sólo una vez. Es importante tener cierta sensibilidad con la batimetría de la zona de estudio para elegir la posición idónea de estas mallas, tratando de tener especial cuidado en zonas irregulares como cañones u otros obstáculos. Para más información ver apéndice B.2

4.2. Playa de Carchuna: calibración de modelos

Para la aplicación de los modelos en la playa de Carchuna se ha desarrollado diferentes modelizaciones numéricas, ya que por las características y limitaciones de cada modelo es necesario un planteamiento distinto para cada uno de ellos. A continuación se describen las diferentes modelizaciones y la campaña de campo

realizada, con la consecuente comparación entre las simulaciones y los datos recogidos por los aparatos de medida.

4.2.1. Modelo SWAN

Para la implantación de este modelo en la playa de Carchuna, se ha definido un sistema de tres mallas anidadas, disminuyendo la distancia entre nodos en la malla de detalle para aumentar así la resolución.

Las mallas que se han usado para los cálculos se muestran a continuación, teniendo en cuenta que las coordenadas son UTM y que las unidades expresadas son metros (m).

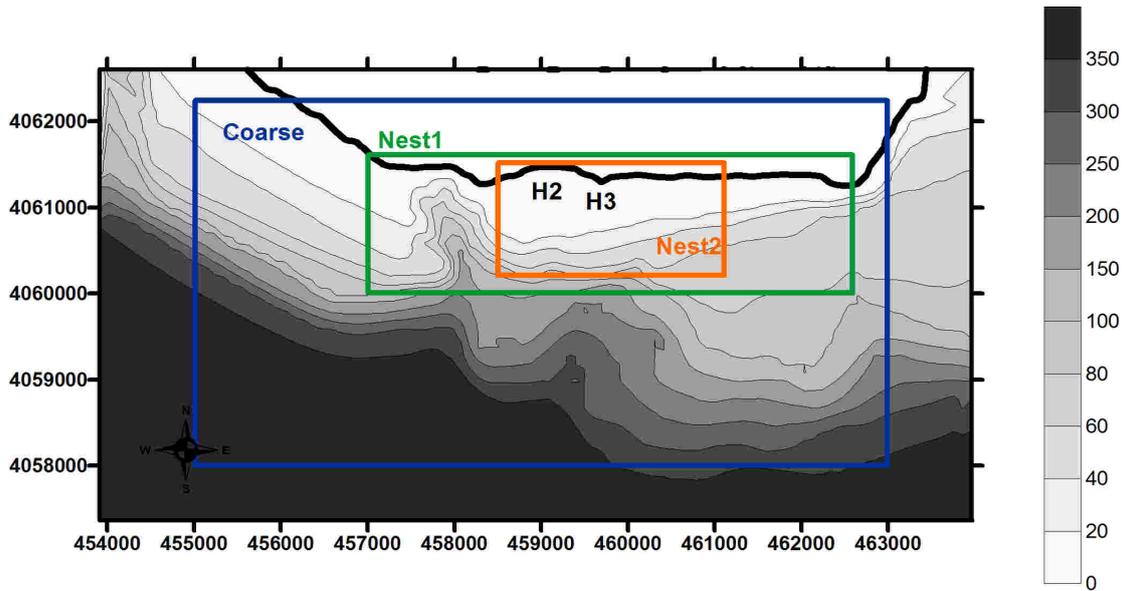


Figura 4.1: Representación de las mallas definidas para el modelo SWAN en la playa de Carchuna, donde se especifica la zona de estudio

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
Coarse	455000	50	160	4057682	50	86	0
Nest1	457000	112	50	4060000	32	50	0
Nest2	458500	104	25	4060200	52	25	0

Cuadro 4.1: Características geométricas de las mallas SWAN definidas para Carchuna. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x.

4.2.2. Modelo Ref-dif

Teniendo en cuenta las limitaciones de este modelo y las características del oleaje incidente, se han definido dos sistemas de mallas. Los aspectos más limitantes son la dirección de incidencia del oleaje y la longitud de onda de este.

La dirección de incidencia del oleaje no puede presentar un ángulo superior a 45 grados con respecto al eje X de la malla. Dado que existen dos direcciones principales de incidencia en la playa de Carchuna que difieren aproximadamente en 90 grados, se ha definido una malla para cada una de estas direcciones. Así, una de ellas presenta una alineación noreste-suroeste mientras que la otra tiene una alineación noroeste-sureste. Las mallas de detalle que se han colocado tienen la misma dirección que la correspondiente malla principal.

En cuanto a la longitud de onda, es muy importante respetar la distancia máxima entre nudos de $\frac{L}{8}$, por lo que esta medida no debe superar los 25 metros aproximadamente.

Con todas estas observaciones, se han definido las siguientes mallas en la playa de Carchuna:

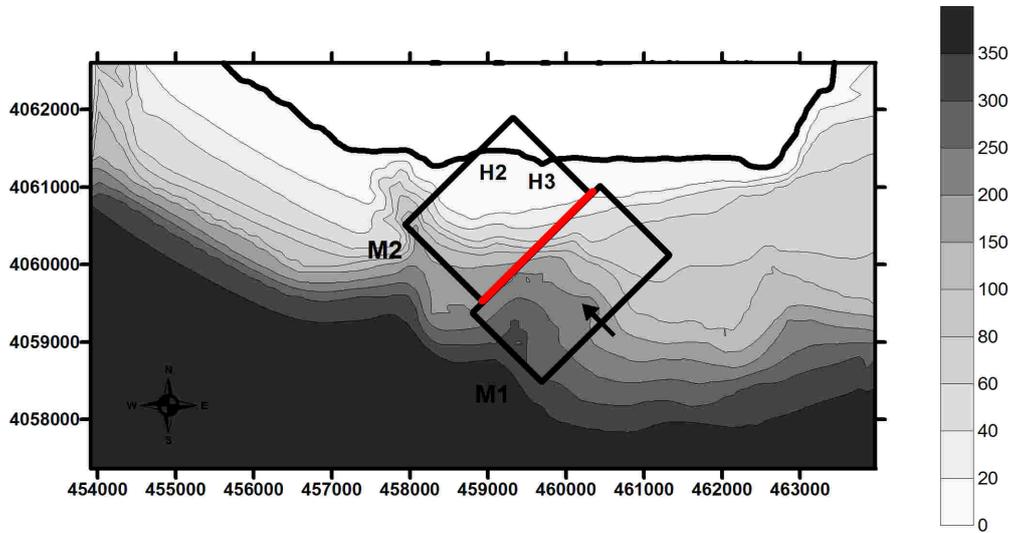


Figura 4.2: Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Carchuna para el oleaje que incide con dirección este

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
M1	462294	76	20	4060292	138	20	135
M2	461233	247	5	4061352	247	10	135

Cuadro 4.2: Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Carchuna para oleaje incidente del este. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x

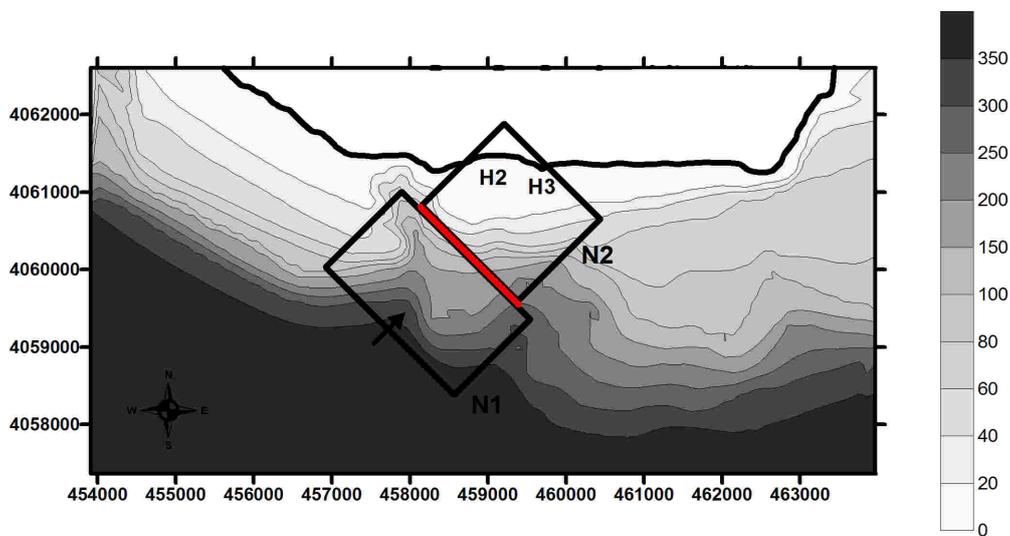


Figura 4.3: Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Carchuna para el oleaje que incide con dirección oeste

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
N1	458818	84	20	4058310	123	20	225
N2	459696	203	8	4059783	203	10	225

Cuadro 4.3: Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Carchuna para oleaje incidente del oeste. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x

4.2.3. Campaña de campo

Para poder decidir cuál de los dos modelos de propagación responde mejor a las condiciones reales, se realizó una campaña de campo para medir los parámetros del oleaje cerca de la costa. Los resultados obtenidos con los modelos se compararán con los datos de campo para validar y calibrar su funcionamiento.

Entre los días 7 y 14 de marzo el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada llevó a cabo una campaña de campo en la playa de Carchuna. El estudio se centró en la bahía de aproximadamente 750 metros de longitud situada entre los salientes H3 y H4, que avanzan unos 100 metros hacia el agua desde la alineación media de la playa. En esta zona la pendiente de la batimetría se mantiene relativamente constante en el centro, mientras que aumenta al acercarnos a H3 y H4.

El objetivo de esta campaña fue hacer un estudio de la hidrodinámica de esta zona de la costa. Para ello fueron instalados distintos aparatos de medida para obtener datos de viento, oleaje y corrientes, así como la interacción entre todos ellos (figura 4.4). Estos instrumentos fueron:

- Dos sensores acústicos de oleaje y corrientes (AWAC) de la marca Nortek, con sensores de temperatura, inclinación y presión (AW1 y AW2). Uno de ellos fue situado a unos 350 metros de la costa sobre un trípode metálico a unos 55 centímetros del lecho (AW1). La profundidad en esta posición alcanza los 8 metros. Este sensor fue programado para tomar 1024 medidas cada hora de la elevación de la superficie, presión y velocidad orbital con una frecuencia de 1Hz. El resto del tiempo de cada hora se obtenían perfiles de las corrientes existentes, en intervalos medios de 55 segundos. El otro sensor AW2 fue colocado de la misma manera en la posición central de una línea imaginaria paralela a la costa trazada a unos 150 metros de ella y a una profundidad de 5 metros. En esta línea se colocaron más aparatos con una separación de 170 metros.
- Dos sensores acústicos doppler para la obtención de las corrientes (ADCP), montados sobre trípodos metálicos a unos 50 centímetros del lecho marino, y que fueron situados en los extremos de la línea imaginaria.
- Dos velocímetros acústicos doppler (VECTOR) con sensores de presión incluidos (V1 y V2) que medían las tres componentes de las corrientes existentes. El instrumento V2 recogía las medidas de presión y corriente longitudinal y transversal de la playa con una frecuencia de 16Hz durante 1024 segundos cada hora, mientras que V1 lo hizo con una frecuencia de 1Hz.
- Cuatro estaciones barométricas y de viento (E1-E4) fueron situadas a lo largo de la playa en el entorno de H3 separadas unos cien metros y a una altura de entre 2 y 0.5 metros. Estas estaciones incluían un barómetro Setra CS100 y un anemómetro Grill 2D que tomaban medidas con una frecuencia de 4Hz, aunque ocasionalmente el instrumento E1 fue calibrado para 20Hz para obtener cualquier fluctuación de presión asociada a la turbulencia.

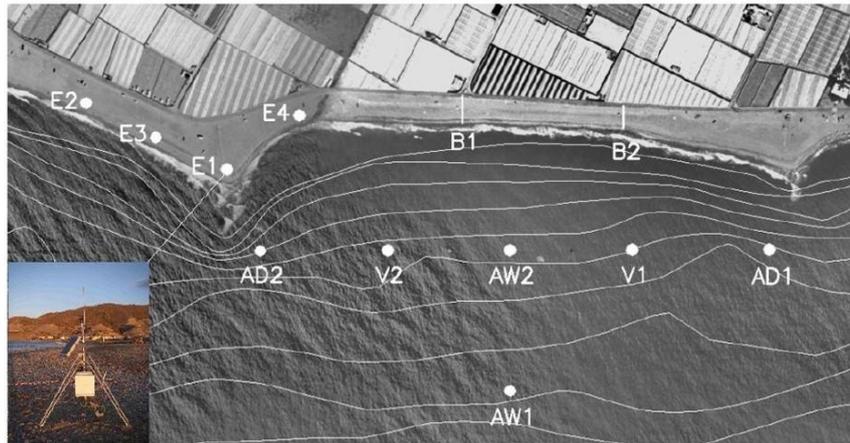


Figura 4.4: Esquema de la situación de los diferentes instrumentos usados en la campaña de campo en carchuna. En la parte inferior derecha puede observarse una fotografía de la estación barométrica (E1)[Fuente: Ortega-Sánchez *et al.*, 2003]

La situación de los distintos equipos se estudió previamente para:

- Medir la influencia del cabo Sacratif en el comportamiento de los campos de viento y presión en la playa.
- Medir simultáneamente las condiciones atmosféricas e hidráulicas.
- Medir la posible variación de las condiciones de presión y viento tanto a lo largo de la playa como en una dirección perpendicular a ésta.

Durante esta campaña de campo la zoná sufrió el paso de un sistema de bajas presiones, con lo que las condiciones hidrodinámicas se caracterizaron por oleaje tipo swell con periodos de pico bajos que variaban entre las condiciones energéticas medias a moderadas. Asimismo, se detectaron corrientes significativas a lo largo y a través de la playa, fuertemente relacionadas con el campo de viento existente y la variación de este a lo largo de la campaña.

Para este estudio, en el que se intenta calibrar los dos modelos de propagación elegidos, fueron facilitadas las alturas de ola registradas durante la semana completa que duró la campaña. Estas medidas fueron recogidas cada 60 minutos. Por otra parte, se escogieron los datos del sistema WANA provenientes de la boya 2020013 (que también serán comparados) para ser propagados con SWAN y Ref-Dif con la modelización numérica descrita anteriormente. Estos datos fueron registrados, y por lo tanto propagados, cada tres horas.

4.2.4. Comparación de resultados

Con la modelización numérica ya definida, se ha procedido a la propagación de los diferentes estados de mar registrados por Puertos del Estado durante la semana que duró la campaña de campo. Se han realizado tres series de cálculos:

- Modelo SWAN
- Modelo Ref-Dif en modo monocromático
- Modelo Ref-Dif en modo espectral

El hecho de usar un modo u otro de propagación en el caso de Ref-Dif se debe a que a pesar de que el espectral necesita mayores tiempo de cálculo, ofrece valores más suavizados en las series temporales. En la siguiente comparación se establecerá también cuál de los dos modos se acerca más al comportamiento morfodinámico real de la playa.

Una vez obtenidos todos los datos puede procederse a su comparación. Para ello se han representado en el mismo gráfico las cuatro series temporales de datos siguientes:

- Altura de ola procedente del sistema WANA
- Altura de ola procedente de los datos registrados en la campaña de campo
- Altura de ola resultante de la propagación SWAN
- Altura de ola resultante de la propagación Ref-Dif en ambos modos, tanto espectral como monocromático

El punto elegido para esta comparación ha sido el AW1, de coordenadas UTM $X = 460099$ m ; $Y = 4061093$ m. El resultado se muestra en la figura 4.5.

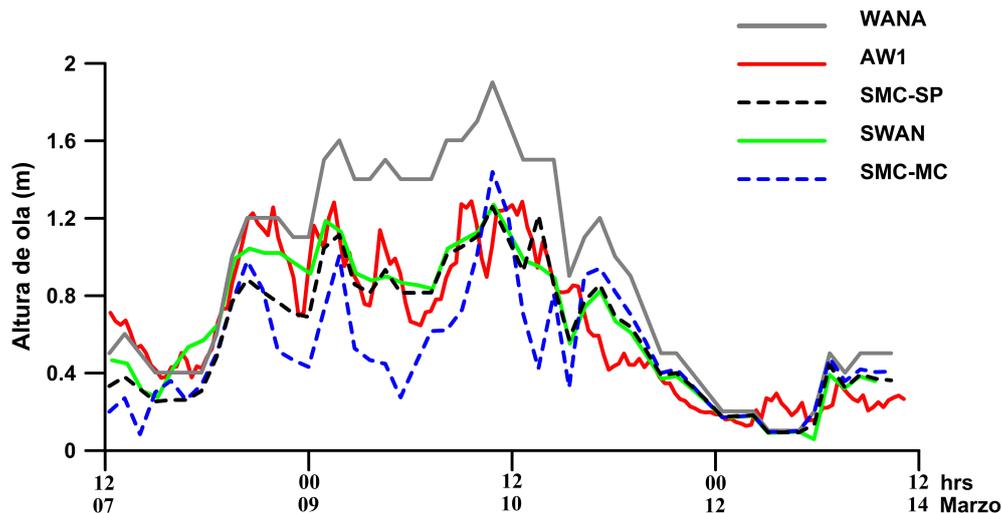


Figura 4.5: Representación del ajuste entre las distintas series obtenidas

Puede observarse como los modelos que más se ajustan a los datos reales tomados por AW1 son SWAN y SMC en modo espectral.

4.2.5. Conclusiones parciales

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, podemos aceptar que el modelo que simula mejor las condiciones en la playa de Carchuna es SWAN o bien Ref-Dif en modo espectral. Dada la facilidad para obtener los resultados en los puntos de control definidos con SWAN, se ha decidido usarlo para el cálculo de los parámetros adimensionales en esta playa. En ella habrá que tomar con extremada precaución los resultados obtenidos con Ref-Dif en modo monocromático, ya que difieren bastante de los datos registrados con los instrumentos durante la campaña de campo.

Sin embargo, en la playa de Trafalgar, al no tener los datos de una campaña de campo en la que se hayan registrado alturas de ola, no podemos asegurar nada sobre el comportamiento de los modelos de propagación de oleaje. Por tanto, habrá que tomar con precaución los datos obtenidos mediante ellos. En la siguiente sección se detalla la modelización numérica de los modelos para esta playa.

4.3. Playa de Trafalgar

Para la playa de Trafalgar también se han definido distintas modelizaciones numéricas para cada uno de los modelos. Dentro de ellos se han desarrollado un sistema de mallas para el modelo SWAN y dos para el modelo Ref-Dif debido a las limitaciones del mismo que también implican el dividir en dos sistemas de mallas la modelización para Carchuna. En esta ocasión, no se dispone de una campaña de campo para calibrar ambos modelos y decidir cuál de los dos se acerca más al comportamiento real del oleaje. A continuación se describen las características de la modelización numérica de los dos modelos para Trafalgar.

4.3.1. Modelo SWAN

Para el modelo SWAN se han tenido en cuenta las mismas precauciones que para Carchuna, pero en este caso debido a la mayor simplicidad de la batimetría y a un oleaje incidente con menor diferencia entre direcciones de incidencia, sólo ha sido necesario la definición de dos mallas anidadas. La primera de ellas, Exterior, tiene una distancia entre nodos de 100 metros. La anidada, que servirá como malla de detalle con la que se obtendrán las magnitudes necesarias para el cálculo de los parámetros adimensionales, tiene una equidistancia de 25 metros (Ver sección 4.6).

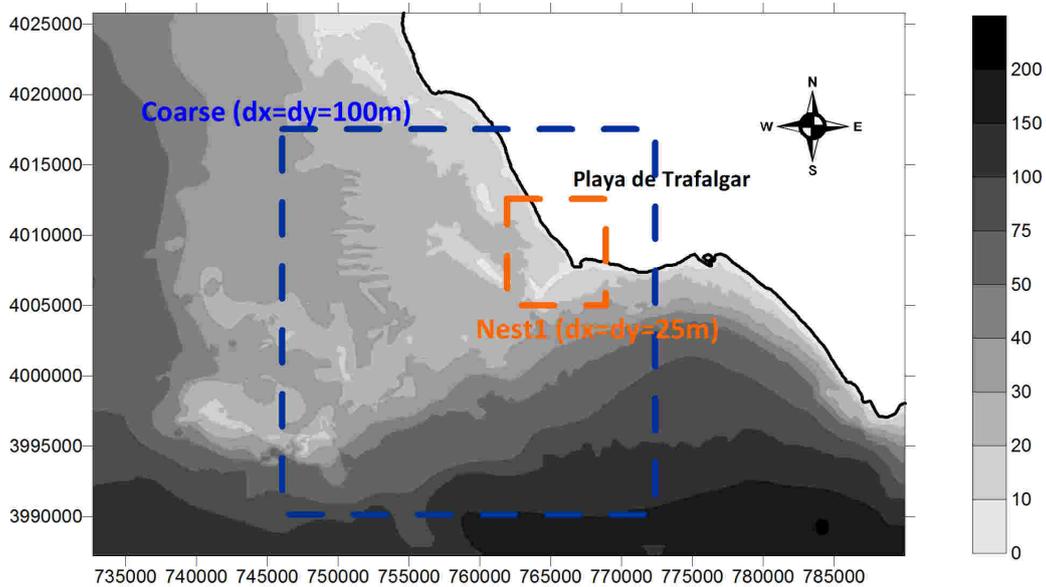


Figura 4.6: Representación de las mallas definidas para el modelo SWAN en la playa de Trafalgar.

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
Exterior	746000	270	100	3990000	270	100	0
De detalle	762000	280	25	4005000	300	25	0

Cuadro 4.4: Características geométricas de las mallas SWAN definidas para Trafalgar. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x

4.3.2. Modelo Ref-dif

Al igual que en el caso de la playa de Carchuna, para la modelización de esta zona de estudio con el modelo Ref-Dif también han sido la dirección de procedencia y la longitud de onda los factores más determinantes.

Debido a que para la correcta representación gráfica de los resultados de la propagación de este modelo es necesario que las mallas presenten un ángulo tal que:

$$\alpha = (0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, \dots)$$

De esta forma es imposible que con la definición de un solo juego de mallas se pueda cumplir para todos los estados de mar a propagar la condición de formar menos de 45 grados el ángulo de incidencia de este con el eje X de la malla, a pesar de que el oleaje incidente en esta playa se presenta en un intervalo relativamente pequeño de direcciones como se puede ver en 2.23. Es por ello que se optó a la definición de dos mallas. En cuanto a la restricción de longitud de onda, al igual que en el caso de Carchuna se ha estimado que con una equidistancia de 25 metros en la malla de detalle queda suficientemente asegurada la bondad de los resultados obtenidos. Además, dado que esta zona de estudio es mayor y los datos se propagan desde distancias mayores

a la playa con lo que las mallas deben ser mayores, se ha estimado que para conseguir unos datos más fiables habrá que definir dos mallas encadenadas, con lo que para cada sistema tendremos un total de tres mallas.

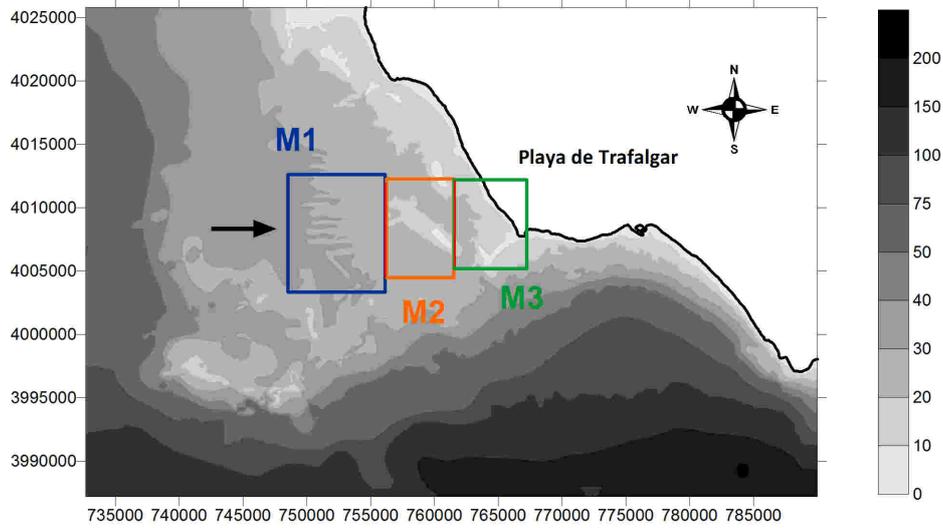


Figura 4.7: Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Trafalgar para el oleaje que inciden con una dirección de aproximadamente 270 grados

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
M1	748719	77	100	4003531	93	100	270
M2	756303	133	39	4005121	133	50	270
M3	761488	271	20	4006364	271	16	270

Cuadro 4.5: Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Trafalgar para oleajes que inciden con una dirección de aproximadamente 270 grados. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x

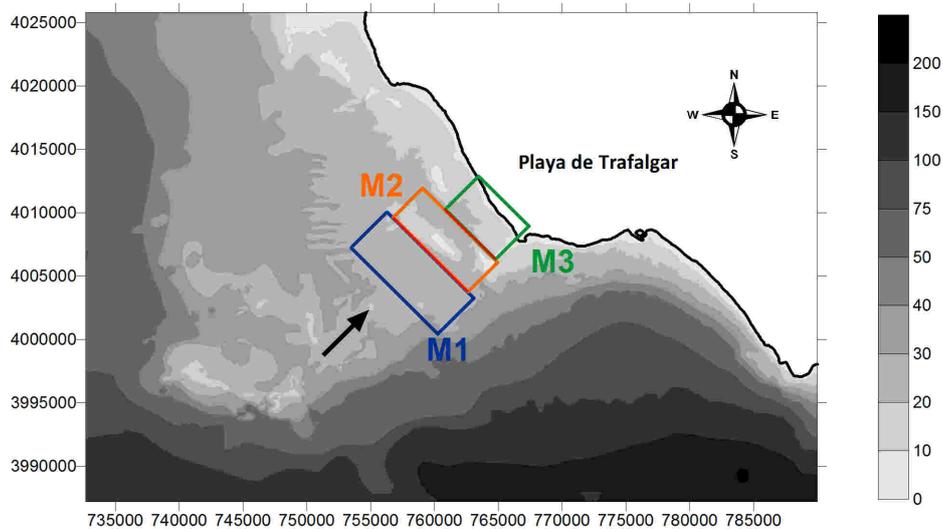


Figura 4.8: Representación de las mallas definidas para el modelo Ref-Dif en Trafalgar para el oleaje que inciden con una dirección de aproximadamente 225 grados

Malla	X0	mx	dx	Y0	my	dy	Ángulo
N1	760295	40	100	4000132	97	100	225
N2	762809	147	22	4003072	147	50	225
N3	764917	346	11	4005536	346	16	225

Cuadro 4.6: Características geométricas de las mallas Ref-Dif definidas para Trafalgar para oleajes que inciden con una dirección de aproximadamente 225 grados. Por columnas: coordenada x inicial, número de nodos en x, distancia entre nodos en x, coordenada y inicial, número de nodos en y, distancia entre nodos en y, ángulo de la malla respecto al eje x

Capítulo 5

Resultados y análisis

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo 3, diferenciándolos por zonas de estudio y siguiendo el mismo esquema para ambas zonas. De esta manera se exponen las tormentas seleccionadas, los resultados de la propagación de los estados de mar elegidos y las imágenes recogidas representativas de los eventos en estudio, así como los parámetros adimensionales calculados. Una vez obtenidos estos resultados, se lleva a cabo un análisis de los mismos buscando patrones de comportamiento en la morfodinámica de ambas zonas de estudio.

5.1. Playa semireflejante: Carchuna

La primera zona de estudio es la playa de Carchuna, que representa a la tipología de semireflejante dentro de los dos tipos más característicos de litoral andaluz, encontrándose en el mar Mediterráneo.

5.1.1. Tormentas seleccionadas

Después de llevar a cabo el análisis de los datos de la red WANA, se han encontrado 6 tormentas en la playa de Carchuna durante los 4 años meteorológicos estudiados desde 2003 a 2007 (tabla 5.1).

Tormenta	Fecha inicio	Fecha pico	Fecha final	Hs max(m)
C03-t1	14/01/2003 09h	21/01/2003 9h	28/01/2003 09h	3.1
C03-t2	09/03/2003 06h	17/03/2003 06h	25/03/2003 12h	4.3
C03-t3	09/11/2003 03h	16/11/2003 03h	23/11/2003 03h	3.3
C04-t1	26/04/2004 03h	03/05/2004 06h	12/05/2004 21h	4.1
C07-t1	22/01/2007 03h	28/01/2007 15h	30/01/2007 00h ¹	3.8
C07-t2	12/12/2007 15h	19/12/2007 15h	26/12/2007 15h	3.0

Cuadro 5.1: Tormentas seleccionadas para el estudio en la playa de Carchuna

5.1.2. Propagación de estados de mar

Como ya se ha descrito en 3 se han usado dos modelos numéricos de propagación de oleaje para realizar este estudio, siendo el primer paso la selección de aquellos estados de mar que se van a introducir en dichos modelos.

5.1.2.1. Estados de mar seleccionados

De entre todos los estados de mar registrados durante las tormentas seleccionadas, se han escogido aquellos que por lo ya explicado en 3.1.3 representan a condiciones del oleaje claves para conocer el comportamiento de la playa. Estos estados de mar en la playa de Carchuna han sido los siguientes:

Estado de mar	Fecha	Hs (m)	Tp (s)	Dir	V. v. (m/s)	D. v.
C03-t1-s	21/01/2003 09h	3.1	7.6	42	14.4	17
C03-t1-mw	19/01/2003 12h	2.0	7.6	29	10.1	355
C03-t2-s	17/03/2003 06h	4.3	10.2	176	16.8	192
C03-t2-me	21/03/2003 09h	2.5	7.6	165	12.3	184
C03-t3-s	16/11/2003 03h	3.3	8.4	46	11.3	14
C03-t3-me	18/11/2003 15h	2.4	12.3	176	10.0	192
C04-t1-mw	29/04/2004 21h	2.5	6.9	31	13.0	173
C04-t1-s1	03/05/2004 06h	4.2	10.0	50	16.1	9
C04-t1-s2	05/05/2004 21h	3.0	7.9	29	14.7	1
C07-t1-mw	22/01/2007 15h	1.6	5.7	30	10.8	21
C07-t1-s	28/01/2007 15h	3.8	8.5	178	16.5	77
C07-t2-me	16/12/2007 21h	1.6	8.2	175	8.6	85
C07-t2-s	19/12/2007 15h	3.0	7.5	180	15.2	197

Cuadro 5.2: Estados de mar seleccionados para el estudio en la playa de Carchuna. Por columnas: estado de mar, altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de procedencia, velocidad del viento, dirección del viento.

Los estados de mar definidos como 's', se corresponden con condiciones extremas, mientras que los definidos como 'm' lo hacen con condiciones moderadas, en los que además se especifica su dirección de procedencia con una 'é' si proceden del este y una 'w' si proceden del oeste. También pueden diferenciarse por su periodo de pico, denominándose 'mtá' aquellos estados de mar que posean un periodo de pico bajo y 'mTén' el caso contrario.

5.1.2.2. Resultados de la propagación

Según el modelo de propagación usado los resultados se representan de distinta manera. En el caso del modelo SWAN las alturas de ola y las demás magnitudes pueden representarse como gráficos de salida de MATLAB en los que en cada nodo se representa una flecha cuya magnitud indica esa altura y su dirección y orientación la dirección del oleaje en ese punto. Así mismo pueden obtenerse otros gráficos con la salida de periodo de pico, longitud de onda, profundidad, fracción de rotura, etc. (Figura 5.1).

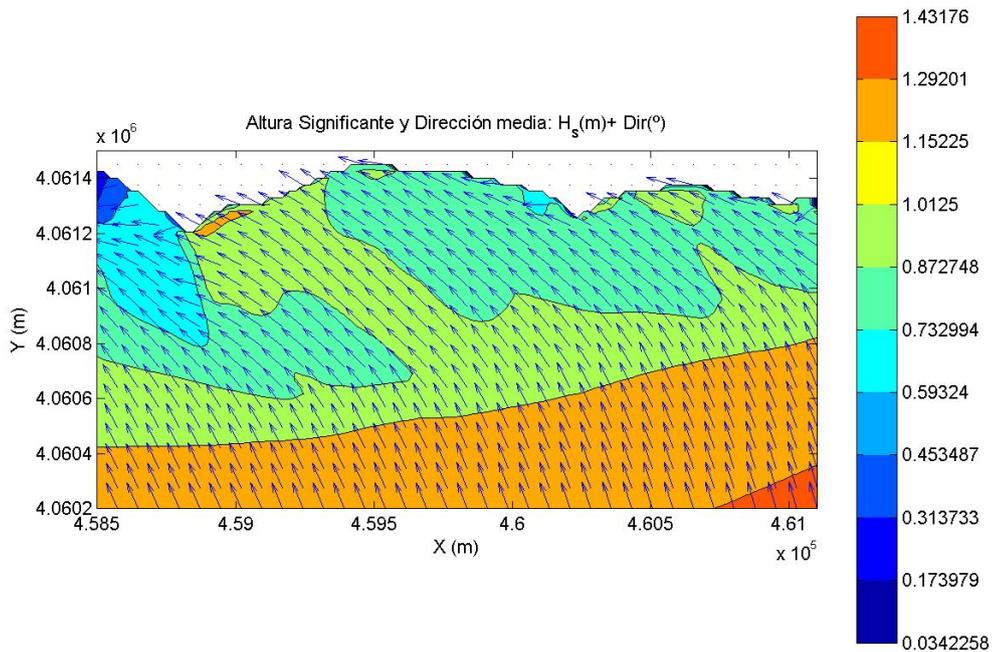


Figura 5.1: Ejemplo de salida de Matlab para C03-t2-s propagado con el modelo SWAN en el que se representan la altura de ola y la dirección de incidencia. A la derecha escala de altura de ola. La dirección de incidencia aparece representada mediante vectores.

El problema de este tipo de gráficos es su baja resolución y número de nodos, lo que dificulta su análisis. Por ello se recurre a las diferentes magnitudes calculadas en los distintos puntos de control descritos en el capítulo anterior, con las que posteriormente se calcularán los parámetros adimensionales para todos los estados de mar propagados y con los que se ha establecido una comparación entre este modelo y el Ref-Dif. Como ya se ha visto en 4.2.5 en cuanto a los datos calculados en los puntos de control, el sistema SWAN simula correctamente las situaciones reales. Sin embargo, para la representación gráfica es más óptimo el uso de los cálculos del modelo Ref-Dif.

De esta forma, par el modelo Ref-Dif se han obtenido gráficos del mismo tipo que los descritos anteriormente pero con una mayor resolución y calidad, ya que la salida del Mopla permite una mayor manipulación a la hora de representar los resultados con determinados programas informáticos. Por tanto, se han obtenido gráficas de todos los estados de mar seleccionados en las que pueden observarse las zonas de concentración de energía que cada evento crea y que serán las que determinen la evolución morfológica de la playa. Estas zonas vienen representadas por aquellas áreas en las que se observe una mayor densidad de flechas con mayor longitud (figura 5.2).

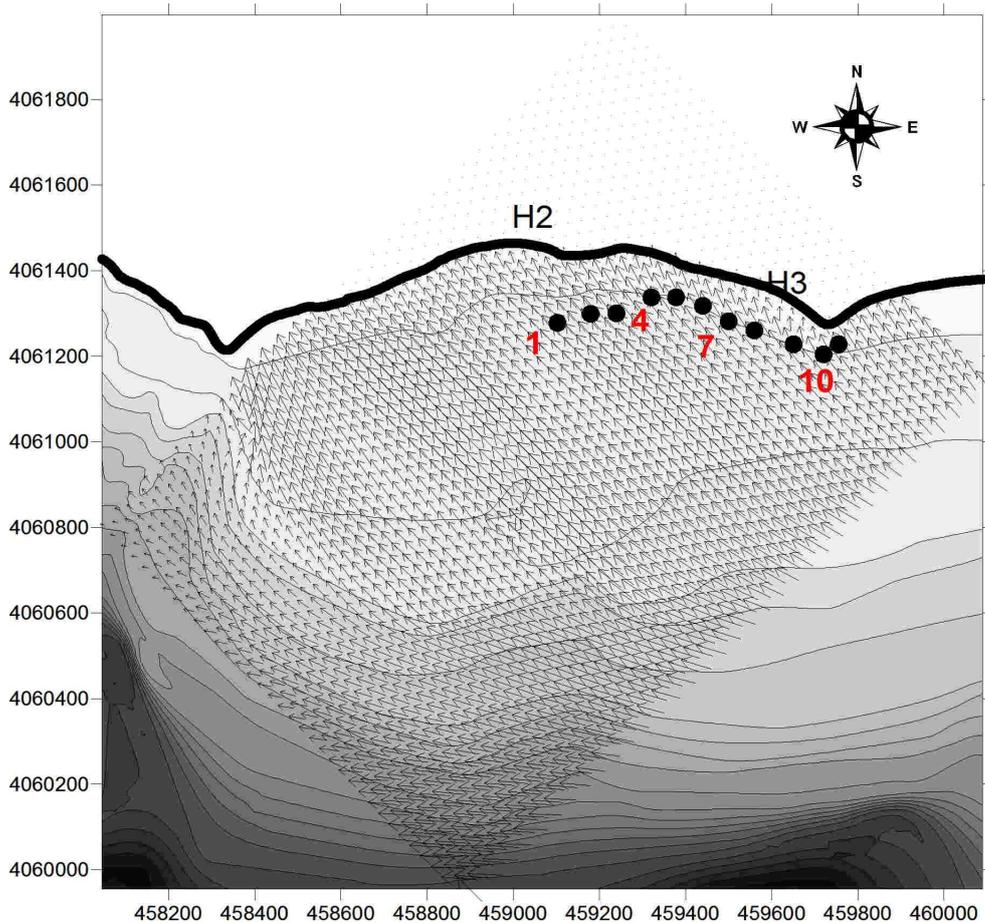


Figura 5.2: Ejemplo de representación gráfica para C03-t2-s propagado con el modelo Ref-Dif en el que se representan la altura de ola (módulo de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores).

Estas imágenes serán las que a continuación se comparen con los resultados dados por SWAN en los puntos de control para observar y comparar el comportamiento de ambos modelos y poder obtener alguna conclusión acerca del comportamiento de la playa.

5.1.3. Evolución morfodinámica

En esta sección se desarrollarán los resultados cualitativos obtenidos tras la observación de las imágenes de marea baja seleccionadas para la playa de Carchuna que han sido obtenidas de la base de datos del sistema de video monitorización costera. Estos resultados se compararán con los hallados en trabajos previos, estudiando si el modelo teórico de circulación presentado para esta playa es válido después del estudio de los datos de campo.

5.1.3.1. Imágenes seleccionadas

Como ya se ha mencionado en el capítulo 3, para el estudio de las video imágenes es necesario establecer un plano de comparación común. En nuestro caso se ha establecido que las imágenes seleccionadas deben reflejar la hora de marea más baja de cada día dentro de las horas con luz solar. Así pues, se han seleccionado las imágenes correspondientes a marea baja de los días de tormenta escogidos (ver tabla 5.1).

De entre las dos cámaras disponibles, se han escogido las imágenes de aquella que dirigía su objetivo a la zona de estudio situada entre H2 y H3 (cámara uno). En las dos primeras tormentas C03-t1 y C03-t2, esta cámara daba una vista general de la zona comprendida entre H2 y H4. Después de esas fechas se cambió la orientación buscando fijar la imagen en nuestra zona de estudio. Por tanto, las imágenes procedentes de las tormentas que tuvieron lugar después de C03-t2 nos dan datos más concretos que permiten estudios más profundos sobre la evolución morfológica de esa bahía.

Además, existen algunos vacíos en las series de imágenes, ya que por problemas de la estación de video monitorización o en el almacenamiento de las imágenes faltan algunas de ellas. Salvo en el caso de la tormenta C07-t1, estos huecos son de apenas un día, con lo que no afecta al estudio. En el caso de esa tormenta, faltan las imágenes de una semana contada a partir de la ocurrencia del pico del temporal, con lo que se dificulta el estudio del proceso de regeneración de la playa para ese evento.

5.1.3.2. Estudios previos

Una de las características principales de la playa de Carchuna es que está formada por varios cabos que conforman una serie de formas rítmicas a lo largo de la costa. En trabajos anteriores se ha intentado estudiar el comportamiento de estas formas ante eventuales tormentas y así conocer mejor los procesos de circulación que tienen lugar en la zona. Con el análisis de las imágenes seleccionadas se pretende sacar conclusiones sobre esta evolución morfológica y compararlas con los estudios previos, para poder así establecer un modelo de respuesta de la playa ante eventos de contenido energético moderado y extremo que permita predecir el comportamiento de la zona de estudio ante próximos eventos de esas características.

En esos trabajos previos (Ortega-Sánchez *et al.*, 2003), se estableció un modelo teórico de circulación de la zona entre H2 y H3. En este modelo se proponía un comportamiento diferente en la morfodinámica de la playa según la procedencia del oleaje y la energía de este, teniendo en cuenta las características batimétricas y del oleaje incidente. En el caso de condiciones energéticas extremas la rotura de ola tendría lugar de una manera regular a lo largo de la bahía, formándose así una barra de sedimento fino (ya que el grueso no se movilizaría) en el centro de ella tras una erosión más o menos continua de toda la zona de estudio. Con las condiciones moderadas la rotura tiene lugar de manera heterogénea, con una mayor altura de ola en la zona central de la bahía. De esta forma se movilizaría de nuevo el sedimento fino de la barra depositándose en las zonas cercanas a los cabos adyacentes según la dirección de procedencia del oleaje, provocando un aumento de la anchura de playa en estas zonas.

Poco después, se hizo un estudio de las video imágenes de la zona para varias tormentas, con el estudio pormenorizado de una sola tormenta en marzo de 2008 (Ortega-Sánchez *et al.*, 2008). En el análisis de este trabajo se lleva a cabo un estudio similar para varias tormentas con el objeto de comprobar la validez de las conclusiones obtenidas en esos trabajos previos. Para ello, van a dividirse las tormentas seleccionadas según su dirección de procedencia, que determinará el comportamiento de la playa. Nos encontramos de esta forma con tormentas procedentes del este y del oeste, ya que en Carchuna el oleaje procede casi únicamente de esas dos direcciones (Figura 2.11). Además se centrará el estudio en la zona alrededor de H2, ya que es la que presenta mayor resolución y donde es más visible el efecto del oleaje en la playa.

5.1.3.3. Tormentas procedentes del oeste

De las seis tormentas seleccionadas para esta playa, se han encontrado tres cuyo estado de mar con altura de ola máxima procedía del oeste. La primera de ellas es C03-t1 (figura 5.3), cuyas imágenes todavía fueron captadas con la orientación antigua. Aún así, pueden observarse ciertas características significativas que se comentan a continuación (figura 5.4)

Puede observarse como en esta tormenta hay dos estados de mar de los seleccionados para su propagación. Primero se observa el paso de un episodio de condiciones moderadas Mw el día 19 de enero y después el paso del pico de la tormenta el día 21 del mismo mes. Ambos estados proceden del oeste.

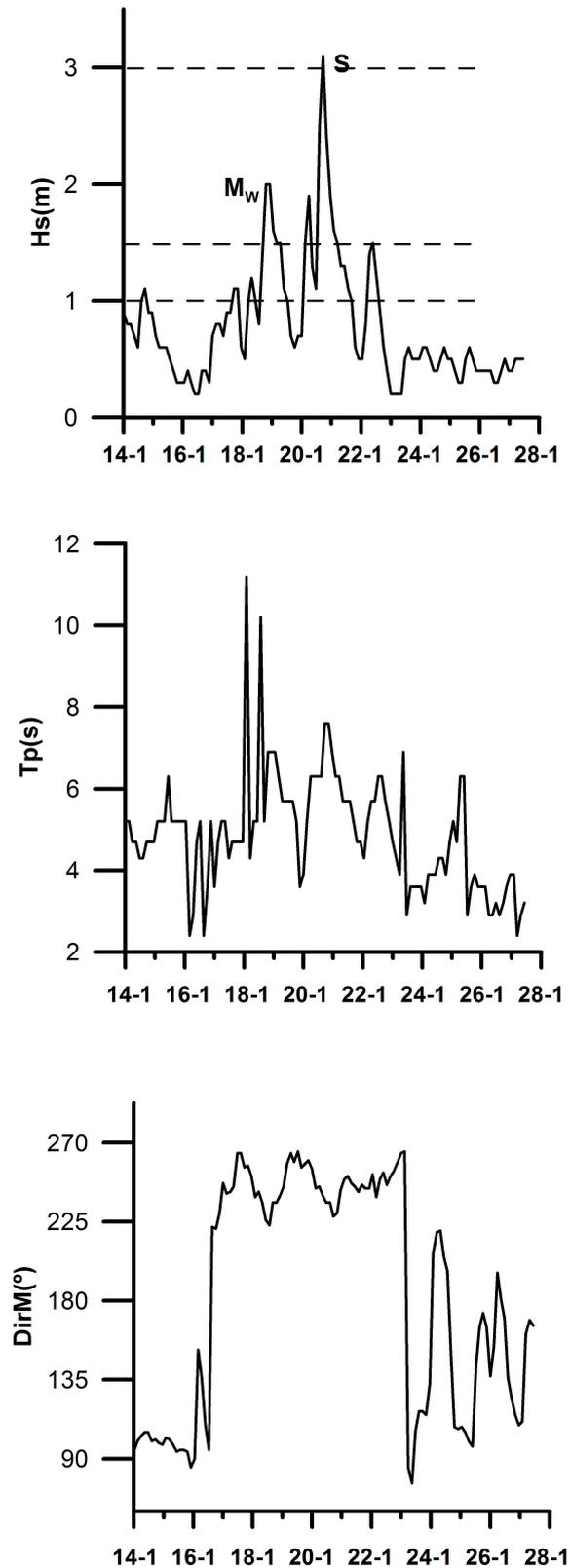


Figura 5.3: Representación para C03-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

En cuanto a las imágenes de la estación (imagen 5.4), puede observarse como el paso de Mw el día 19 no varía la forma de la línea de costa inicial del día 14. Dos días después pasa el pico de la tormenta, produciendo

una erosión generalizada con el consiguiente retroceso de la línea de costa. El día 22, siguiente a C03-t1-s, puede observarse una barra en la parte este de H2, formada seguramente por sedimento fino procedente de la playa en ese mismo área, donde se han quedado depositadas las partículas gruesas. En los días siguientes se observa una recuperación de material en la playa desapareciendo poco a poco la barra, lo que hace pensar que ese material fino se vuelve a movilizar con las condiciones moderadas siguientes al pico y se dirige a su sitio de partida. Habrá que comprobar con el cálculo de la velocidad de caída adimensional qué tipo de partículas se movilizan en la playa en los estados de mar propagados. Al final de la tormenta la playa casi ha llegado de nuevo a su estado inicial, con lo que el tiempo de regeneración de la playa tras el paso de la tormenta ha sido pequeño, del orden de una semana.

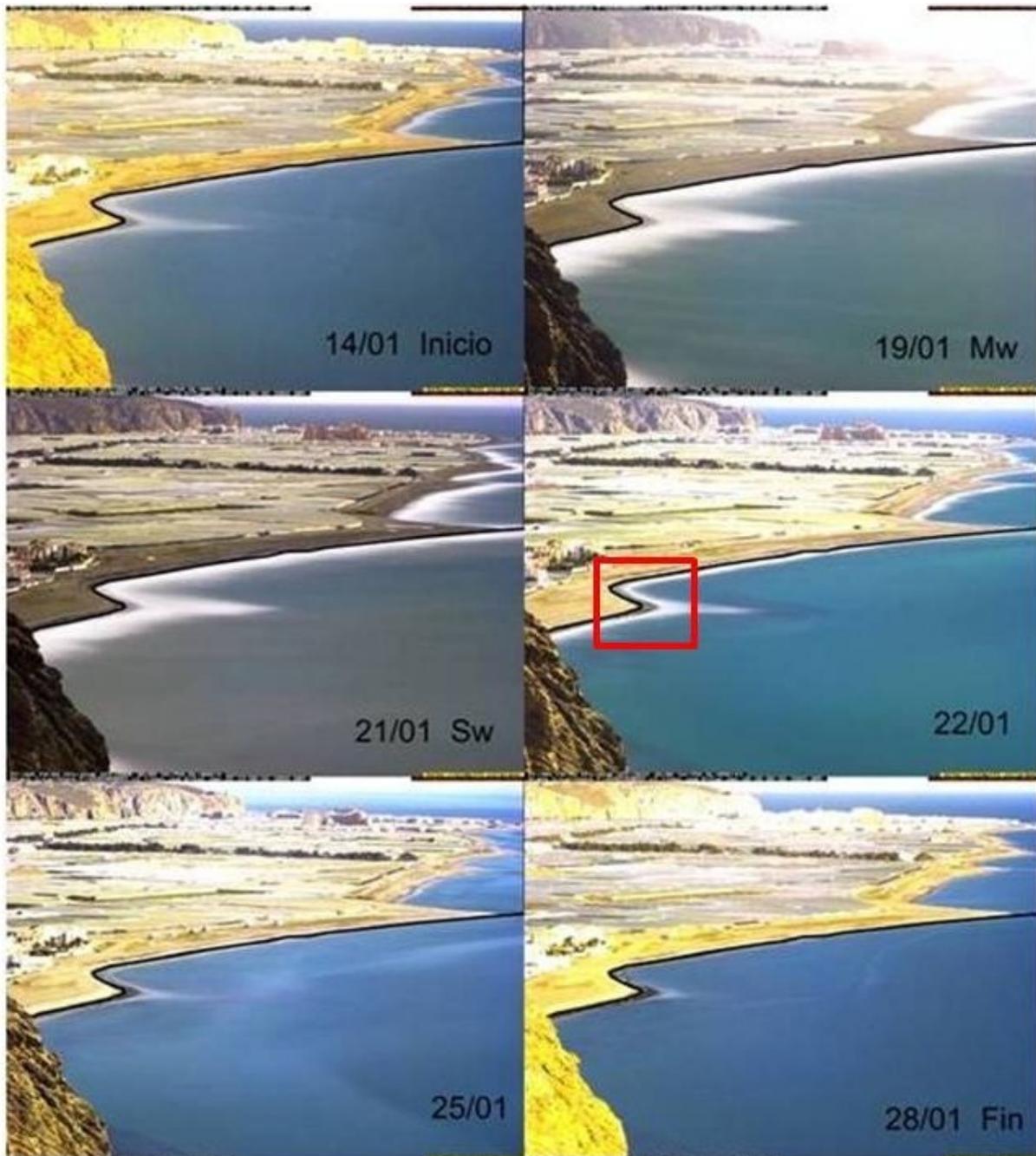


Figura 5.4: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t1. La línea negra representa la posición inicial de la línea de costa. Dentro del rectángulo resaltado se muestra la barra observada

La siguiente tormenta del oeste registrada es c03-t3, en la que ya se dispone de imágenes más focalizadas en la zona de estudio. La series de datos WANA de esta tormenta indican el paso de un pico procedente del oeste el día 16 de noviembre de 2003, tras el cual aparece un Me el día 18.

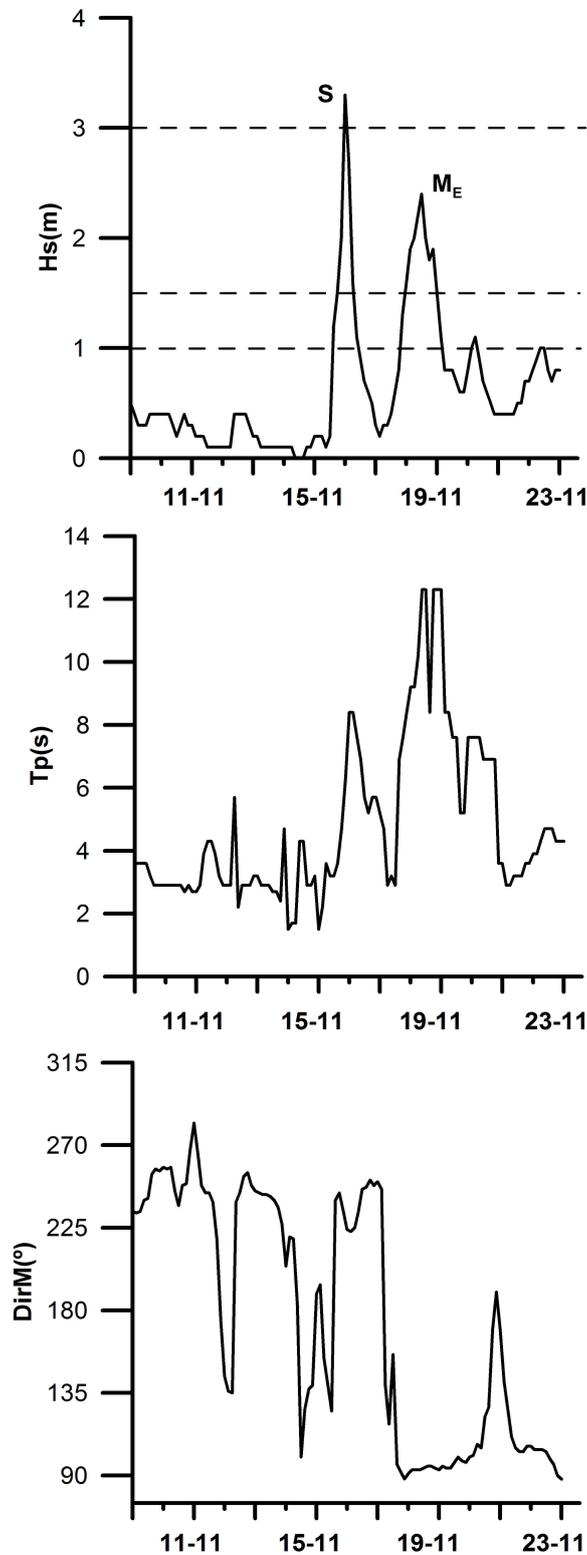


Figura 5.5: Representación para C03-t3 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

Observando la serie de imágenes (figura 5.6), puede verse una erosión de la playa muy patente tras el día 16, en el que se alcanza el pico de la tormenta. Hasta el día 18 puede verse una ligera recuperación de material en la playa que se ve muy acelerada tras el paso de Me, llegando incluso a ganar anchura de playa en la parte este de H2 con respecto al perfil original. La parte oeste, sin embargo, sí queda erosionada. Esto puede indicar que a pesar de que los estados moderados no aceleran el proceso de erosión, como hemos visto en la tormenta anterior, sí lo hacen en los de recuperación de sedimento de la playa, llegando incluso a aumentar la anchura de esta cuando estos procesos ocurren después de un estado extremo. En este caso no se observa la formación de barras, aunque el sedimento que queda en la superficie de la playa tras el pico de la tormenta es de tamaño más grueso.

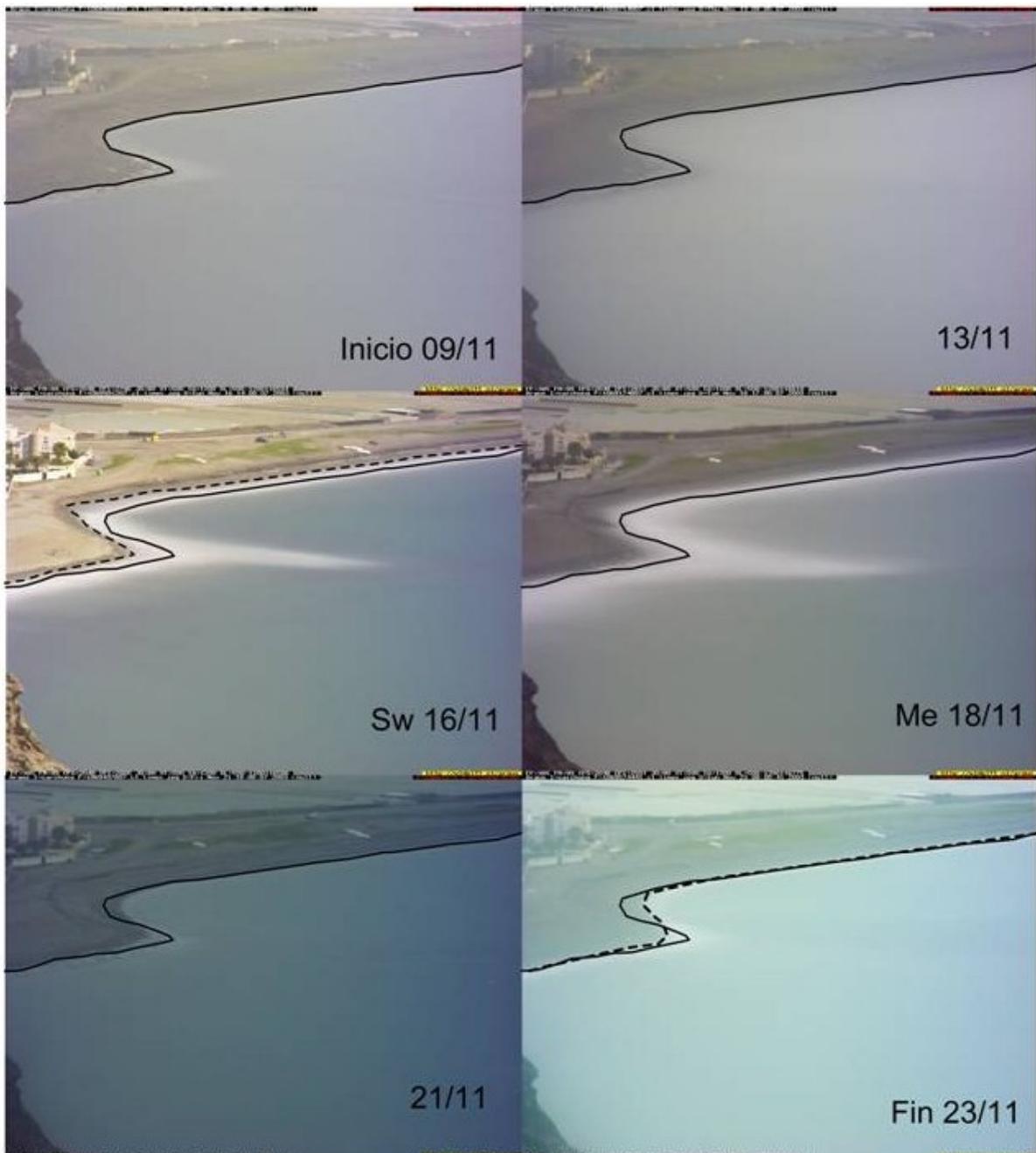


Figura 5.6: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t3. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.

La última tormenta analizada procedente del oeste es la C04-t1 (Figura 5.7). En ella pasan un Mw el día 29 de marzo, S1w el día 3 de mayo y S2w el día 5 de mayo.

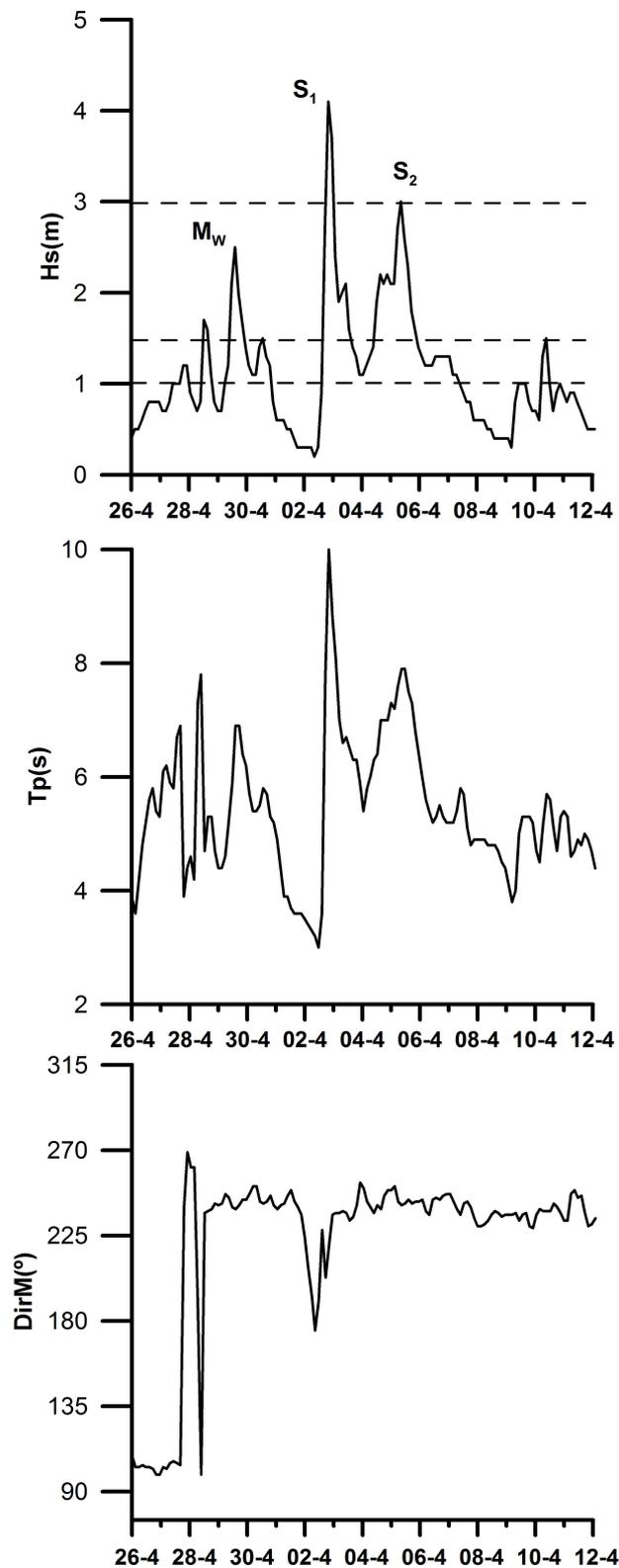


Figura 5.7: Representación para C04-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

La evolución morfológica de la playa durante esta tormenta, presenta características similares a las dos anteriores, ya que el paso de Mw el día 29 de abril no provoca grandes cambios en la línea de costa. Sin embargo, el paso de S1w el día 3 de mayo provoca una erosión repentina que empieza a recuperarse justo antes de que S2w vuelva a erosionar fuertemente la playa el día 5. Tras este segundo pico, se produce un proceso de regeneración de la playa que lleva a la recuperación total el día 9 de mayo, aunque al final de la tormenta se produce de nuevo una ligera erosión debida a un episodio de estados de mar con olas ligeramente por debajo del límite de oleaje moderado. Esto último sugiere la posibilidad de que los umbrales definidos por Ortega-Sánchez *et al.* (2003) y adoptados en este estudio debieran ser revisados, ya que oleaje definido como medio provoca cambios a corto plazo en la playa.

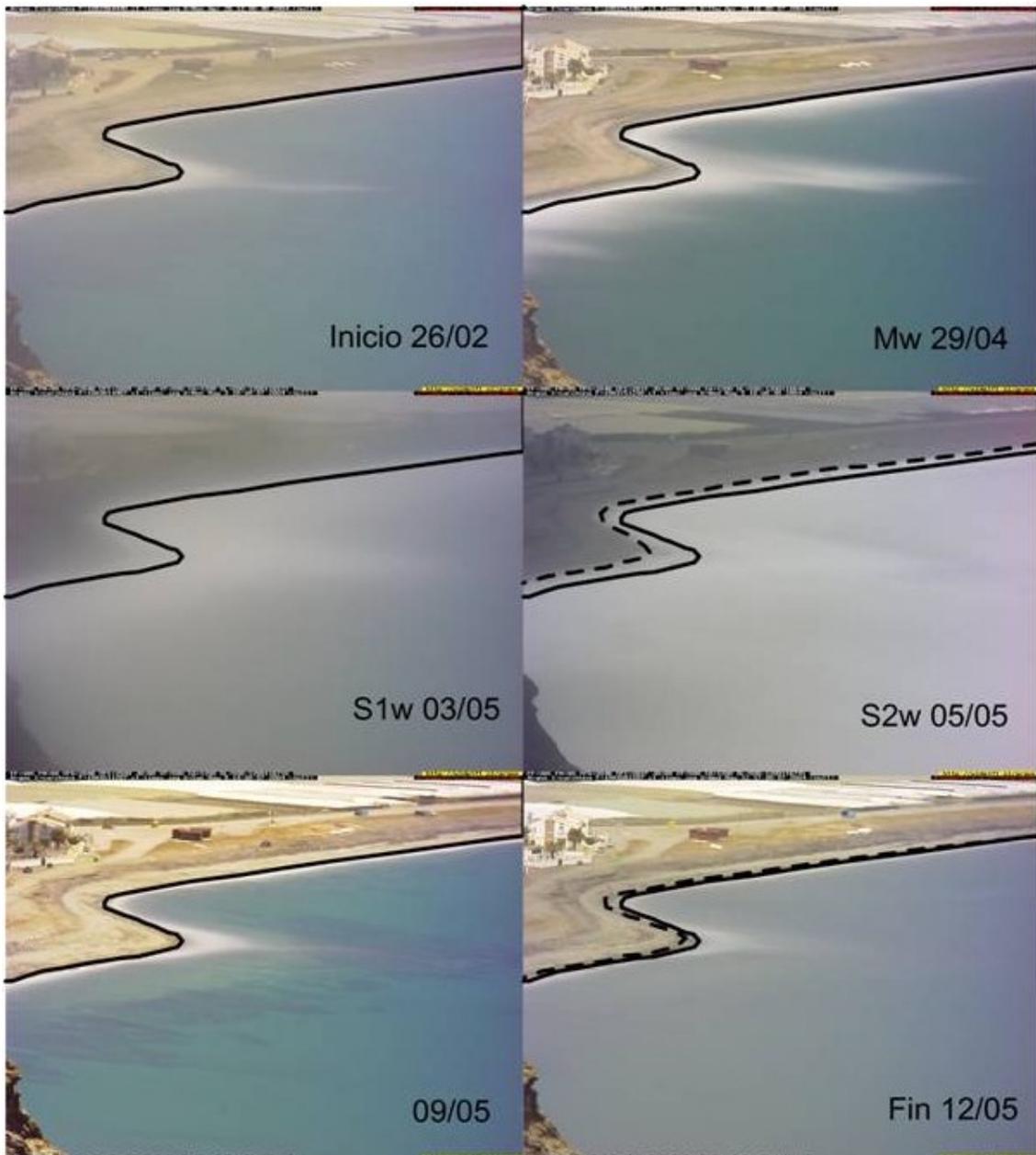


Figura 5.8: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C04-t1. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.

Los resultados obtenidos para tormentas procedentes del oeste establecen que en este tipo de eventos se produce una erosión generalizada en la zona de H2, con la formación de barras de sedimento fino en la parte oeste de la bahía en algunos casos. Al incidir el oleaje desde el oeste, el sedimento es erosionado y transportado

a esas barras y al otro lado de la bahía. Los estados moderados asociados tienen un comportamiento distinto según ocurran antes o después del pico de la tormenta. Si lo hacen antes, no tienen una gran influencia en la forma de la línea de costa. Sin embargo, si lo hacen después aceleran el proceso de sedimentación de la playa llegando incluso a aparecer una ganancia neta de sedimento en la parte este de H2. Este sedimento proviene de la circulación existente en la zona, generada por la existencia de cabos separados regularmente y que moviliza mayor cantidad de material en estados moderados, por lo que estos aceleran el proceso de recuperación de la playa tras las tormentas.

Esas observaciones coinciden con las arrojadas por los estudios anteriores, en los que se observó la evolución de la misma zona de estudio bajo el efecto de una tormenta también procedente del oeste y que ocurrió el marzo de 2008. En ese estudio (*Ortega-Sánchez et al., 2008*) la secuencia de eventos fue Me, Sw y Mw respectivamente. Se concluyó que el primero no modificaba el perfil original de la playa BE (figura 5.9) mientras que Sw sí lo hacía debido a su efecto erosivo, suavizándolo y creando una barra de sedimento fino (ER). Tras el paso de Sw se encontraron con unos días de condiciones medias que provocaron la recuperación paulatina de la línea de costa y el perfil, llegando a un perfil intermedio IN. El oleaje moderado de Mw provocó una repentina aceleración del proceso, volviendo rápidamente al perfil original BE y provocando incluso una ganancia en el ancho de playa al oeste de H2.

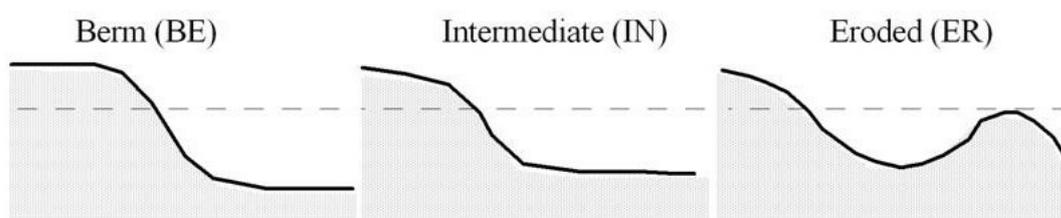


Figura 5.9: Perfiles definidos para la playa de Carchuna en trabajos anteriores[Fuente: Ortega-Sánchez *et al.*, 2008]

5.1.3.4. Tormentas procedentes del este

Es lógico pensar que el comportamiento morfodinámico de la playa será distinto bajo la acción de temporales procedentes del este, ya que el sistema circulatorio de la zona se ve sometido a acciones distintas. A continuación se examinan las tres tormentas encontradas que inciden en la zona de estudio desde el este para comprobar cuál es ese comportamiento.

La primera de ellas es C03-t2, de la que como en el caso de C03-t1 tan sólo hay disponibles imágenes tomadas desde una perspectiva más general. Aún así pueden establecerse ciertos criterios de comportamiento. El evento, que comienza el 9 de marzo, está caracterizado por el paso de el pico de la tormenta el día 17 con una altura de ola significativa máxima de 4.3 metros (la mayor registrada en todo este estudio en Carchuna) procedente del este, seguidos de un episodio moderado Me el día 21 del mismo mes.

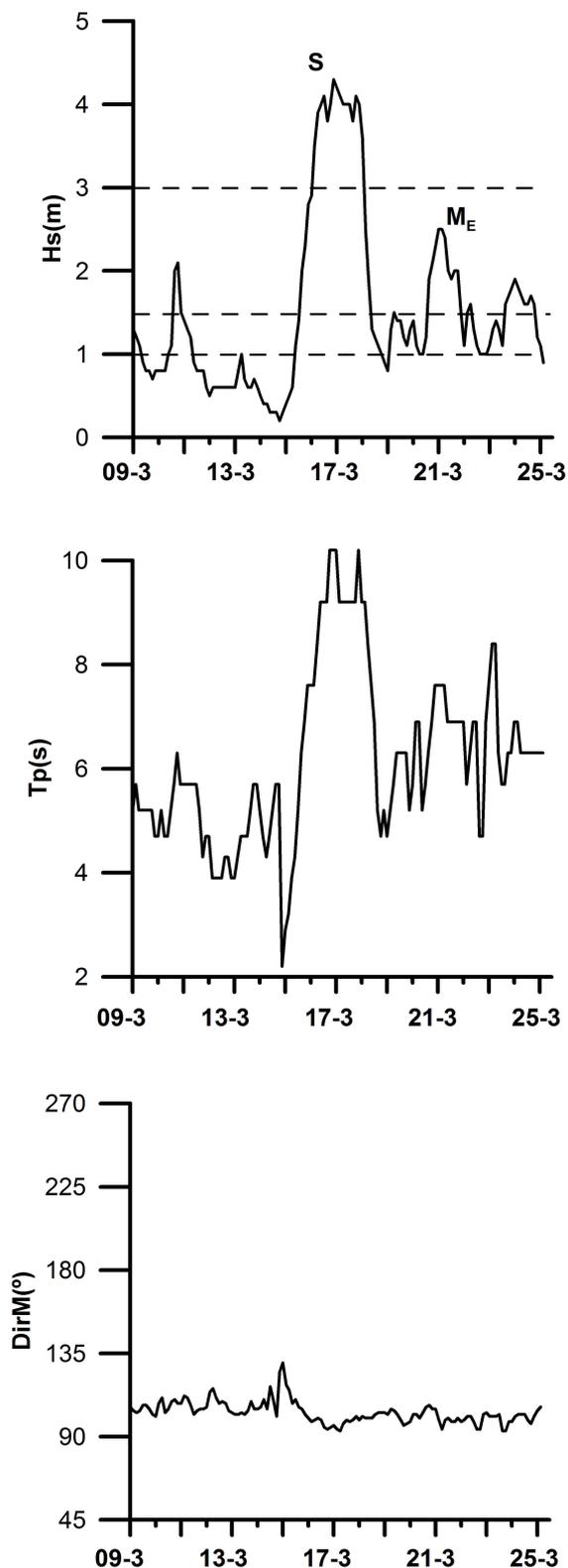


Figura 5.10: Representación para C03-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

En cuanto a la evolución morfológica observada en las imágenes (figura 5.11), la playa se encuentra en lo que parece un equilibrio dinámico hasta el día 17, en el cual tras el paso del pico de la tormenta se observa una erosión generalizada de la playa. Justo después de esta se observa un crecimiento muy notable de la zona situada

al este de H2, con el consiguiente aumento de la anchura de playa. El paso de Me el día 21 no parece alterar el proceso de crecimiento, que continúa hasta el final de la tormenta, quedando la playa en ese momento con una forma en planta distinta a la inicial. Esto parece indicar que los temporales procedentes del este arrastran sedimentos de tamaño fino desde la parte este de la bahía a la parte oeste, depositándose estos alrededor de H2 una vez que la velocidad de caída disminuye lo suficiente. Estos depósitos son mayores que los originales.

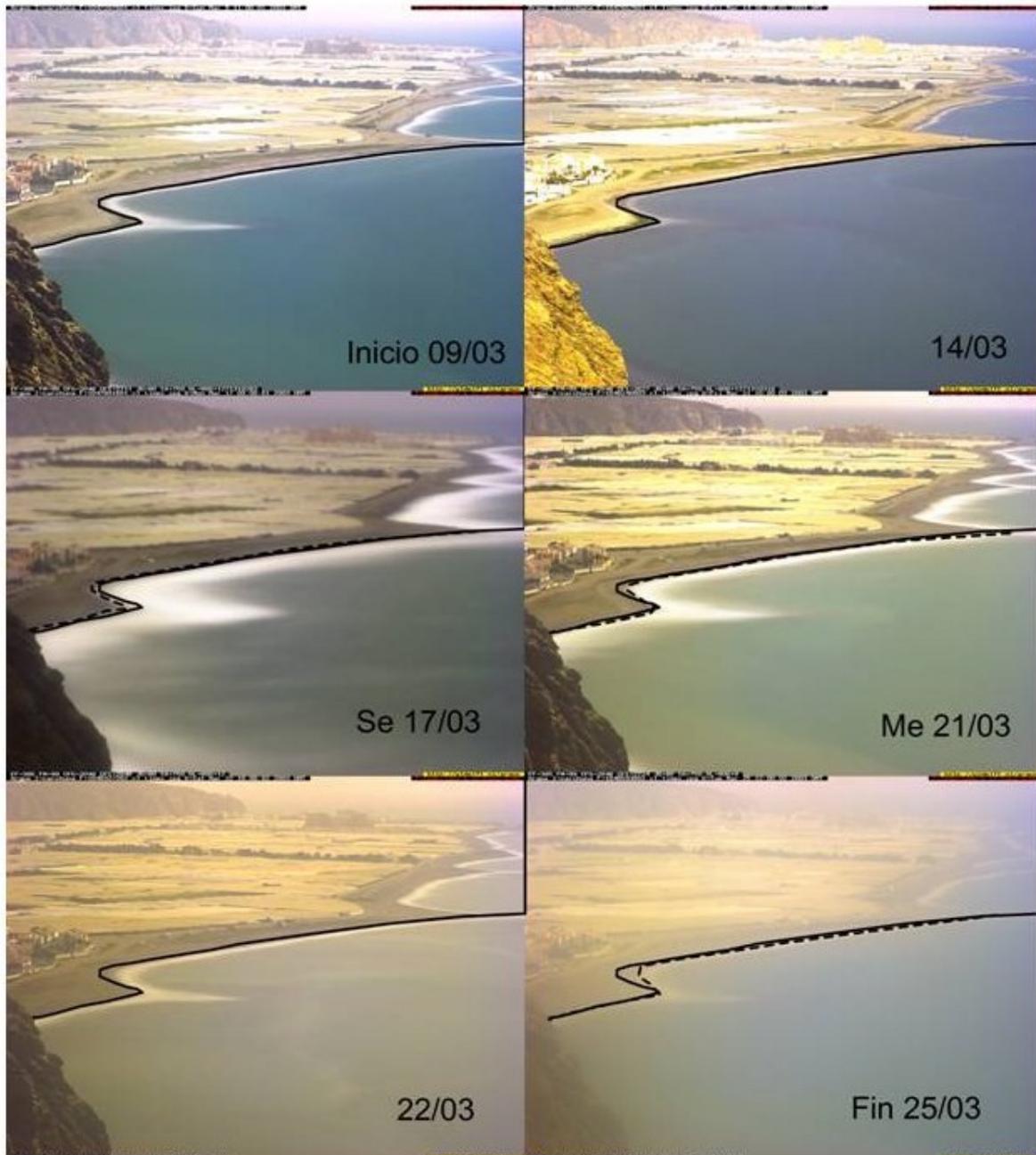


Figura 5.11: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C03-t2. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.

La siguiente tormenta es C07-t1, de la que ya se disponen imágenes más cercanas de la zona de estudio. Esta tormenta, que comienza el 22 de enero día en el que tiene lugar un Mw, tiene su altura de ola significativa máxima el día 28 de enero con 3.8 metros. No hay datos WANA a partir del 30 de enero y las imágenes sólo cubren 8 jornadas, desde el día 24 al 31 de enero.

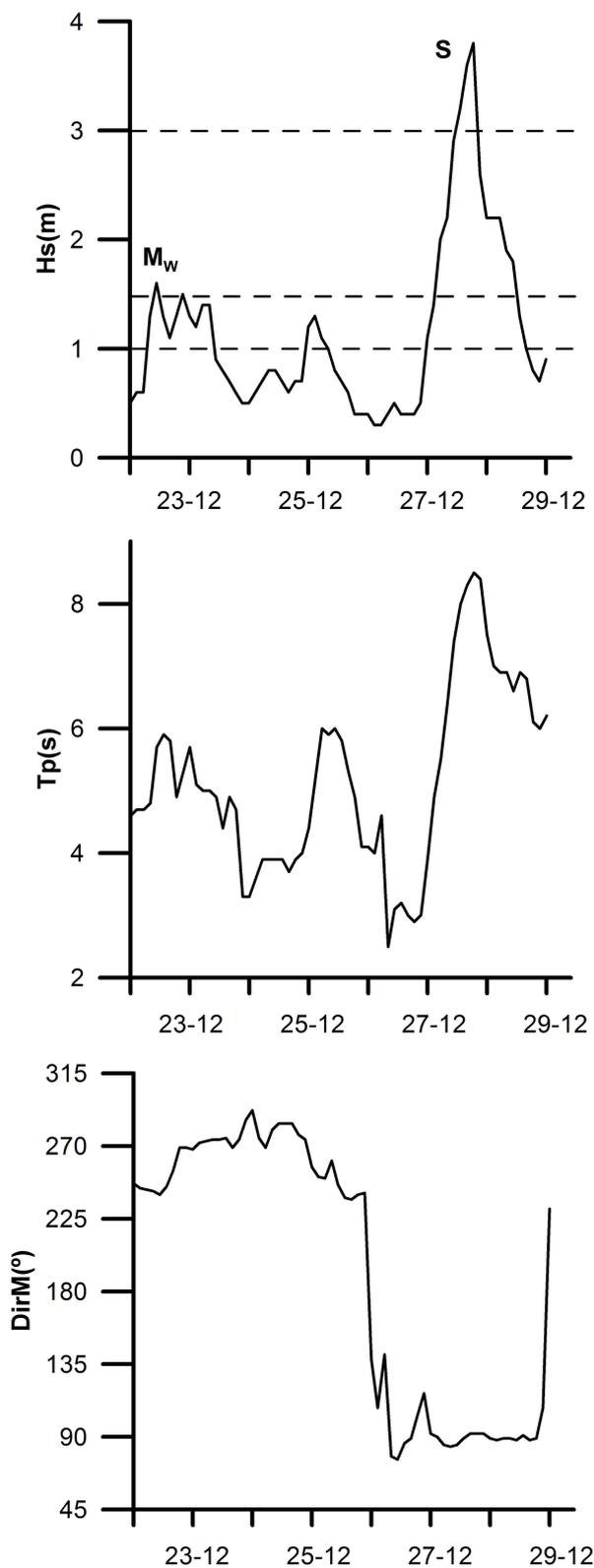


Figura 5.12: Representación para T07-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

A pesar de la escasez de imágenes, pueden observarse aspectos relevantes en el comportamiento morfodinámico de la playa. Antes del pico de la tormenta la playa sufre una ligera erosión en ambos lados del cabo

H2. Sin embargo, justo tras el paso de Se aparece un cambio muy importante y repentino en la playa, con una ganancia de unos 15 metros de playa en apenas un día en la zona este del cabo. Todo este material depositado proviene de la zona este de la bahía, en la que por el efecto de Se se ha movilizó mucho material. En el momento en el que la energía del oleaje decae, y con ello la velocidad de caída adimensional de las partículas, todo esos sedimentos se depositan en la parte oeste de la bahía. Por lo tanto, parece que el tiempo de recuperación para oleajes procedentes del este es mucho mayor, ya que para movilizar de nuevo todo ese material que ha sido aportado sin que incida oleaje de características energéticas extremas deberá pasar bastante tiempo.

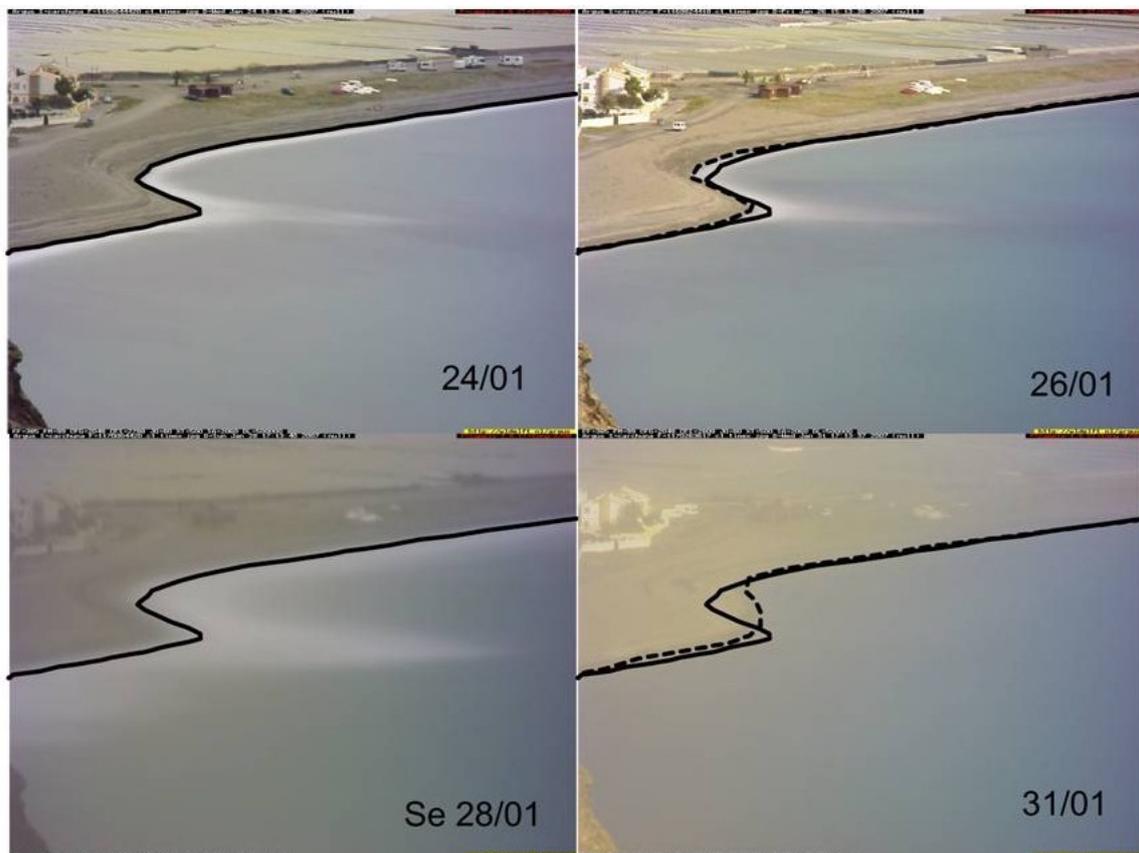


Figura 5.13: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C07-t1. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.

La última tormenta analizada es la C07-t2 que tuvo lugar entre el 12 y el 26 de diciembre de 2007, con el paso de un evento moderado el día 16 y otro extremo con la altura de ola significativa máxima de la tormenta el día 19. En este caso las imágenes también están muy localizadas en la zona de estudio y no faltan datos del sistema WANA ni de la estación de video monitorización costera.

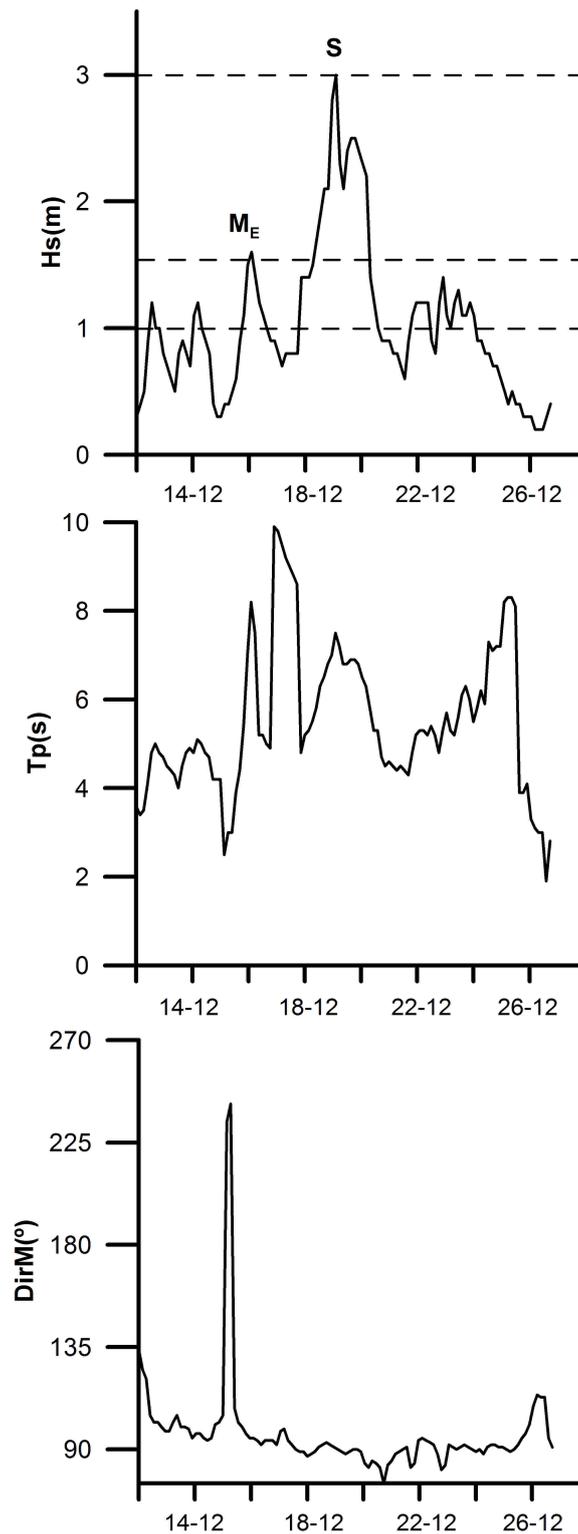


Figura 5.14: Representación para C07-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. Las líneas en discontinuo muestran los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

La evolución morfológica de esta tormenta tras analizar las video imágenes es similar a las anteriores. Uno de los aspectos diferenciadores es la presencia de una irregularidad en la línea de costa al oeste de H2. Esta está presente al inicio de la tormenta y va haciéndose cada vez más pronunciada hasta el día 16, que con el paso de Me se regulariza volviendo al perfil típico de esta playa. El perfil resultante se mantiene hasta el día 19

en el que las condiciones energéticas extremas del este provocan de nuevo una gran movilización de material que se deposita en la zona oeste de H2 como en el caso de C07-t1, con una ganancia de unos 12-15 metros. Esta línea de costa se mantiene hasta el final de la tormenta, reforzando así la impresión de que los temporales del este tienen un tiempo de recuperación y regeneración de la playa mucho más dilatado que en el caso de los que proceden del oeste.

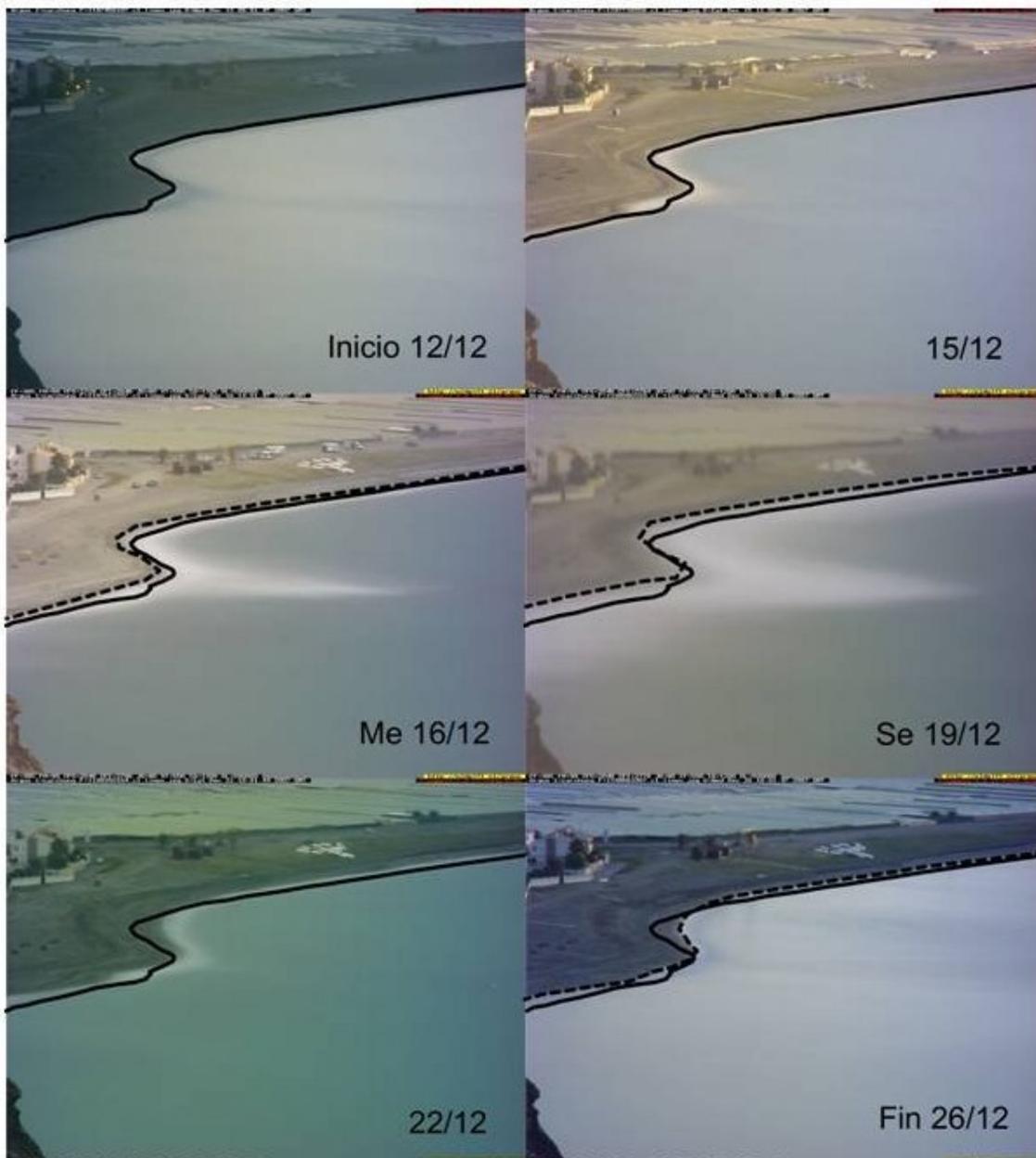


Figura 5.15: Selección de imágenes de los días más representativos de la tormenta C07-t2. La línea continua representa la posición inicial de la línea de costa. La línea discontinua representa la línea de costa en ese instante.

De esta manera, podría decirse que las tormentas procedentes del este provocan cambios más rápidos y permanentes que las del oeste, variando notablemente la línea de costa en apenas unas cuantas horas con una ganancia de playa de hasta decenas de metros. Esto ocurre con la incidencia de estados de mar extremos, ya que en el caso de los moderados no se produce una gran variación de la morfología de la costa. Los cambios producidos con respecto a la línea de costa inicial se mantienen hasta el final de la tormenta, con lo que su tiempo de recuperación es mucho mayor en este caso que en las tormentas procedentes del oeste.

5.1.4. Parámetros adimensionales

Los cuatro parámetros adimensionales descritos en el capítulo 3 han sido calculados con los datos de salida del modelo SWAN. A continuación se describen sus resultados y su comparación con la representación gráfica obtenida con Ref-Dif. También se intentará encontrar una relación entre estos resultados y las conclusiones obtenidas sobre la evolución morfológica de la playa a través de las video imágenes.

5.1.4.1. Coeficiente de propagación

El primer parámetro calculado ha sido el coeficiente de propagación, que se define como la relación de alturas de ola entre la registrada por la boya WANA y las calculadas por los modelos de propagación, es decir, el cociente entre la altura de ola propagada en cada punto de control y la altura de ola que ha sido usada como entrada en los modelos para un estado de mar y los puntos de control en el eje de abscisas (ver figura 3.5), el resultado obtenido ha sido el siguiente:

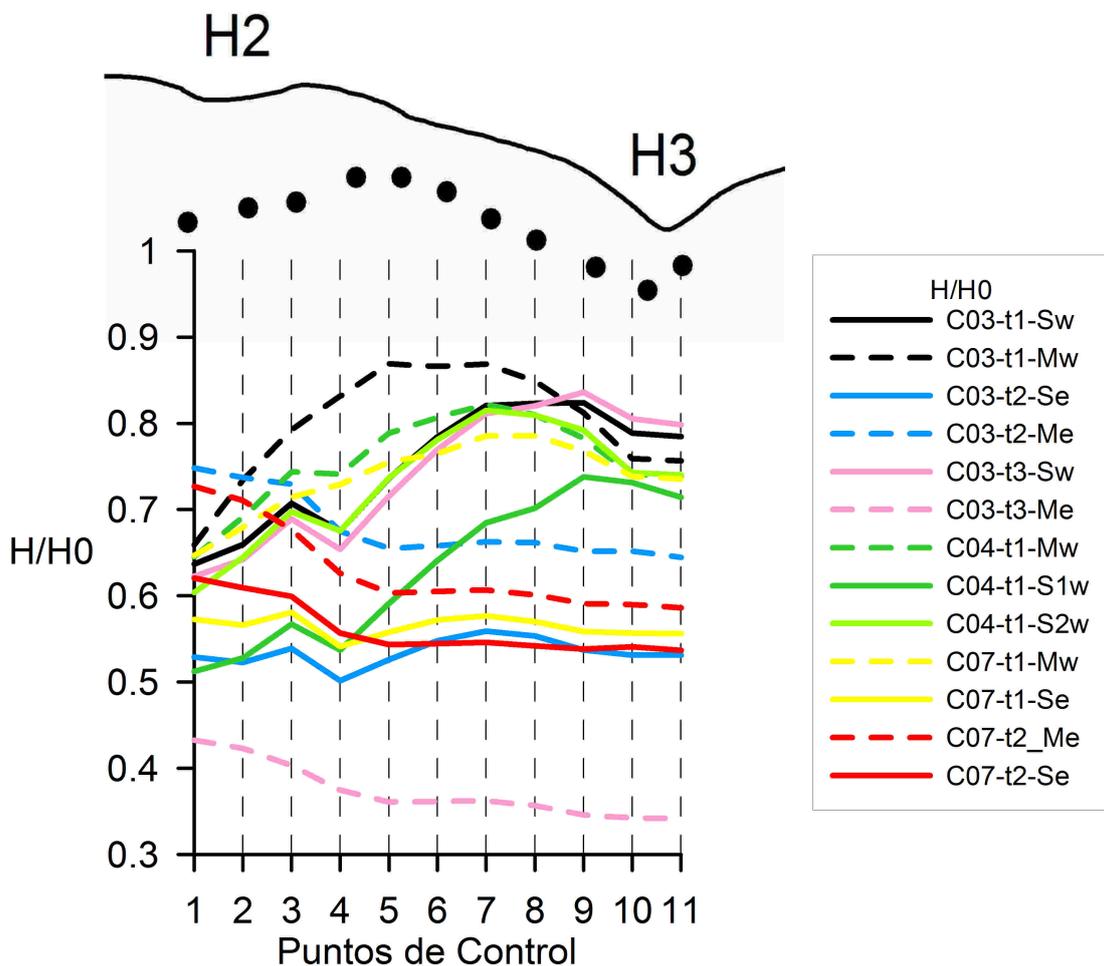


Figura 5.16: Relación de altura de ola para los estados de mar propagados en los distintos puntos de control, con la situación de ese puntos en la parte superior

Puede observarse un patrón en el comportamiento del oleaje incidente en la costa según la procedencia del mismo. En los estados de mar procedentes del oeste se puede apreciar una progresiva concentración de energía conforme nos acercamos al este, con un pequeño descenso en el punto de control número 4. A partir del punto 8 o 9 el proceso se revierte.

En el caso de los estados procedentes del este, se puede apreciar un descenso de la energía de incidencia del oleaje hasta el punto número 4, a partir del cual los valores de H/H_0 se mantienen aproximadamente constantes.

También se ha diferenciado entre aquellos estados de mar que pertenecen a condiciones energéticas moderadas (línea discontinua) y los que pertenecen a condiciones extremas (línea continua). De esta manera podemos relacionar la altura de ola con lo establecido en el modelo teórico de circulación por [?]. En este modelo se supone que en condiciones extremas el oleaje incide con una altura de ola aproximadamente constante a lo largo de la bahía, mientras que en condiciones moderadas las olas llegan con mayor H_s en la zona central de la bahía. Con los datos obtenidos con los modelos de propagación numéricos (figura 5.16), en este caso con el modelo SWAN, no se observa ese comportamiento. De hecho, los estados de mar procedentes del oeste muestran una clara concentración de energía con alturas de ola mayores en la zona este de la zona de estudio.

Este parámetro también ha sido usado para intentar relacionar los resultados de los dos modelos numéricos de propagación de la siguiente manera. Con la salida de los puntos de control se han obtenido para cada estado de mar propagado la gráfica anteriormente expuesta de H/H_0 frente a estos puntos. La tendencia mostrada por estas curvas ha sido comparada con los gráficos de flechas obtenidos del Ref-Dif (ver figura 5.2) habiendo representado previamente en ellos los puntos de control definidos por sus coordenadas, buscando si la concentración de energía se presentaba en las mismas áreas tomando como referencia estos puntos.

El resultado de esta comparación muestra que los resultados de ambos modelos no coinciden, observándose concentraciones de oleaje en zonas distintas para cada uno de ellos. Puede observarse esto en el siguiente ejemplo correspondiente al estado de mar C04-T1-mw (figuras 5.17 y 5.18):

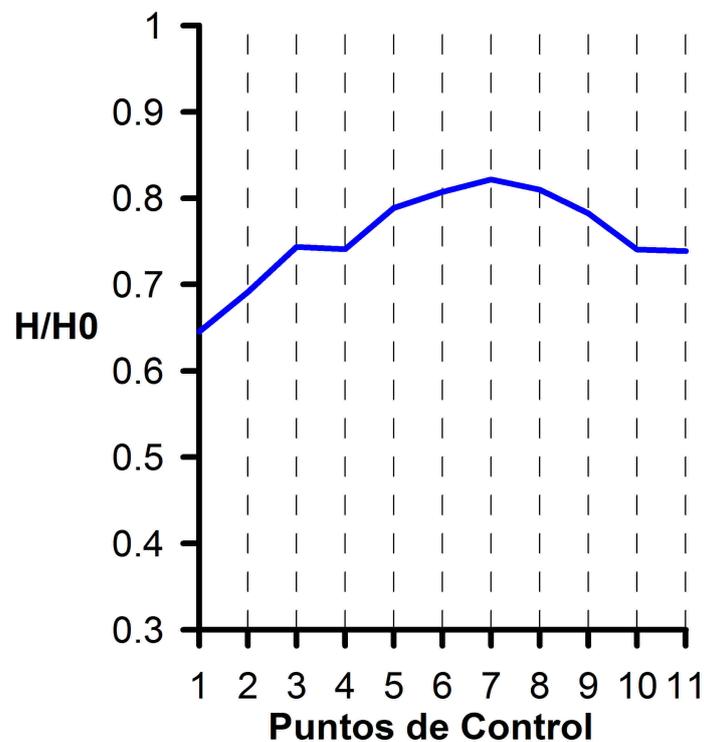


Figura 5.17: Representación de la relación de altura de ola para el estado C04-t1-mw en los distintos puntos de control.

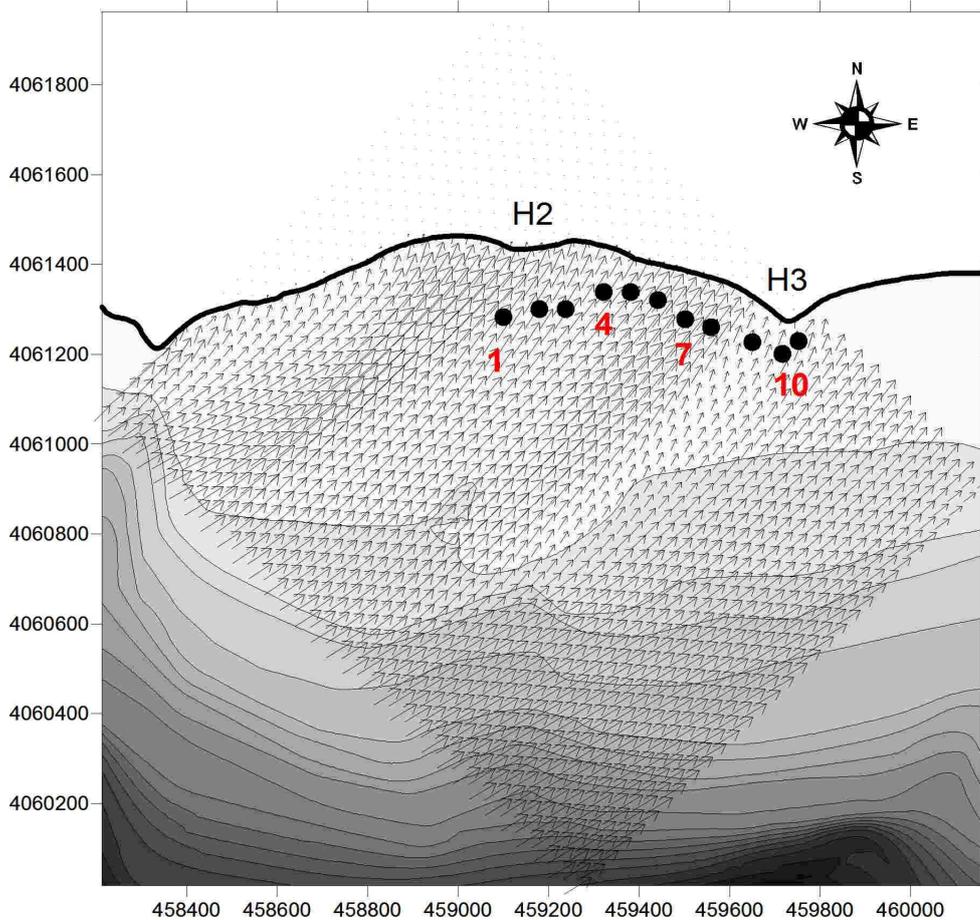


Figura 5.18: Representación gráfica para C04-t1-mw propagado con el modelo Ref-Dif en el que se representan la altura de ola y la dirección de incidencia

Este ejemplo muestra el comportamiento desigual entre los dos modelos, que se repite a lo largo de todos los estados de mar propagados. Se ha expuesto como para el caso propuesto, el modelo SWAN arroja una sola zona de concentración de energía alrededor del punto 7 (Figura 5.17), pero el modelo Ref-Dif obtiene otra zona de concentración muy importante en los 2 primeros puntos de control (Figura 5.18).

Estas diferencias pueden deberse a las diferentes ecuaciones y condiciones de contorno que gobiernan cada uno de los dos modelos, ya que los datos de entrada y la batimetría introducida en ellos han sido idénticos para poder llevar a cabo un análisis de la fiabilidad en la propagación de los estados de mar. También pueden deberse a la precisión de los cálculos, ya que aunque para este tipo de estudios es necesario la colocación de puntos de control relativamente cercanos, la precisión de los cálculos de los modelos teniendo en cuenta la irregularidad de la batimetría y la modelización numérica de la zona de estudio podría no ser suficiente.

5.1.4.2. Número de Iribarren

En cuanto al número de Iribarren, definido en el capítulo 3 como:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

se ha calculado para esta playa con una pendiente media de $\tan \beta = 0,12$. Para los estados de mar seleccionados el resultado ofrecido por el modelo SWAN ha sido en siguiente:

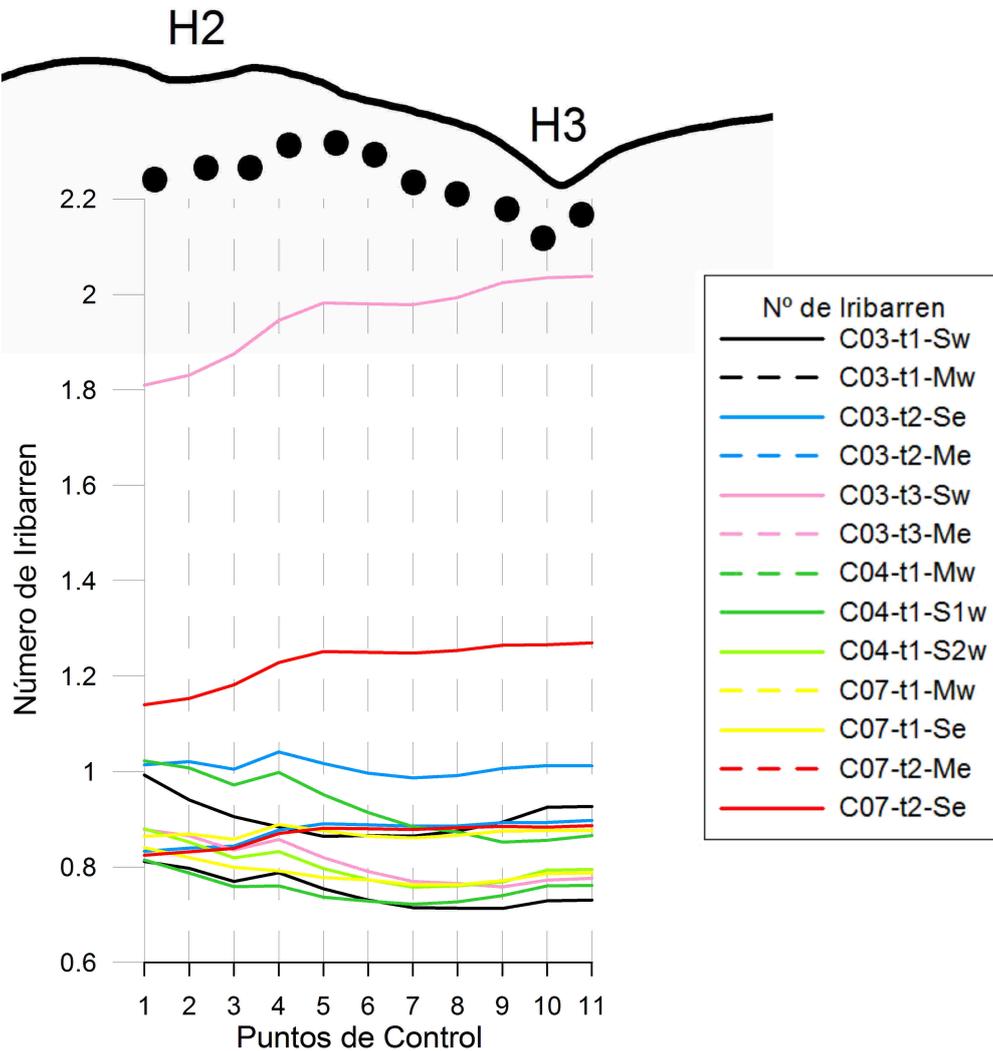


Figura 5.19: Número de lribarren para los estados de mar propagados en Carchuna en los distintos puntos de control, con la situación de ese puntos en la parte superior

Puede observarse como se produce una cierta tendencia, con un pico entorno al punto de control 4 y después un tramo convexo moviéndonos hacia el sureste para acabar con otro pico alrededor del punto de control 10 a partir del cual el número de lribarren permanece aproximadamente constante.

Es de reseñar que para aquellos estados de mar que poseen un periodo de pico superior a 10 segundos el número de lribarren se dispara, perdiendo la tendencia anteriormente descrita. El ejemplo más claro es el estado C03-t3-me, con un periodo de 12,3 segundos, que alcanza valores superiores a 2 (Figura 5.19). Teniendo en cuenta la definición de este parámetro, en todos los estados de mar habría rotura en voluta ya que $lr > 0,5$, salvo en el caso de C03-t3-me en el que la rotura podría producirse por colapso, aumentando la disipación de energía y turbulencia, favoreciendo el transporte de sedimentos. Esto también puede indicar que el modelo SWAN no simula correctamente los estados de mar con periodos de pico elevados, introduciendo errores en la propagación que desvirtúan los resultados.

5.1.4.3. Velocidad de caída adimensional

Este tercer parámetro adimensional viene definidor por:

$$N_0 = \frac{H}{\omega_s T}$$

con:

$$\omega_s = \frac{\mu}{\rho D} \left[\sqrt{(10,36^2 + 1,049 D_*^3)} - 10,36 \right]$$

y:

$$D_* = D_{50} \left[\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3}$$

Los valores para los distintos parámetros han sido $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ y $\nu = \frac{\mu}{\rho_w} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ como la viscosidad molecular. Como ya se ha comentado en el capítulo 2, la playa de Carchuna posee sedimentos de tamaño heterogéneo. Por ello, para el tamaño del sedimento D_{50} se han usado dos medidas, una de 2 mm y otra de 0.35 mm (Figura 2.3). Por ello se han obtenido dos series de resultados que se pueden representar de la misma forma que los parámetros anteriores.

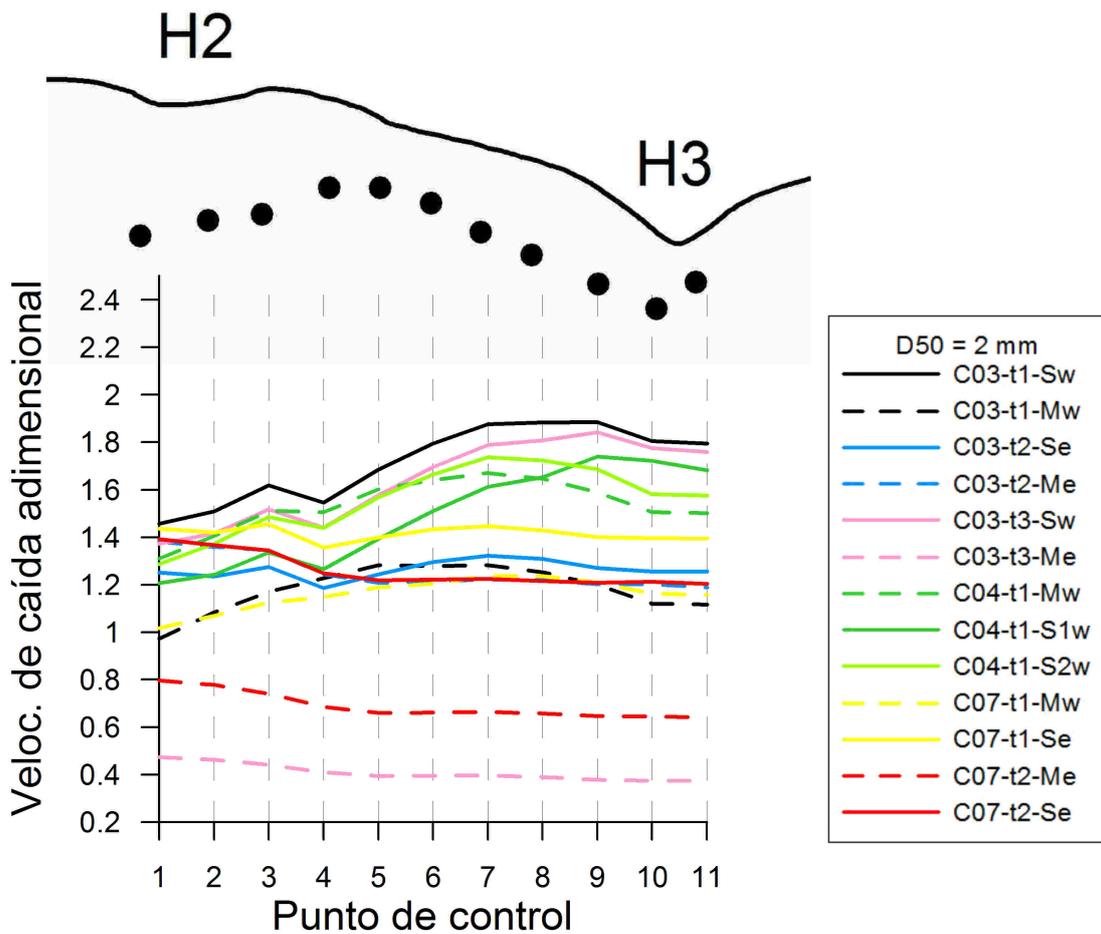


Figura 5.20: Velocidad de caída adimensional para $D_{50} = 2 \text{ mm}$ en Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior

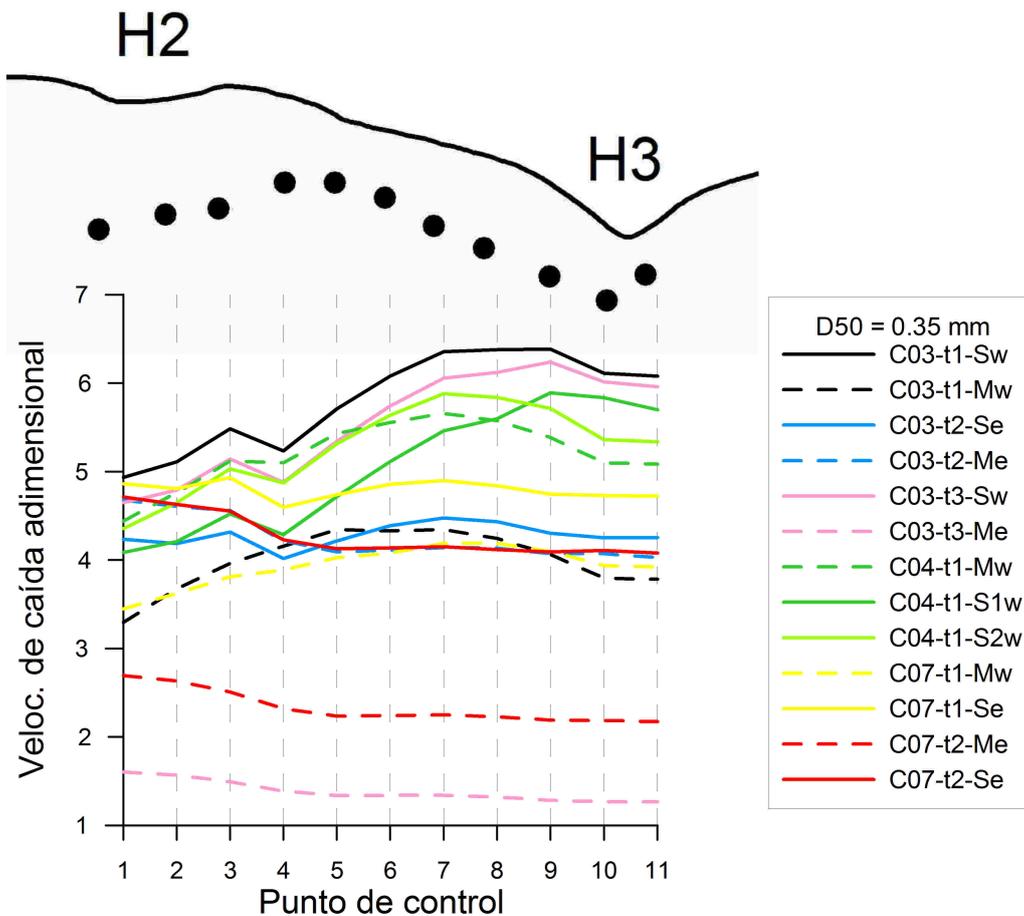


Figura 5.21: Velocidad de caída adimensional para $D_{50} = 0,35 \text{ mm}$ en Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior

Para $D_{50} = 2 \text{ mm}$ (Figura 5.20), que son las partículas más gruesas, en ningún caso se alcanza la velocidad de caída límite para asegurar la erosión, que se encuentra en el entorno de 3.5, pero se puede observar una tendencia para cada dirección de incidencia que coincide con la encontrada en la relación de alturas de ola (ver figura 5.16). Por tanto, el punto de control 4 y los que van desde el 7 al 9 se encuentran más cerca del inicio de erosión en aquellos estados de mar que proceden del oeste. Para los del este, los puntos más cercanos a la erosión son los más occidentales, aunque el comportamiento de estos estados de mar es más estable que el caso anterior.

En el caso de $D_{50} = 0,35 \text{ mm}$ (Figura 5.21), nos encontramos con las partículas más susceptibles a la erosión, ya que su inicio de movimiento se produce antes. Por eso, bajo las mismas condiciones encontramos que estas partículas sí superan el umbral de movimiento, salvo en el caso de dos estados de mar, el C03-t3-me cuyo periodo de pico es mucho mayor que el del resto (ver cuadro 5.4) y el c07-t2-me. En estos dos casos parece que no habría ningún tipo de erosión, produciéndose para las partículas finas en el resto. En cuanto a las tendencias, son las mismas que en el caso de $D_{50} = 2 \text{ mm}$ ya que el único dato de entrada que cambia es precisamente el D_{50} .

Por tanto, puede observarse que en caso de la incidencia de condiciones extremas que provengan del oeste, se produciría una mayor erosión en la parte este de la bahía, donde se movilizaría la mayoría del material fino. En el caso de condiciones medias con la misma dirección, la mayoría del material se movilizaría en el centro de la bahía. Este sedimento podría ser el que iría a parar en los extremos de la bahía, acelerando el proceso de recuperación de la playa visto anteriormente para tormentas con esta dirección.

Para las que provienen del este se observa que el sedimento se moviliza más regularmente a lo largo de la playa, ya que las curvas tienden a ser casi horizontales (figura 5.21). El hecho de que en la sección 5.1.3.3 se

haya observado un crecimiento repentino de la playa en la parte oeste de la bahía, puede venir inducido por al depósito de todo ese sedimento movilizado regularmente debido a un oleaje de menor contenido energético pero de procedencia este, y que tiene lugar después del episodio extremo.

5.1.4.4. Peralte de la ola

El peralte de la ola, calculado como

$$p = \frac{H}{L}$$

está relacionado con la rotura de la misma, ya que según el tipo de onda en estudio existen valores límite de peralte de ola para que la rotura tenga lugar. En el caso de los puntos de control elegidos, con ondas progresivas y que se encuentran en profundidades reducidas ($kH < \frac{\pi}{10}$) y un fondo aproximadamente horizontal, se tiene que para la rotura:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{lim} = 0,14kh = 0,14\frac{2\pi}{L}h$$

Conforme mayor sea el valor del peralte, mayor proporción de ola incidentes llegarán a la rotura. Al igual que en los parámetros anteriores, pueden representarse los datos obtenidos en los modelos numéricos en una gráfica con todos los estados de mar para cada punto de control (Figura 5.22).

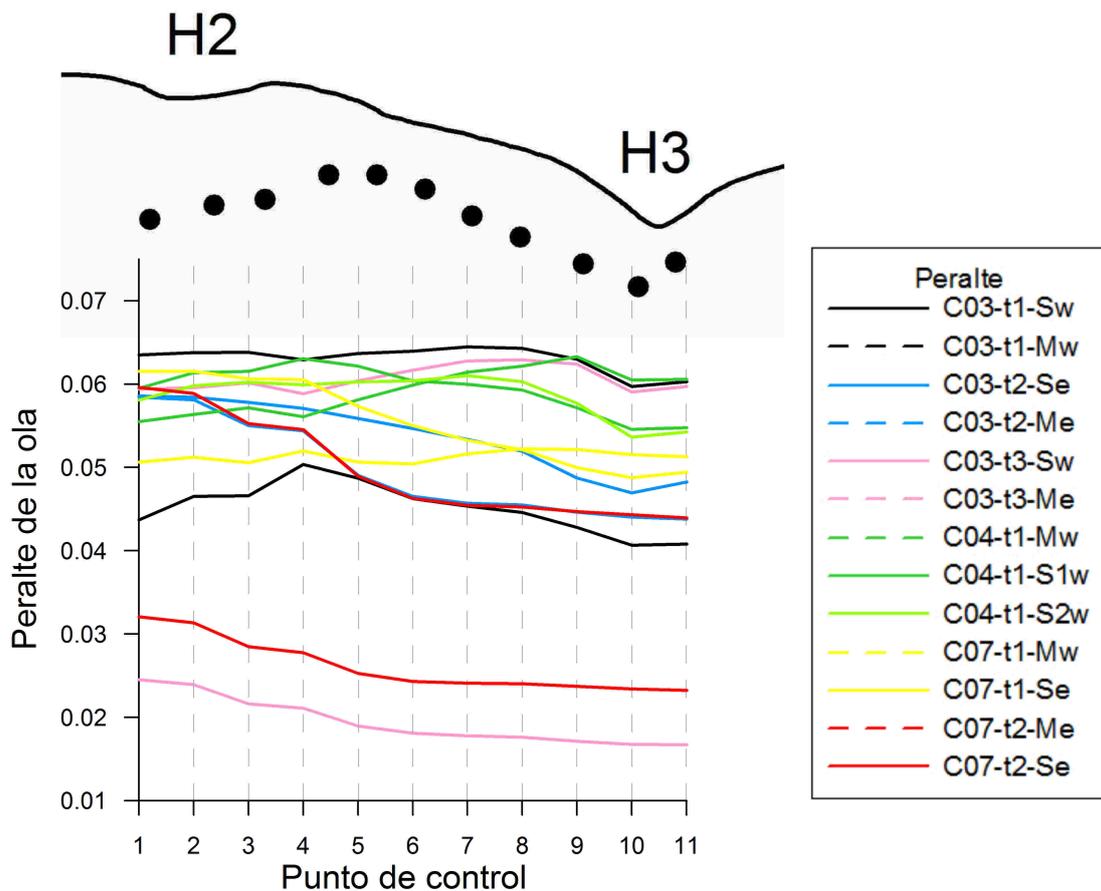


Figura 5.22: Peralte de la ola para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Carchuna, con la situación de los puntos de control en la parte superior

En este caso (Figura 5.22), también puede observarse un cierto patrón de comportamiento en los estados representados para cada dirección de incidencia. Los que proceden del oeste, mantienen un peralte aproximada-

mente constante a lo largo de playa hasta la zona cercana a H3 (últimos puntos de control), en la que se observa una disminución, con lo que aparentemente el porcentaje de rotura será menor.

En el caso de los datos procedentes del este, se observa una disminución paulatina del peralte conforme se avanza hacia el este, con lo que en estos estados de mar el porcentaje de rotura también disminuye en el entorno de H3.

5.1.5. Conclusiones parciales

Tras el análisis de la evolución morfológica de la playa a través de las video imágenes y de los datos obtenidos por los modelos de propagación numérica, pueden obtenerse las siguientes conclusiones parciales para Carchuna:

- El comportamiento de la playa es distinto según la procedencia del oleaje, que en este caso puede tener incidencia aproximadamente este u oeste.
- En el caso de oleaje extremo incidente desde el oeste, la respuesta de la playa es erosión generalizada a lo largo de ella con una concentración en el este, siempre con movilización del sedimento fino (figura 5.21) y la posible formación de barras. El perfil se ve suavizado. La pérdida de anchura de playa empieza paulatinamente a ser recuperada alcanzando un perfil intermedio, proceso que puede verse acelerado por eventos moderados que movilicen sedimento en el centro de la bahía arrastrándolo hasta los extremos (figura 5.6). Tras esto el perfil vuelve rápidamente a su estructura original (figura 5.9). El tiempo de recuperación de la playa es relativamente corto, ya que en una semana tras el pico de la tormenta la playa casi ha llegado de nuevo a su forma y perfil original.
- Para los eventos extremos procedentes del este, la erosión se produce de forma más regular a lo largo de la playa (también de sedimento fino). Todo el material movilizado se deposita en horas en la parte este de la bahía, con una ganancia de hasta decenas de metros de anchura de playa en apenas 24 horas (figura 5.13). Esta nueva línea de costa se mantiene hasta el final de la tormenta, lo que indica un tiempo de recuperación mucho más largo hasta que la playa alcance su forma y perfil original.
- Con respecto a los estudios anteriores en la zona, todo parece confirmarlos salvo dos aspectos. El primero de ellos es la definición de los umbrales, ya que se ha comprobado que estos deberían ser revisados al encontrarse que oleaje clasificado como medio produce erosión y cambios en la línea de costa (figura 5.8). El otro es la distribución de alturas de ola según las condiciones enérgicas, ya que se ha obtenido una distribución no uniforme de altura de ola en condiciones extremas con mayores valores de esta en la parte oeste de la bahía (figura 5.16), al contrario de lo explicado en el modelo teórico de circulación que se obtuvo en trabajos previos.
- Los modelos de propagación numérica arrojan valores distintos según el modelo usado, con variaciones entre ellos de decenas de metros en cuanto a zonas de concentración de energía. Además, para estados de mar con periodos de pico altos, no parecen arrojar datos fiables. Esto puede ser debido tanto a la distinta formulación de SWAN y Ref-Dif (ver apéndices) como al hecho de que a pesar de usar los mismo datos de entrada, la precisión de estos modelos no es la suficiente como para realizar estudios precisos a esa escala. Por tanto, pueden servir como apoyo para este tipo de análisis pero siempre bajo la comparación con datos reales obtenidos en la zona de estudio (en este caso las video imágenes) con los que se pueda establecer la fiabilidad de los cálculos realizados.
- Dado que la recuperación de la playa se produce con gran rapidez (menos de una semana) para las tormentas que inciden desde el oeste, para este tipo de situación no es necesario llevar a cabo actuaciones por parte de las administraciones para paliar el efecto de los temporales. Para el caso de tormentas provenientes del oeste, no puede asegurarse con certeza cuál es el tiempo de regeneración de la playa, por lo que no se puede asegurar que no hagan falta ese tipo de actuaciones. Sin embargo, parece poco probable que los cambios producidos por este tipo de temporales tengan persistencia más allá del corto-medio plazo.

5.2. Playa disipativa: Trafalgar

A continuación se describen y analizan los resultados obtenidos para la playa de Trafalgar, ejemplo representativo del litoral atlántico andaluz caracterizado por playas disipativas con suaves pendientes y tamaño de sedimento homogéneo fino-medio.

5.2.1. Tormentas seleccionadas

Tras el estudio de los histogramas anuales realizados para la playa de Trafalgar con respecto a la altura de ola H_s , se han encontrado 9 tormentas cuyo valor de H_s supera los 3 metros durante los 4 años meteorológicos estudiados (de 2003 a 2007). El resultado con una breve descripción de cada una de ellas se muestra en el cuadro 5.3.

Tormenta	Fecha inicio	Fecha pico	Fecha final	Hs max
T03-t1	24/10/2003 00h	31/10/2003 15h	07/11/2003 12h	6.2
T03-t2	09/11/2003 00h	16/11/2003 00h	23/11/2003 21h	4.0
T03-t3	03/12/2003 03h	10/12/2003 03h	17/12/2003 06h	4.6
T04-t1	26/04/2004 03h	03/05/2004 12h	12/05/2004 21h	5.4
T05-t1	18/03/2005 21h	26/03/2005 21h	03/04/2007 06h	4.4
T06-t1	12/02/2006 15h	04/03/2006 06h	25/03/2007 00h	3.1
T06-t2	15/10/2006 00h	26/10/2006 18h	02/11/2007 18h	3.4
T06-t3	17/11/2006 12h	24/11/2006 00h	02/12/2007 18h	3.3
T07-t1	10/02/2007 15h	17/02/2007 00h	26/02/2007 21h	3.0

Cuadro 5.3: Tormentas encontradas durante el periodo de estudio para la playa de Trafalgar. Se describe su fecha de inicio, de pico y final, y la altura de ola significativa máxima.

5.2.2. Propagación de estados de mar

A continuación se muestran los resultados obtenidos tanto con Ref-Dif como con SWAN en la propagación numérica de esta playa, con la modelización numérica de las zonas de estudio descrita en 4.3.

5.2.2.1. Estados de mar seleccionados

Los estados que representan los valores más significativos y que han sido elegidos para ser introducidos en los modelos han sido, en el caso de Trafalgar:

Estado de mar	Fecha	Hs (m)	Tp (s)	Dir	V. v. (m/s)	D. v.
T03-t1-s1	28/10/2003 00h	3,3	10,2	28	8,4	55
T03-t1-s2	31/10/2003 15h	6,2	10,2	2	17,4	0
T03-t1-mT	07/11/2003 15h	2,8	19,8	346	6,7	154
T03-t2-s	16/11/2003 00h	4,0	11,2	6	8,5	345
T03-t3-msw	06/12/2003 09h	2,8	7,6	55	12,1	92
T03-t3-s	10/12/2003 00h	4,6	12,3	356	12,1	328
T04-t1-s1	03/05/2004 03h	5,4	9,4	8	19	0
T04-t1-s2	05/05/2004 21h	3,1	7,8	358	13,8	4
T05-t1-mw	22/03/2005 03h	2,4	12,6	4	4,3	47
T05-t1-s	26/03/2005 12h	4,4	16,6	1	8,6	17
T06-t1-s1	19/02/2006 18h	3,0	9	354	8,1	347
T06-t1-s2	04/03/2006 21h	3,1	8,8	16	9,9	32
T06-t1-s3	17/03/2006 21h	3,0	14,9	8	7,7	68
T06-t1-mw	26/02/2006 15h	2,2	8	4	10,2	342
T06-t2-s1	18/10/2006 12h	3,4	7,2	39	13,1	63
T06-t2-mw	23/10/2006 12h	2,1	7,4	39	9,3	64
T06-t2-s2	26/10/2006 12h	3,3	12,6	17	9,1	79
T06-t3-s	24/11/2006 18h	3,3	9,2	39	11,8	69
T07-t1-s	17/02/2007 00h	3,0	7,5	359	13	359
T07-t1-mt	21/02/2007 00h	2,3	6,2	340	10,2	303
T07-t1-mT	23/02/2007 00h	2,7	18,1	7	4,8	347

Cuadro 5.4: Estados de mar seleccionados para el estudio en la playa de Trafalgar. Por columnas: estado de mar, altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de procedencia, velocidad del viento, dirección del viento.

5.2.2.2. Resultados de la propagación

Como ya se ha comentado en el caso de la playa de Carchuna, los resultados obtenidos por los modelos pueden ser comparados para comprobar si ambos simulan de manera similar las condiciones de oleaje de la zona de estudio. Aunque en este caso no se dispone de campaña de campo para ser comparados con datos reales de oleaje tomados en profundidades cercanas a la zona de rompientes, puede hacerse un estudio comparativo entre ambos modelos utilizando los parámetros adimensionales resultado de la propagación mediante SWAN y los gráficos obtenidos con el modelo Ref-Dif (figura 5.23), ya que como se ha descrito para el caso de Carchuna, los gráficos obtenidos con SWAN no presentan el suficiente detalle (figura 5.24). Esta comparación se llevará a cabo en la sección correspondiente a parámetros adimensionales.

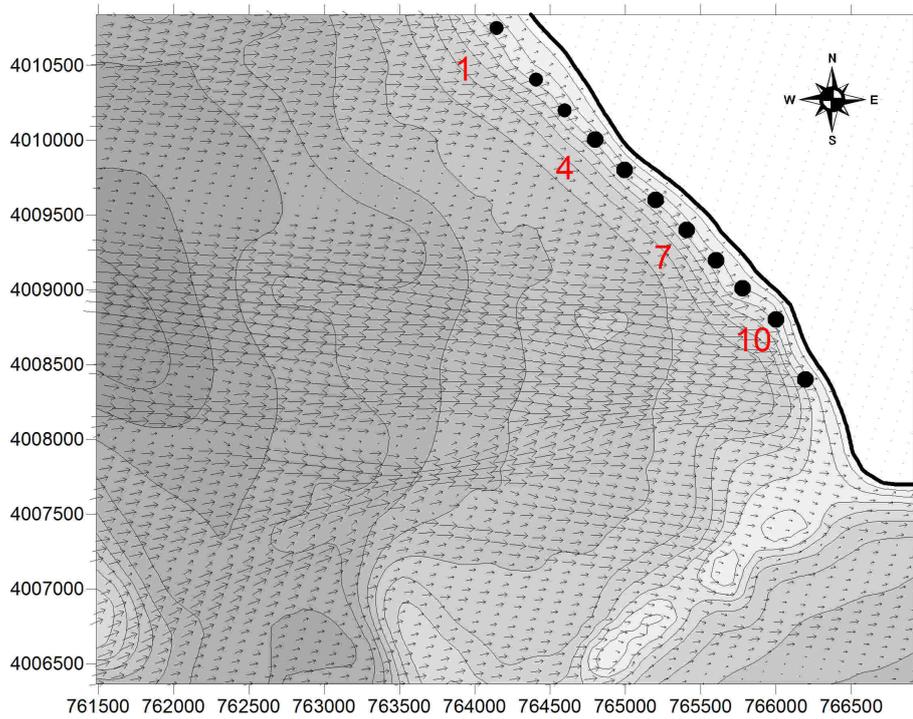


Figura 5.23: Representación gráfica sobre imagen batimétrica del resultado de la propagación mediante el modelo Ref-Dif para el estado de mar T03-t1-S1, para el que se representan la altura de ola (módulo de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores).

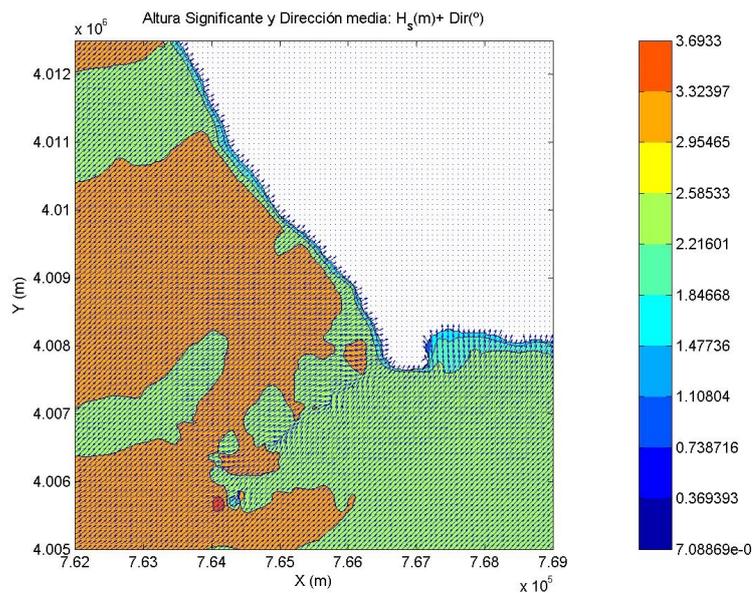


Figura 5.24: Representación gráfica del resultado de la propagación mediante el modelo SWAN para el estado de mar T03-t1-S1. A la derecha escala de altura de ola. La dirección de incidencia aparece representada mediante vectores.

5.2.3. Evolución morfodinámica

La evolución morfodinámica de la playa de Trafalgar posee mayor complejidad que en el caso de Carchuna, ya que el número de factores condicionantes es mayor y más complejo. El clima marítimo es más severo, con mayores alturas de ola y periodos de paso por cero. Estos dos parámetros son los que determinan el comportamiento de la playa, a diferencia de Carchuna en la que las magnitudes forzadores más importantes eran la altura de ola y la dirección de incidencia. Esto se debe a que en Trafalgar el oleaje incide con una variabilidad muy pequeña en cuanto a su dirección (ver figura 2.23) que incluso se ve mermada una vez propagados los estados de mar. Sin embargo, el periodo de pico de la onda adquiere mucha importancia resultando un factor determinante en el estudio de la playa y por tanto en la gestión del litoral en la zona de estudio. También adquiere un peso muy importante la marea, tanto astronómica como meteorológica, ya que la carrera media de marea llega aquí a los 2 metros, alcanzando máximos de más de 3 metros. Además, el sedimento fino se mueve más fácilmente

5.2.3.1. Imágenes seleccionadas

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se va a seleccionar imágenes distintas (ver capítulo 3). Dada la influencia de la marea se han escogido para cada día de tormenta las imágenes correspondientes a la marea alta y baja dentro del periodo de luz solar, para poder estudiar así variaciones en el perfil y posición de la línea de costa.

Dada la gran longitud de la zona de estudio, que llega a los 2 km, se han escogido las imágenes de las cámaras C1 y C3 de las tres existentes, ya que con ambas se cubre toda la longitud de la playa quedando la zona intermedia (C2) cubierta por el solape de las dos cámaras seleccionadas (ver figura 2.16). De esta forma se obtienen para cada día cuatro imágenes:

- Imagen de marea baja de la cámara C1
- Imagen de marea alta de la cámara C1
- Imagen de marea baja de la cámara C3
- Imagen de marea alta de la cámara C3

Tras el estudio de las imágenes seleccionadas para Trafalgar, se han encontrado dos fenómenos que condicionan la morfología de esta playa:

- La línea de costa no sufre cambios en planta en cuanto a su forma tras el paso de una tormenta. De hecho, no se observan variaciones significativas tras los cuatro años que comprende este estudio en su posición, como tampoco se observan tras el paso de varias tormentas seguidas en periodos continuados de mal tiempo. Esto se debe a que Trafalgar es una playa situada entre dos puntos fijos que provocan que la playa bascule entre ellos sin que haya grandes cambios de forma en planta debidos a los procesos de circulación, es un volumen de control cerrado.
- El perfil de la playa se ve sometido a constantes cambios. Además, estos se producen con gran rapidez y de manera heterogénea, adoptando distintos perfiles según la zona de playa que se estudie (figura 2.16).
- Se observan cortos periodos de tiempo en los que el nivel del agua alcanza zonas de tierra alejadas centenares de metros de la línea de costa media de la playa, hecho que habrá que estudiar con especial atención ya que sus efectos son los que más interferirán en las actividades humanas.

Por todo ello, se ha hecho un estudio detallado de la evolución del perfil y la morfología de esta playa, observando los cambios que se producen día a día dentro de las tormentas seleccionadas, comparando imágenes desde antes de que empiece a aumentar la altura de ola hasta que se vuelve a condiciones energéticas medias (oleaje más débil), pasando por todas aquellas imágenes tomadas los días de mayor oleaje.

5.2.3.2. Evolución de la morfología

Para poder llevar a cabo este análisis se ha recurrido a la clasificación de perfiles propuesta para Trafalgar (Ortega-Sánchez *et al.*, 2008), realizada después de un estudio con video imágenes y con modelos de propagación numérica para describir y analizar la evolución de las formas que aparecen en la zona de estudio. Usando esta clasificación, podemos encontrar cinco tipos de perfiles básicos en esta playa:

- **Grandes formas cuspidales (LBC):** el perfil se caracteriza por la existencia de grandes formas cuspidales con un espaciamiento medio de 30m que varía a lo largo de la playa, siendo mayor en las cercanías del cabo que en el extremo norte. Estas formas sobresalen siempre al menos 5 metros llegando a los 50 metros en algunas ocasiones.
- **Pequeñas formas cuspidales (SBC):** existen pequeñas formas cuspidales en la parte alta de la playa, cerca de la zona donde llega el agua cuando la marea está mas alta. Su amplitud vertical puede ser superior a 1.5 metros y su espaciamiento ronda los 20 metros, ocurriendo como en el caso anterior en el que hay variabilidad a lo largo de la playa. En este caso no sobresalen mas allá de los 5 metros. Este último parámetro es el que diferencia claramente a este perfil del anterior.
- **Terraza mareal (LTT):** el perfil se caracteriza por la presencia de crestas interrumpidas por canales de drenaje perpendiculares a la línea de costa. La parte baja de este se caracteriza por suaves pendientes ($< 0,01$) y tiende a ser horizontal. En la parte alta pueden encontrarse bermas o incluso una morfología cuspidal. El espaciado de los canales de drenaje es de aproximadamente 60 metros, no estando relacionados con la formación de formas cuspidales.
- **Berma y playa plana (PBB):** el perfil es un plano que termina en una berma situada en la zona de máximo nivel del agua diario.
- **Playa plana (PB):** la playa tiene un perfil plano con pendientes medias de 0.01 y no se observa ninguna otra forma significativa

En este trabajo se analizaron distintos estados de mar. Para el caso de aquellos que pertenecían a condiciones energéticas elevadas se encontró que sólo aparecían grandes formas cuspidales (LBC) muy estables y que sólo en el caso de que la altura de ola significativa H_s superara los 4 metros aparecían otras formas como la playa plana (PB). Las LBC podían ser consideradas como las formas básicas o típicas de la playa que en cualquier caso estaban presentes casi un 70 % del tiempo, aumentando ese porcentaje en condiciones energéticas extremas. Además, la estabilidad de las otras morfologías dependía del tiempo que permanecieran las condiciones forzadoras que habían conducido a su creación, con lo que para estados de mar muy energéticos pero puntuales los cambios en la morfología duraban muy poco.

Por tanto, es de esperar que al observar las imágenes de las tormentas seleccionadas se encuentren fundamentalmente estas grandes formas cuspidales (LBC). Esta hipótesis se confirma, ya que en la mayoría de tormentas seleccionadas puede observarse esta morfología durante casi todo el periodo de ocurrencia. Sólo en algunos casos se aprecian otro tipo de formas como berma plana (PBB) al comienzo de la misma, creadas por condiciones con muy bajo contenido energético previas a la tormenta. Estas formas desaparecen conforme aumenta la severidad del oleaje, volviendo la playa a tener morfologías LBC. Cuando el estado de mar de pico supera aproximadamente los 4 metros de altura de ola significativa la morfología cambia para todas las tormentas en las que eso tiene lugar, pasando a tener una morfología de playa plana (PB). En todos estos casos, tras el paso del pico y un periodo de tiempo dependiente de la duración de las condiciones extremas, la playa vuelve a la forma más estable de grandes formas cuspidales (LBC).

Para ilustrar este comportamiento, puede tomarse como ejemplo el caso de la tormenta T03-t1. En ella la secuencia de eventos (figura 5.25) consiste en el paso de un primer pico de 3.3 metros de altura de ola significativa el día 28 de octubre, seguido de un segundo pico el 31 del mismo mes con 6.2 metros de altura de ola. Finalmente aparece un estado moderado con un gran periodo de pico el día 7 de noviembre.

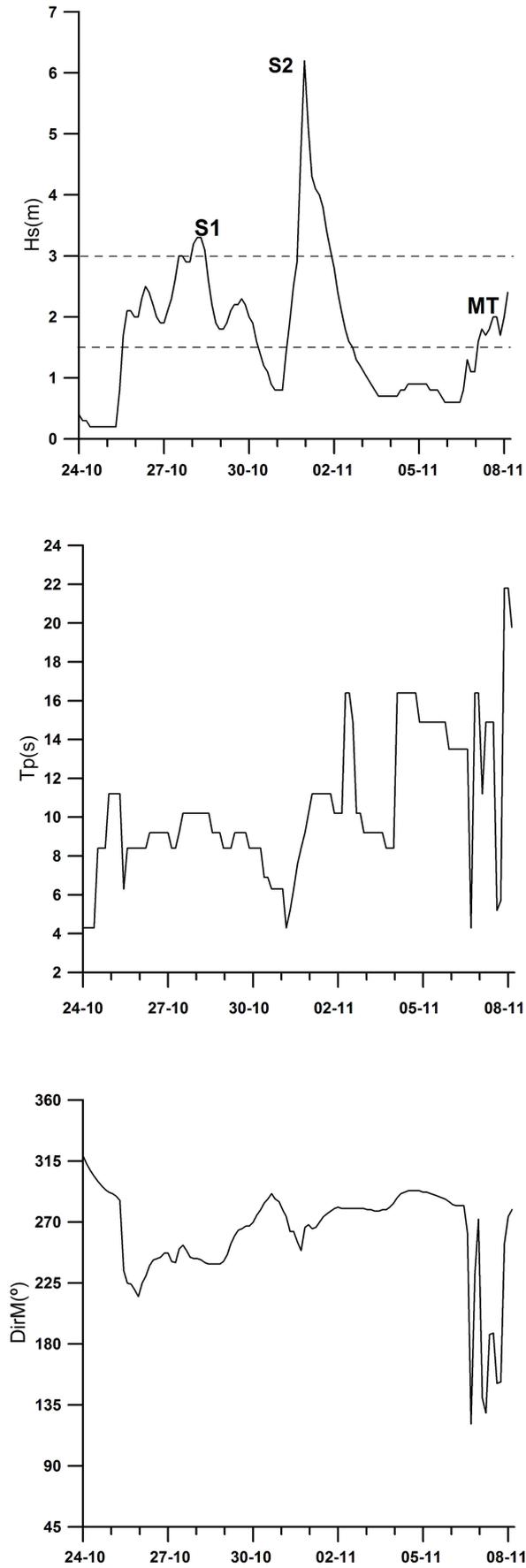


Figura 5.25: Representación para T03-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

Analizando las imágenes para esta tormenta, puede observarse (figura 5.26) que al principio existe berma plana (PB) en la zona C1 y pequeñas formas cuspidales (SBC) en C2 y C3. Estas formas forman van desapareciendo en favor de la aparición de grandes formas cuspidales. Al pasar el pico S2 el día 31 de octubre con $H_s = 6,2m > 4m$, la playa adquiere un perfil plano. Ya que este pico tiene una costa duración (figura 5.25), en pocos días se alcanzan de nuevo las grandes formas cuspidales que se observan al final. El paso del evento MT, con $T_p = 19,8s$ provoca una súbita subida de la cota máxima de inundación que se estudiará en la siguiente sección.

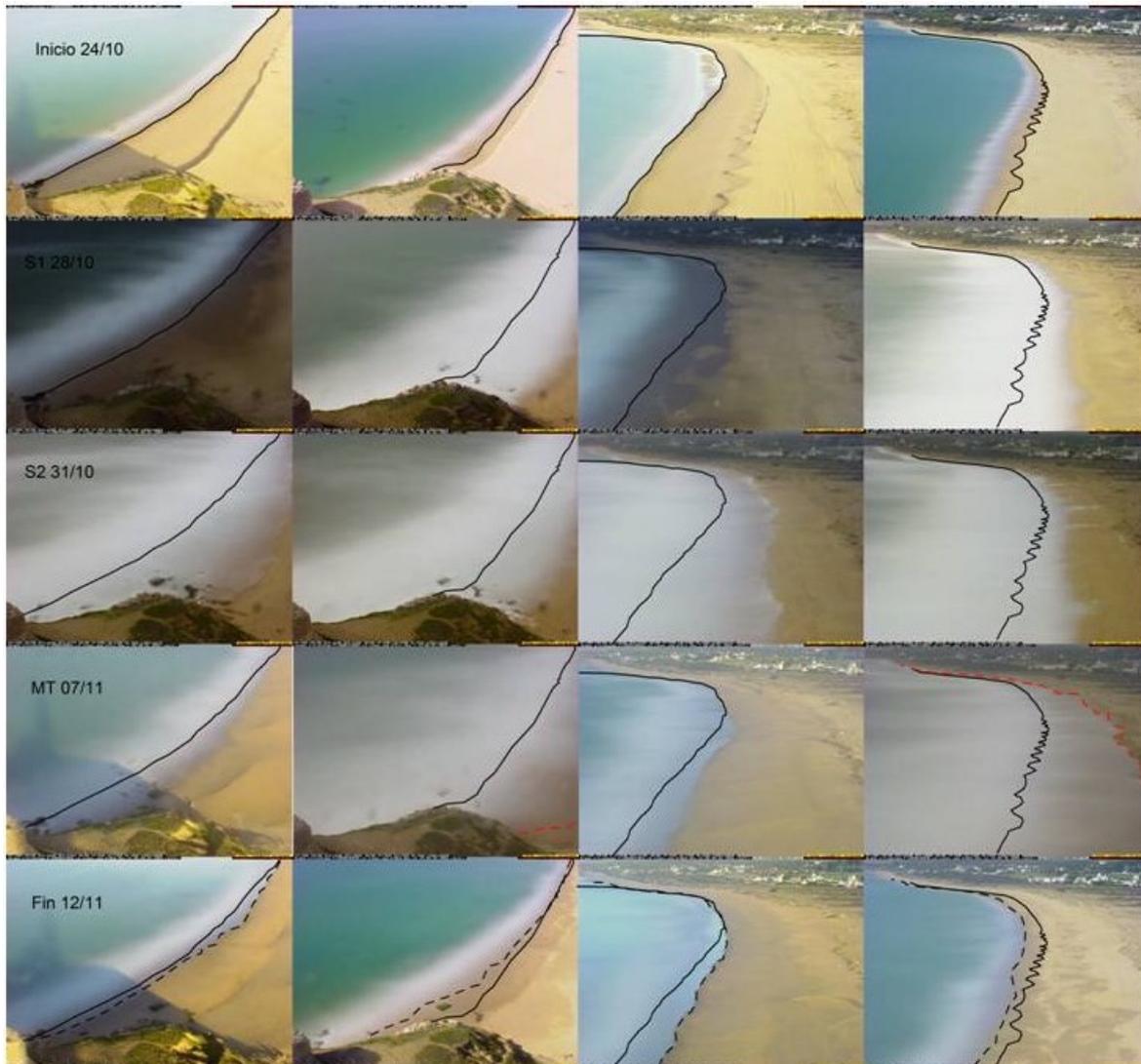


Figura 5.26: Selección de imágenes más representativas de la tormenta T03-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.

Por tanto, en cuanto a la morfología de la playa de Trafalgar en condiciones de tormenta, puede decirse que coincidiendo con los estudios anteriores, las grandes formas cuspidales (LBC) son las formaciones típicas y más estables, estando presentes la mayoría del tiempo de tormenta y sustituyendo a cualquier morfología anterior generada por otras condiciones de oleaje. Sólo en el caso de que la altura de ola supere los 4 metros (como ya estudiaron Ortega-Sánchez *et al.* 2008) puede observarse que las LBC desaparecen para la formación de playa plana (PB), cuya duración depende de el tiempo que la altura de ola haya superado ese valor, ya que después vuelven a formarse de nuevo las grandes formas cuspidales. Por tanto, habrá que considerar la posibilidad de revisar los umbrales elegidos para Trafalgar, ya que el hecho de que el oleaje supere los 3 metros de altura de ola (umbral para condiciones energéticas extremas) no parece implicar cambios significativos en la playa.

5.2.3.3. Evolución transversal de la línea de costa

Como ya se ha comentado, una de las características de la playa de Trafalgar es la variabilidad de la morfología en una dirección transversal a la costa. Dentro de esta variabilidad habrá que estudiar todas aquellas características de la playa que varíen según las características del oleaje incidente. Para esta playa se ha encontrado que existen tres grandes aspectos a estudiar, que condicionan el comportamiento de esta zona de estudio bajo condiciones energéticas extremas.

- **Posición de la línea de costa**

La posición de la línea de costa varía según va transcurriendo la tormenta, debido a los cambios en la altura de ola incidente que cambian el perfil de la playa y el movimiento de la superficie libre debido a marea astronómica y meteorológica. Después del estudio de las imágenes seleccionadas, se ha encontrado que la posición de la línea de costa presenta variaciones de algunos metros (< 10 m) durante los periodos de estudio. Estas variaciones parecen venir más determinadas por cambios en la marea que por cambios en el oleaje incidente, ya que se aprecian mayores diferencias entre imágenes del mismo día con marea distinta que entre imágenes de días consecutivos con el mismo estado de marea. Además dicha línea de costa no sobrepasa la posición de la parte más elevada de las grandes formas cuspidales que se forman (LBC), salvo en casos excepcionales en los que el periodo de pico es muy elevado, y que se estudiarán cuando se analice la máxima cota de inundación.

Como ejemplo de la poca variabilidad de la línea de costa bajo condiciones normales, podemos observar el caso de la tormenta T06-t3. Para esta tormenta tenemos un pico que aparece el día 24 de noviembre (figura 5.27).

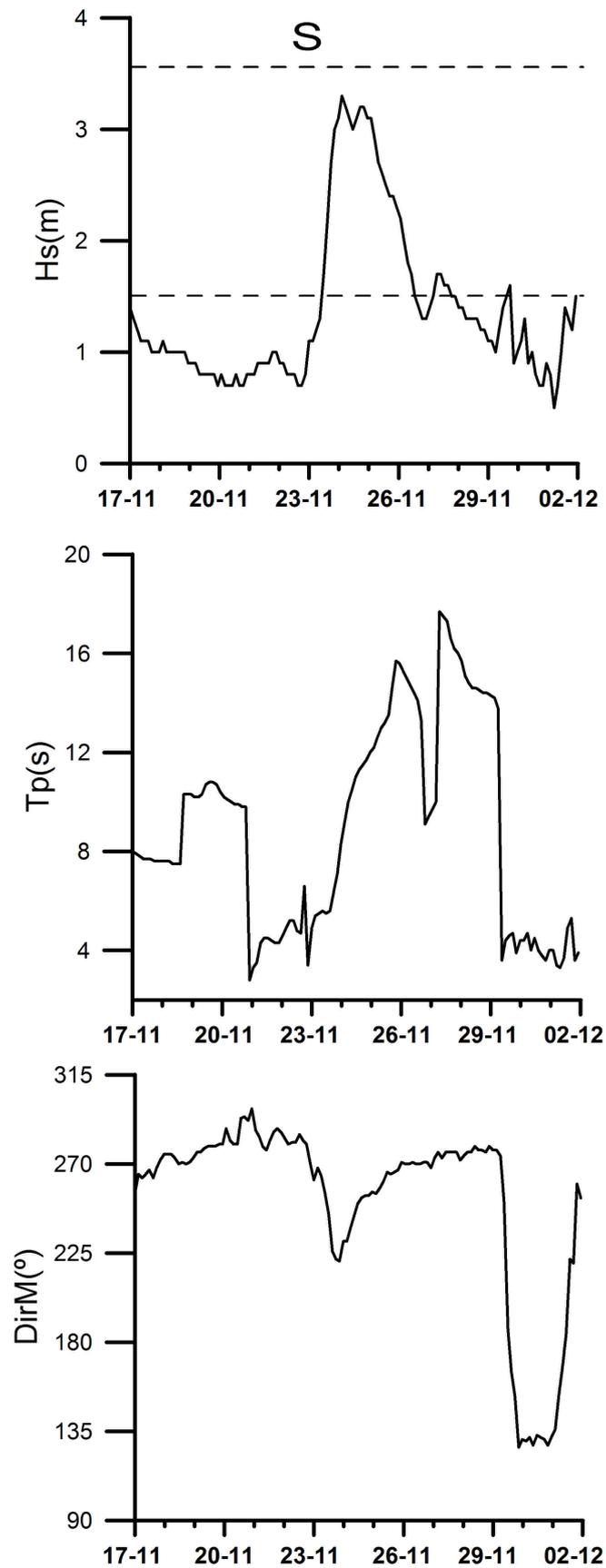


Figura 5.27: Representación para T06-t3 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

Analizando las imágenes, puede observarse como las variaciones mayores de la línea de costa aparecen entre distintos puntos de la marea (figura 5.28). Este hecho es un comportamiento general en todas las tormentas analizadas, salvo en el caso puntual y poco frecuente de estados con grandes periodos de pico, que se estudiarán posteriormente. En el caso de esta tormenta en concreto, puede verse que las variaciones entre imágenes en el mismo estado de marea no son muy significativas, observándose que se encuentran más relacionadas con las distintas carreras de marea que con el estado del oleaje. Sólo en el pico se observa que la línea de costa retrocede (máxima cota de inundación) pero sin llegar nunca a rebasar la cresta definida por las grandes formas cuspidales.

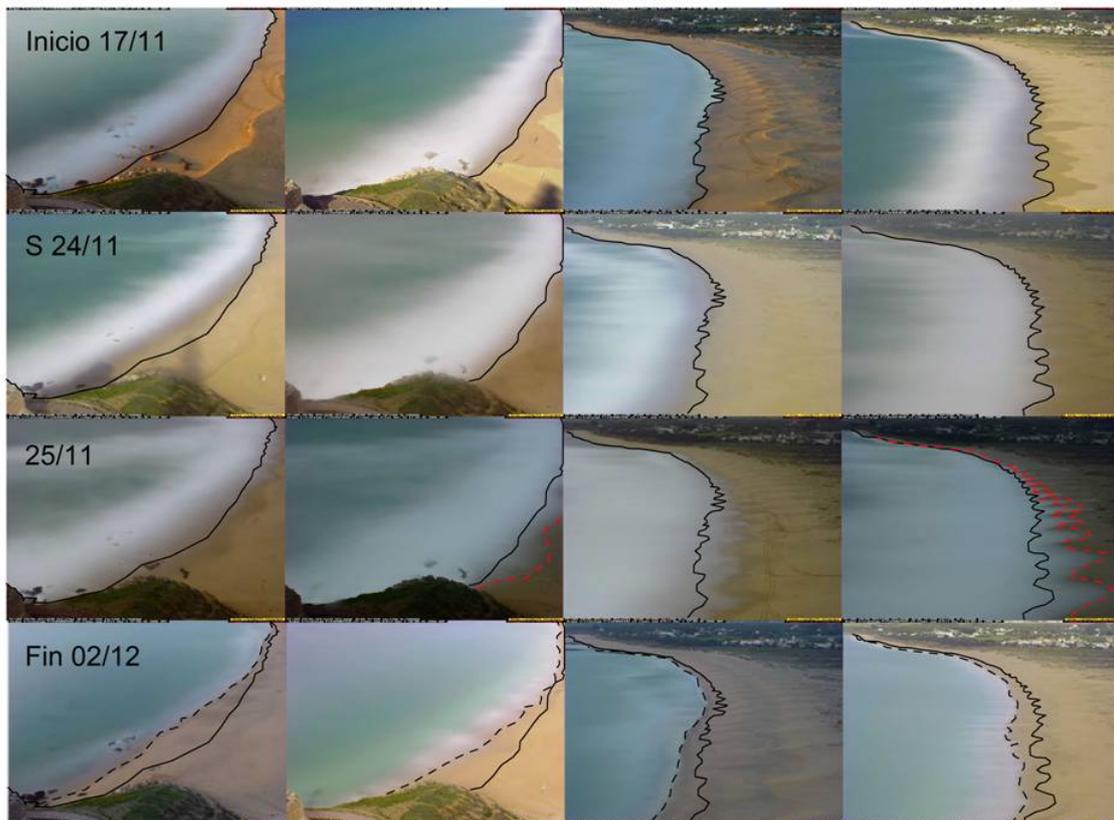


Figura 5.28: Selección de imágenes más representativas de la tormenta T06-t3. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.

■ Ancho de playa

El ancho de playa es muy importante a la hora de tener en cuenta el comportamiento morfodinámico de una playa, ya que determinará el límite de las actividades humanas en la zona. Tras el análisis de las video imágenes, pueden obtenerse las mismas conclusiones que con respecto a la posición de la línea de costa, es decir, que el ancho de playa bajo los estados de mar dentro de las tormentas más comunes a los que se ve sometida la playa no varía mucho, teniendo siempre disponible el área que hay desde la zona donde se crean las crestas de las formas cuspidales (ver figura 5.28). Pero al igual que antes, hay ciertos estados de mar en los que el periodo de pico de la onda incidente es muy elevado, en los que se produce una repentina subida del nivel del agua invadiendo zonas que abarcan un gran área. Este comportamiento se va a estudiar a continuación al analizar la máxima cota de inundación.

- **Máxima cota de inundación** La máxima cota de inundación representa el lugar más alejado al que llega el agua del mar tras la rotura del oleaje sobre la playa. Este valor depende de la rotura y las características del oleaje, de la marea y de la topografía existente. Su estimación es muy importante, ya que revela hasta dónde puede llegar el agua durante una tormenta, lo que es un parámetro básico para estimar cuál es

la zona seca y por tanto la definición del dominio marítimo, lo que es fundamental para la elaboración y aplicación de la legislación referente a la construcción de estructuras en zona litoral.

Tras la observación de las imágenes seleccionadas, se ha observado que durante las tormentas más frecuentes en las que los estados de mar pico no poseen periodos muy elevados, esta máxima cota de inundación apenas supera la cresta de las grandes formas cuspidales, no alcanzando en ningún caso la vegetación que se puede observar en la parte norte de la playa (ver figura 5.28).

Sin embargo, como ya se ha dicho en el caso de ancho de playa y posición de la línea de costa, cuando las condiciones de oleaje extremo coinciden con un periodo de pico muy elevado, se produce un aumento de la cota máxima de inundación que provoca que el agua ocupe casi toda la imagen. Este hecho será determinante para ver qué tipo de actuaciones y precauciones habrá que tener para la gestión integral de la costa en esta zona.

Como ejemplo ilustrativo de este comportamiento, puede observarse la tormenta T05-t1. Esta secuencia empieza el 19 de marzo de 2005 (figura 5.29), teniendo un evento moderado propagado el día 22. El día 26 incide en la playa un estado de mar que en profundidades indefinidas posee 4.4 metros de altura de ola y un periodo de pico de 16.6 segundos, un valor muy alto en relación a los demás estados propagados.

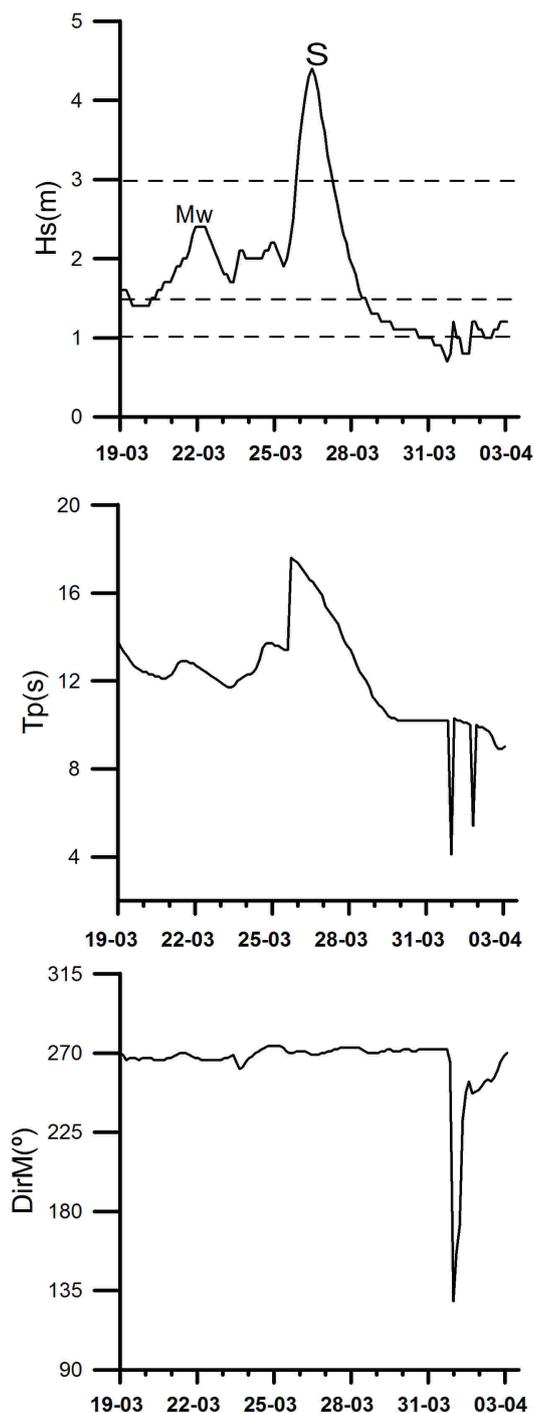


Figura 5.29: Representación para T05-t1 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas.

Al estudiar las imágenes seleccionadas para este intervalo de tormenta, puede apreciarse un comportamiento típico como el ya descrito anteriormente hasta la llegada del día 26 (figura 5.30). Ese día, con una gran altura de ola y periodo de pico, el oleaje tras romper invade casi toda la imagen en la posición de marea alta para las dos cámaras, sobrepasando claramente las morfologías presentes y la vegetación de la parte norte.

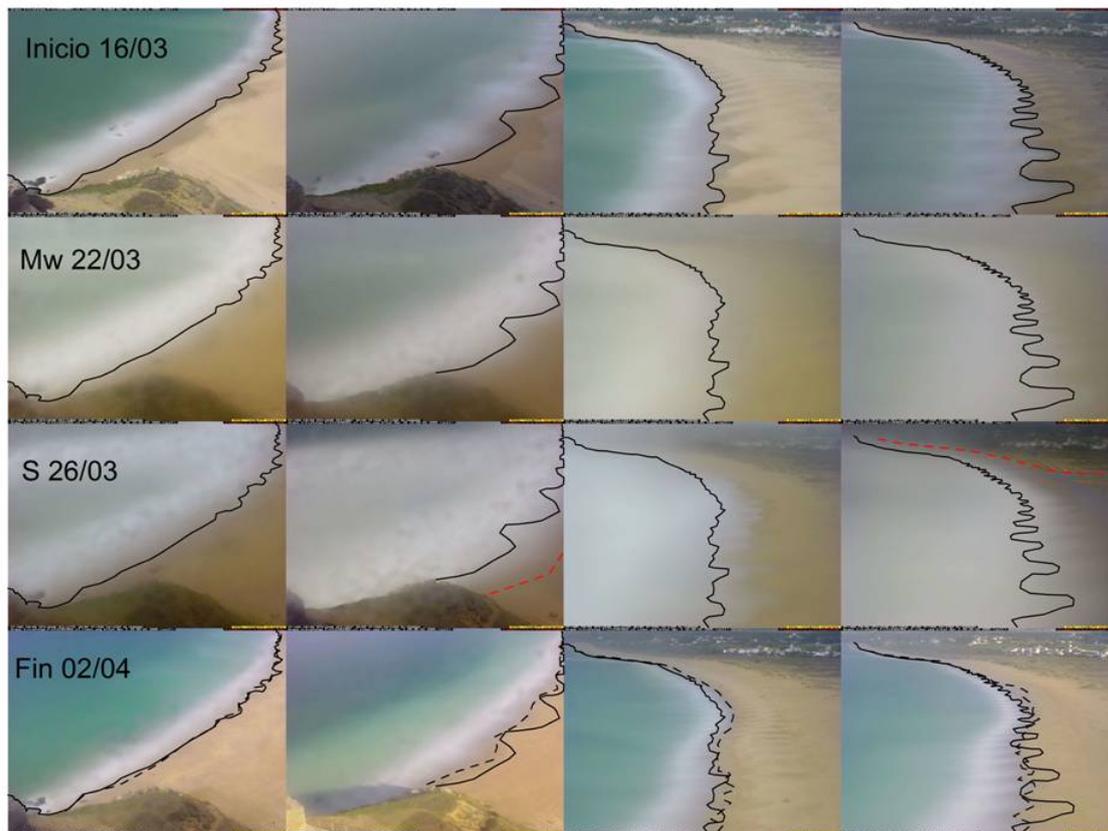


Figura 5.30: Selección de imágenes más representativas de la tormenta T05-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación.

Al ser un hecho con consecuencias tan importantes bajo la perspectiva de este estudio y que sobrepasa la zona cubierta por las cámaras usadas, se ha estudiado es posible efecto en toda la zona de la playa. Para ello se ha calculado el run-up del oleaje, ascenso de la lámina de agua por el talud producido tras la rotura y que avanza tierra adentro a través de la pendiente de la playa.

Para el cálculo de la máxima cota de inundación habrá por tanto dos componentes (figura 5.31):

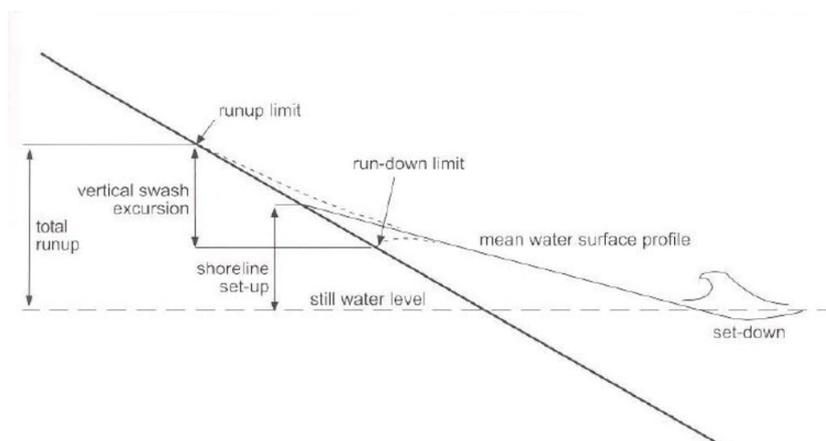


Figura 5.31: Esquema de las distintas componentes que conforman el ascenso de la lámina de agua por el talud total [Fuente: Komar, 1998]

- La elevación de la superficie libre sobre el nivel medio en reposo debida a la marea. En este estudio, se va a tener en cuenta sólo la componente astronómica, ya que para la marea meteorológica no se dispone de datos. Sus valores se obtendrán de las series temporales de marea registradas en Conil (Cádiz) sobre el nivel medio del mar tomado en el Puerto de Alicante.
- El run-up máximo debido a la acción del oleaje, que depende de parámetros del mismo como altura de ola y periodo de pico.

Como una primera aproximación, se ha usado una formulación para el cálculo del run-up máximo que depende de los valores tomados en profundidades indefinidas (Komar, 1976):

$$RU = 0,36\sqrt{g} \tan \beta \sqrt{H_0 T}$$

siendo g la aceleración de la gravedad, $\tan \beta$ la pendiente media de la playa, H_0 la altura de ola en profundidades indefinidas y T el periodo de pico. Puede observarse como la dependencia de RU es mayor con respecto a T , ya que es la variable que con mayor grado, confirmando la fuerte dependencia de T para que ocurra la subida de la cota máxima de inundación.

Pueden por tanto calcularse los valores de run-up para todos los estados de mar propagados, obteniendo los resultados de la figura 5.32, para $\tan \beta = 0,022$ y para marea alta (ya que es el estado más exigente).

Estado de mar	Hs (s)	Tp (s)	Run-up (m)	η marea (m)	$\Delta\eta$ (m)
t03_t1_s1	3,3	10,2	0,46	2	2,46
t03_t1_s2	6,2	10,2	0,63	0,8	1,43
t03_t1_mT	2,8	19,8	0,82	2	2,82
t03_t2_s	4	11,2	0,56	2,4	2,96
t03_t3_msw	2,8	7,6	0,32	1,6	1,92
t03_t3_s	4,6	12,3	0,65	2,4	3,05
t04_t1_s1	5,4	9,4	0,54	2,2	2,74
t04_t1_s2	3,1	7,8	0,34	2,8	3,14
t05_t1_mw	2,4	12,6	0,48	1	1,48
t05_t1_s	4,4	16,6	0,86	2,4	3,26
t06_t1_s1	3	9	0,39	0,8	1,19
t06_t1_s2	3,1	8,8	0,38	1,2	1,58
t06_t1_s3	3	14,9	0,64	2	2,64
t06_t1_mw	2,2	8	0,29	2	2,29
t06_t2_s1	3,4	7,2	0,33	1	1,33
t06_t2_mw	2,1	7,4	0,27	1,4	1,67
t06_t2_s2	3,3	12,6	0,57	1,8	2,37
t06_t3_s	3,3	9,2	0,41	2,2	2,61
t07_t1_s	3	7,5	0,32	2,8	3,12
t07_t1_mt	2,3	6,2	0,23	2,6	2,83
t07_t1_mT	2,7	18,1	0,74	1,4	2,14

Figura 5.32: Cuadro con el resultado del cálculo del incremento de la superficie libre para cada estado de mar seleccionado. En gris el estado de mar con mayor $\delta\eta$

Puede observarse como para el caso de T05-t1 (figuras 5.30 y 5.29) se obtiene el mayor incremento de superficie libre $\Delta\eta$. Una vez conocido el estado más desfavorable, podemos calcular el valor del run-up máximo de una manera mas precisa para ese estado de mar usando los parámetros del oleaje propagados, es decir, con datos en la costa. Para ello habrá que obtener la altura de ola en rotura. Con los resultados del modelo SWAN, podemos escoger una fila de la matriz de resultados en la que quedan registrados todos los valores calculados de altura de ola, dirección, etc.

Se ha escogido una fila horizontal en una situación determinada para que sea aproximadamente perpendicular a la línea de costa cerca del cabo de Trafalgar. Representando la altura de ola a lo largo de esa fila (eje X en coordenadas UTM), podemos encontrar la altura de ola en rotura como el último pico de esa variable antes de la llegada del oleaje a tierra, ya que tras la rotura se disipa energía bajando bruscamente la altura de ola (figura 5.33).

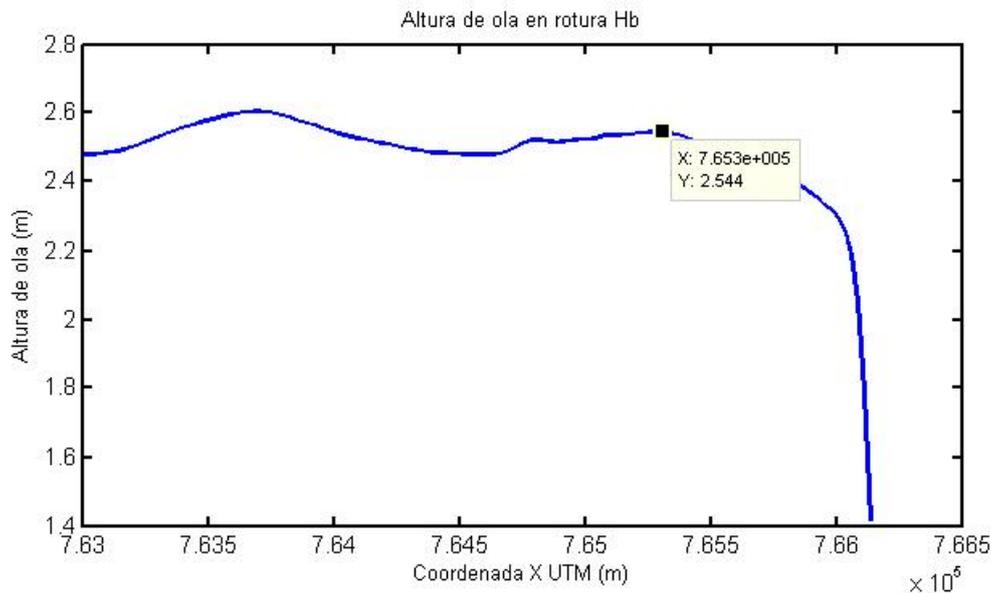


Figura 5.33: Perfil de altura de ola a lo largo de una línea paralela al eje X en un punto perpendicular a la costa. Queda resaltada la altura de ola en rotura

La altura de ola es $H_b = 2,544m$. A partir de este valor podemos calcular el valor de la máxima cota de inundación mediante una formulación propuesta por Nielsen y Hanslaw (1991) dependiente de valores en profundidades reducidas que para playas con una pendiente inferior a 0.1 se expresa:

$$CI = S + R + \Delta\eta = \frac{3}{8}\gamma_b \frac{H_b}{\sqrt{2}} + 0,89(0,05\sqrt{\frac{H_b}{\sqrt{2}}L_0}) + \Delta\eta$$

siendo S el set-up, R el run-up, γ_b un parámetro en rotura que puede expresarse como $\gamma_b = 1,1/r^{1/6}$, H_b la altura de ola en rotura y L_0 la longitud de onda en indefinidas. Realizando los cálculos, se obtiene un valor para la cota de inundación de $CI = 4,13m$

Si con la topografía de la zona de estudio obtenemos todos aquellos puntos que se encuentran por debajo de esa cota mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), tendremos el área que quedará inundada cuando incida sobre la playa ese estado de mar (figura 5.34).

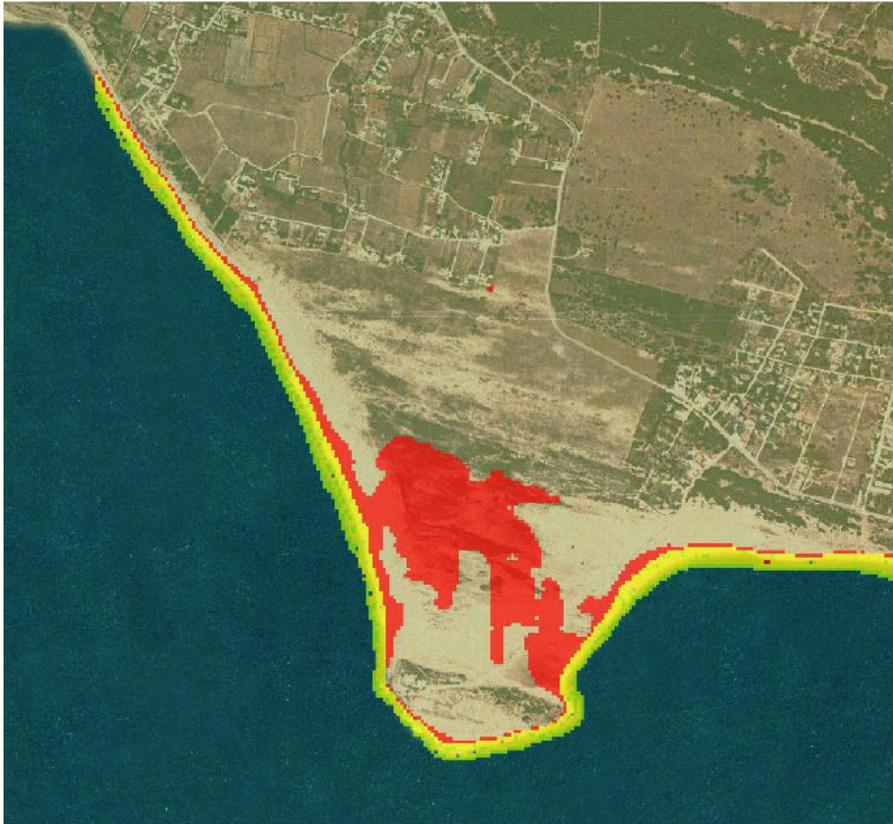


Figura 5.34: Representación SIG de la zona que quedaría inundada tras el paso de T05-t1-S (en rojo) frente a otros estados de mar de esa tormenta (amarillo y verde)

Puede verse como bajo las condiciones de ese estado de mar, el nivel del mar aumenta inundando la parte de terreno que une el cabo de Trafalgar con el interior, quedando este momentáneamente como un isla. Este hecho es muy importante, ya que condicionará la definición de línea de costa y el área de influencia del ecosistema marino. Además, las infraestructuras de comunicación del faro se verán muy afectadas, llegando a estar inutilizadas durante pequeños periodos de tiempo.

5.2.3.4. Punto singular: Faro de Trafalgar

Para el estudio de la posible erosión en la playa, y a falta de otros puntos de referencia, se han escogido las rocas bajo el faro de Trafalgar que pueden verse en las imágenes de la cámara 1 como punto de referencia a partir de cual estimar los procesos erosivos o sedimentarios de la zona. Se ha escogido este punto singular porque se ha observado que según el estado en el que se encuentre la playa, estas rocas están cubiertas o no del sedimento de la playa.

Tras el análisis de las imágenes, se ha encontrado que la erosión en esta zona tiene lugar únicamente en los estados de mar extremos, tras los cuales se produce una paulatina recuperación del sedimento volviendo en la mayoría de los casos a su configuración original. Lo más destacable del comportamiento erosivo que se ha observado, es una deposición de sedimento muy rápida (en menos de un día) que hace que todo lo anteriormente erosionado se recupere en ese corto intervalo de tiempo. Esto se produce únicamente en estados de mar con bajas alturas de ola, periodos de pico muy bajos y dirección de incidencia un poco más cercana al sur, quedando de nuevo patente que las dos primeras son las magnitudes que condicionan más el comportamiento de la playa.

Buen ejemplo de este hecho es la tormenta T06-t2 (figura 5.35), en la que tras el paso de dos picos de oleaje extremo y la consiguiente erosión, recupera todo el material perdido en tan solo un día (28 de octubre) que cumple con las características ya citadas de altura de ola y periodo de pico (figura 5.36).

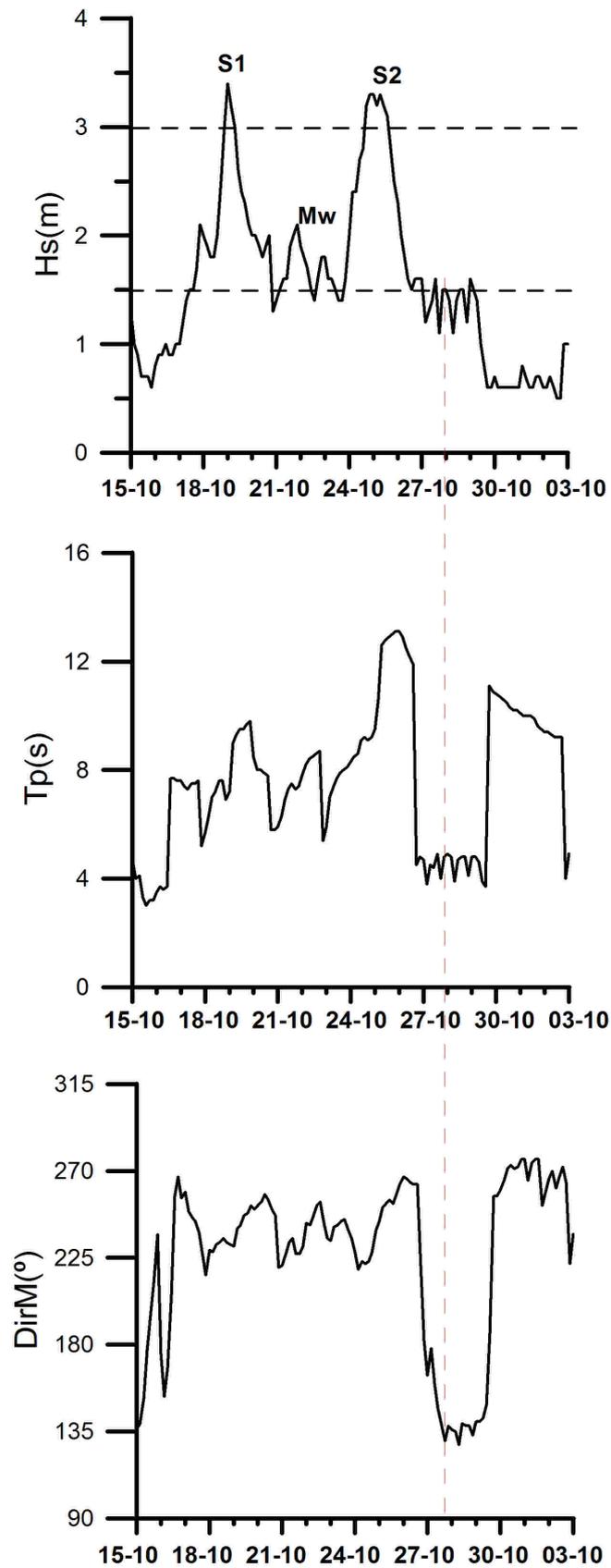


Figura 5.35: Representación para T06-t2 de las series temporales de (de arriba a abajo): altura de ola significativa, periodo de pico, dirección de incidencia. En discontinuo negro los umbrales definidos para las distintas condiciones energéticas. En discontinuo rojo aparece indicado el día 28 de octubre

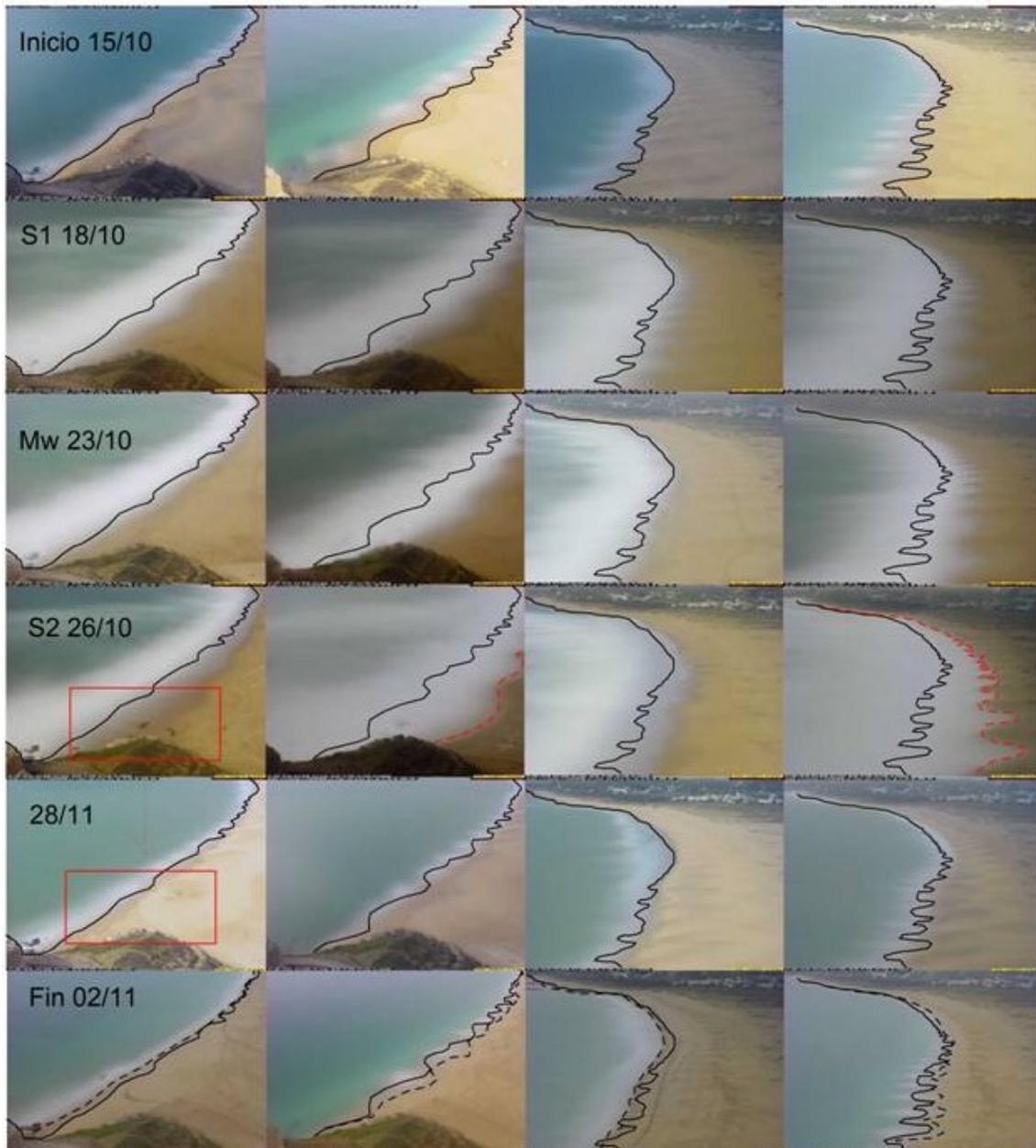


Figura 5.36: Selección de imágenes más representativas de la tormenta T05-t1. De izq. a derecha: cámara C1 en marea baja, C1 en marea alta, C3 en marea baja, C3 en marea alta. En línea continua negra la posición inicial de la línea de costa, en discontinua negra la posición final y en roja discontinua la máx. cota de inundación. Dentro de los rectángulos rojos aparece la zona singular antes y después del proceso de regeneración acelerado

El hecho de que el comportamiento de la playa en el plano del transporte neto de sedimentos presente un comportamiento tan débil (salvo en el caso citado anteriormente) responde a que la zona de estudio se encuentra enclavada entre dos puntos fijos, al sur el cabo de Trafalgar y al norte una formación rocosa. Esto hace que el sistema circulatorio de la zona funcione como un sistema cerrado, en el que las variaciones son recuperadas en poco tiempo.

5.2.3.5. Regeneración de la playa

La siguiente cuestión a analizar a través de las video imágenes es la regeneración de la playa, comprobando bajo qué condiciones se da y cuánto tiempo se tarda en alcanzar.

Como puede observarse en las figuras 5.26, 5.30, 5.36 y 5.28, la recuperación de la playa tras una semana es casi completa tanto en sedimento como en ancho de playa. Únicamente en aquellas tormentas en las que inicialmente se encontraran morfologías incompatibles (figura 5.26) con los estados energéticos moderado o extremo puede observarse como la morfología inicial no coincide con la final, ya que bajo estas condiciones se ha visto ya como la morfología tiende siempre a ser de grandes formas cuspidales (LBC). Este hecho se repite hasta en el caso en el que la máxima cota de inundación supera la cresta de estas formas adentrándose tierra adentro (figura 5.30), con lo que la playa tiene a volver a una morfología estable tras una semana después de los estados de mar más severos. Estos comportamientos pueden también observarse en el apéndice C, en el que se muestran las selecciones de imágenes realizadas para el resto de tormentas estudiadas en Trafalgar.

5.2.4. Parámetros adimensionales

En esta sección se analizan los parámetros adimensionales obtenidos mediante las variables de oleaje propagadas en la playa de Trafalgar. Para ello se han usado los datos procedentes del modelo SWAN.

5.2.4.1. Coeficiente de propagación

Después de obtener la relación entre las alturas de ola en los puntos de control y la altura de ola registrada en la boya WANA (figura 5.37), se puede observar como esta relación se mantiene más o menos constante a lo largo de la playa. Sólo pueden observarse ciertas irregularidades en torno a los puntos de control 9 y 10, cercanos al cabo de Trafalgar, donde en algunos casos se producen ciertos incrementos o decrementos de H/H_0 . Este hecho no coincide exactamente con los resultados mostrados por Ortega-Sánchez *et al.* (2008), en los que se detectaba un incremento en la altura de ola cerca del cabo, para todas las direcciones de incidencia del oleaje. Además, se ha encontrado que son los estados de mar con periodos de pico mayores los que adquieren un coeficiente de asomeramiento menor, registrando las menores altura de ola.

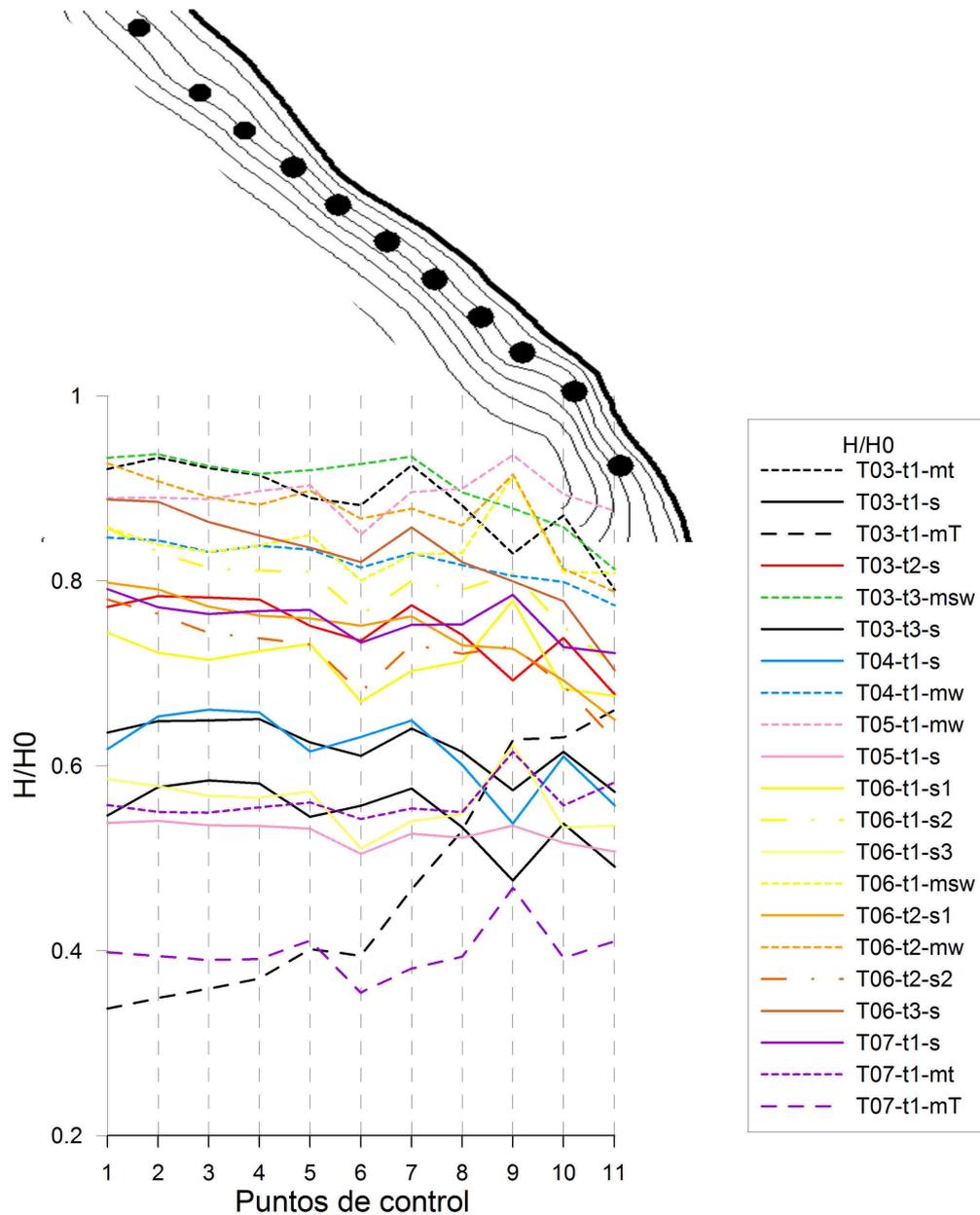


Figura 5.37: Coeficiente de propagação para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior

Como en el caso de la playa de Carchuna, pueden usarse los datos de relación de alturas de ola para comprobar si la propagación de los dos modelos numéricos usados arroja los mismos valores para ambos. Al igual que en la otra zona de estudio, se ha comprobado que los datos de uno y otro modelo no coinciden plenamente en cuanto a las zonas de concentración de energía. El estado de mar T03-t1-S es un buen ejemplo de este comportamiento, ya que si se observa la relación de alturas de ola en la figura 5.38, puede observarse un comportamiento regular, salvo un descenso en la altura de ola alrededor del punto de control 9 y una concentración de energía en el punto de control número 10.

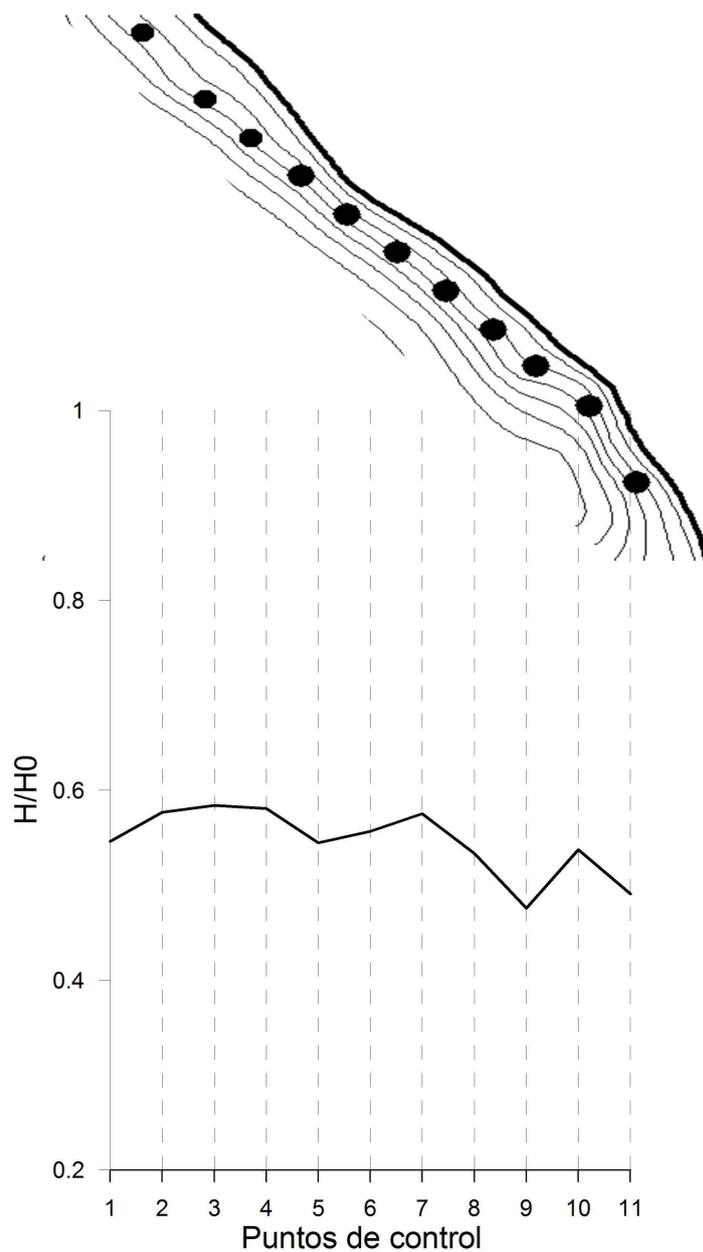


Figura 5.38: Representación del coeficiente de propagación para el estado de mar T03-t1-S

Sin embargo, si representamos los resultados de la propagación Ref-Dif de ese mismo estado de mar (figura 5.39), podemos observar una clara concentración de energía sobre el punto de control 11 y el efecto contrario sobre el punto número 4. Por tanto, ambos modelos no coinciden exactamente en el cálculo espacial de las características del oleaje. De nuevo puede achacarse a las diferencias numéricas entre ambos modelos, y a que la precisión teniendo en cuenta las mallas definidas y la batimetría no alcanza la escala espacial necesaria para un estudio en una zona tan reducida. Sería conveniente realizar una campaña de medida in-situ para discernir qué modelo funciona mejor presenta datos más fiables.

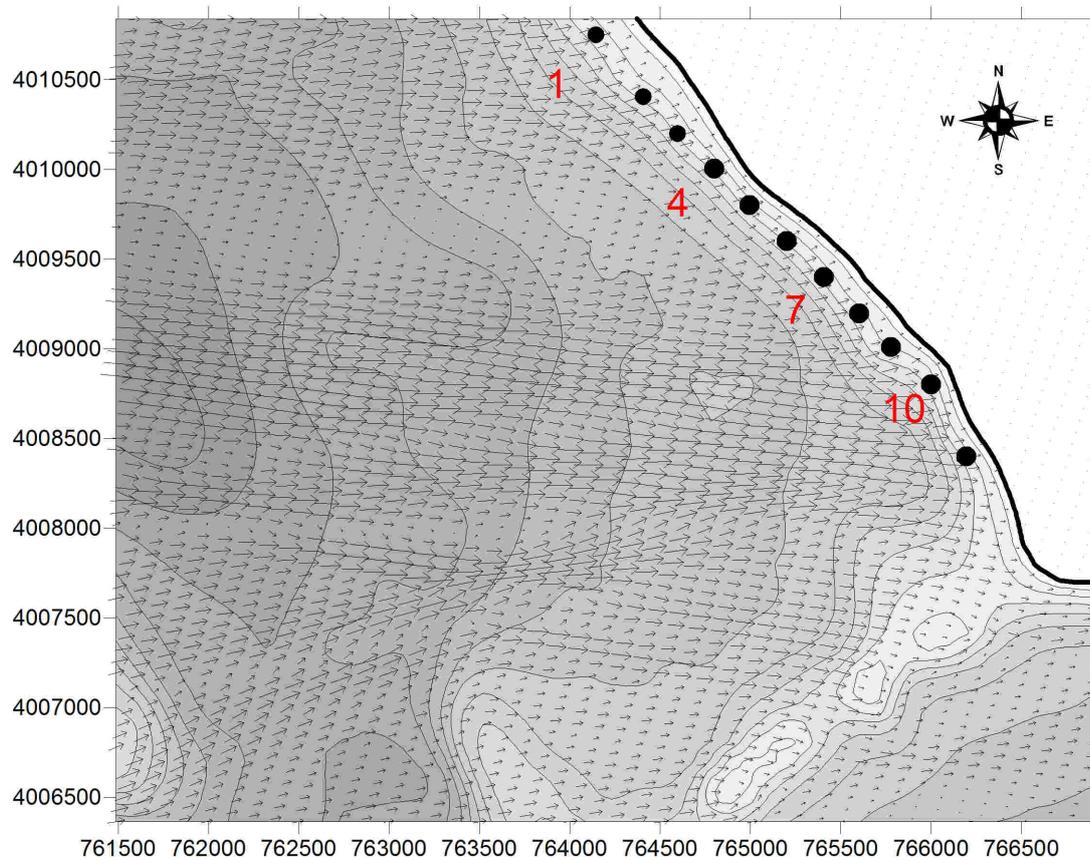


Figura 5.39: Ilustración gráfica de los resultados de la propagación del modelo Ref-Dif para el estado de mar T03-t1-S en la playa de Trafalgar, donde se representan la altura de ola (longitud de los vectores) y la dirección de incidencia (dirección de los vectores)

5.2.4.2. Número de lribarren

El número de lribarren es un indicador del tipo de rotura de oleaje que tiene lugar en la playa. Al igual que el resto de parámetros adimensionales, puede representarse los resultados del cálculo de esta variable según los estados de mar seleccionados y los puntos de control definidos (figura 5.40).

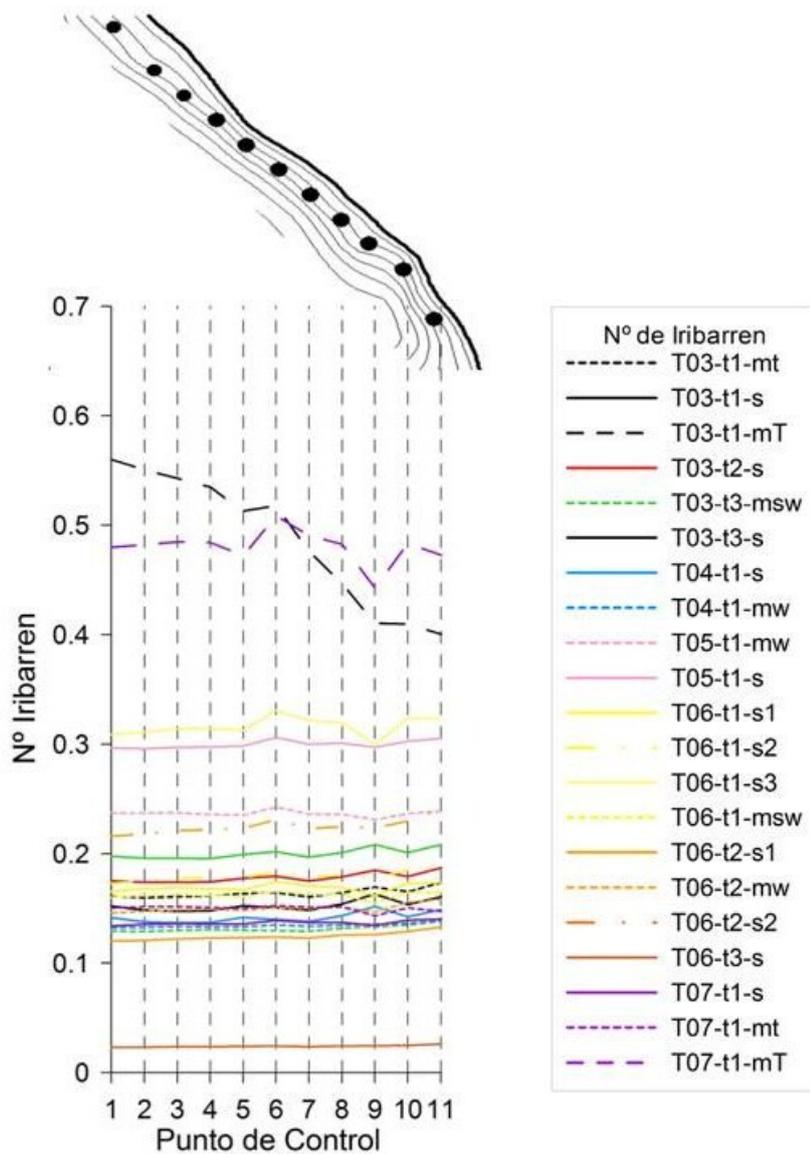


Figura 5.40: Números de Iribarren para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior

Los resultados muestran que para la mayoría de los estados de mar la rotura se produce por decrecimiento, ya que $Ir \leq 0,5$, y que dentro de los mismos estados de mar este parámetro no varía significativamente a lo largo de la playa. Sin embargo, existen dos excepciones, ya que los estados propagados con contenido energético moderado y altos periodos de pico tienen valores superiores a 0.5, lo que indica que probablemente en esos caso la rotura se produzca en voluta. Esto se debe a que con grandes periodos de pico, la longitud de onda en profundidades indefinidas aumenta, al igual que el número de Iribarren, ya que:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

y

$$Ir = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

siendo g la aceleración de la gravedad, T el periodo, H la altura de ola y L_0 la longitud de onda en profundidades indefinidas. En el caso de estados de mar extremos con grandes periodos de pico, este efecto se ve neutralizado.

5.2.4.3. Velocidad de caída adimensional

La velocidad de caída adimensional representa una estimación sobre la actividad erosiva de la zona, indicando si se produce el inicio del movimiento de las partículas del sedimento de la playa. Para la playa de Trafalgar se ha tomado un único valor de tamaño del sedimento, $D_{50} = 0,5\text{mm}$, ya que la distribución del tamaño del sedimento en esta playa es muy homogénea.

Representando el valor de la velocidad de caída adimensional de la misma forma que en los casos anteriores en la figura 5.41, se observa que en muchos casos se supera un valor de 3 ó 3.5 para esta velocidad, lo que indica que en esos caso se produce movimiento de partículas.

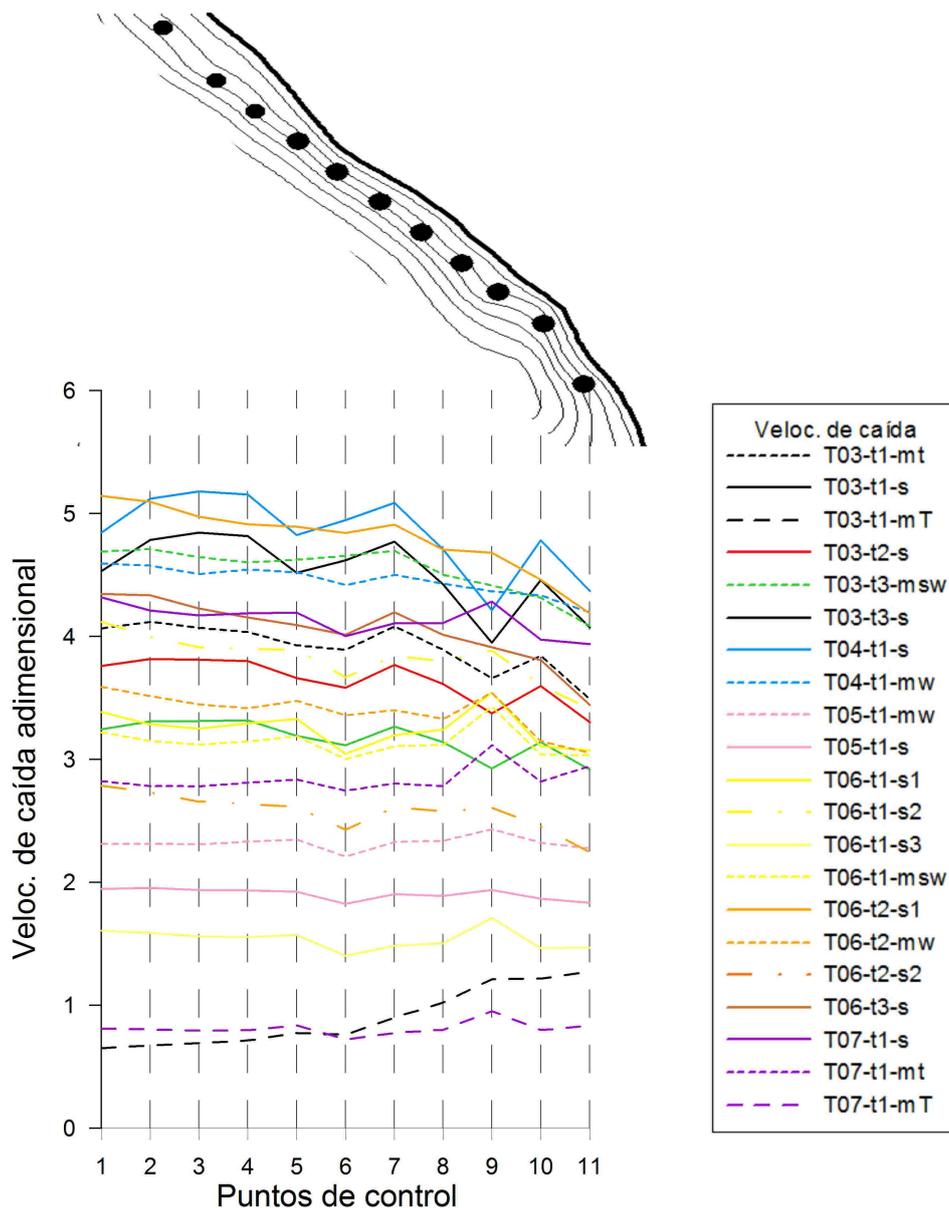


Figura 5.41: Velocidad de caída adimensional para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior

Sin embargo, se ha comprobado en las video imágenes que aparentemente no hay grandes transpotes de sedimento en la dirección longitudinal de la playa. Esto indica que el transporte podría realizarse en la dirección perpendicular a la línea de costa, cambiando las morfologías de la zona de estudio. La razón de este comportamiento podría residir en que tras sufrir transformaciones como refracción o difracción, las ondas que inciden en la playa lo hacen de una manera aproximadamente perpendicular a ella, dificultando la existencia de corrientes

de circulación dentro del marco de la playa, que como ya se ha visto se encuentra en equilibrio dinámico al enclavarse entre dos puntos fijos.

5.2.4.4. Peralte de la ola

En cuanto al peralte de la ola, observando la representación de los valores obtenidos en la figura 5.42, se ha encontrado que hay un descenso general del mismo alrededor del punto de control 9, donde la rotura se producirá para profundidades menores que en el resto de puntos, con lo que la rotura se producirá más cerca de la línea de costs en esa zona cercana al faro. Además, se observa que el estado de mar T03-t1-mT, caracterizado por un periodo de pico muy alto (cercano a los 20 segundos) presenta un peralte mucho mayor, con lo que rotura se producirá más aguas adentro. Este efecto es mayor conforme nos acercamos al faro.

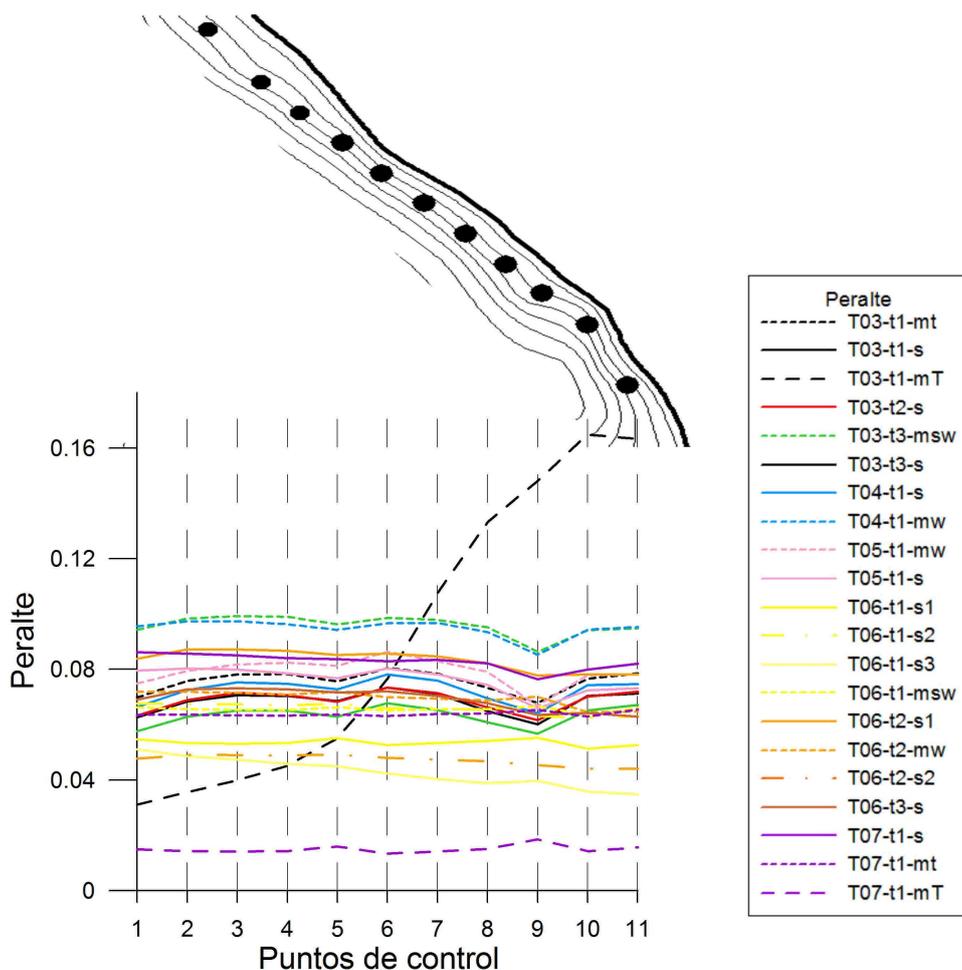


Figura 5.42: Peralte de la ola para los diferentes estados de mar propagados en la playa de Trafalgar, con la situación de los puntos de control en la parte superior

5.2.5. Conclusiones parciales

Tras todo el análisis de la evolución morfodinámica de la playa de Trafalgar a través de las video imágenes y el estudio de los datos obtenidos para los parámetros adimensionales, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- La playa de Trafalgar presenta una dependencia del periodo de pico y la altura de ola muy marcada en cuanto a su evolución morfodinámica. En este caso parece que la dirección con la que incide el oleaje sobre la zona no condiciona de una manera relevante esa evolución, ya que tras la propagación desde profundidades indefinidas, el oleaje incide con una variabilidad de direcciones muy baja.

Sin embargo, altura de ola y periodo de la onda determinan de una forma muy marcada la morfología de la playa, así como la anchura y la máxima cota de inundación en lo referente a intervalos de tormenta.

- Las variaciones morfodinámicas de esta playa están ligadas a cambios en la morfología del perfil de la misma, no ocurriendo lo mismo con la forma en planta de la línea de costa. Los cambios más importantes son los que se producen en las formaciones rítmicas de la playa, teniendo una morfología estable o típica en las grandes formas cuspidales, presentes la gran mayoría del tiempo en la playa durante tormentas. Sólo en el caso de que la altura de ola de los eventos extremos de esas tormentas superes los 4 metros, pueden verse cambios en esa morfología, pasando a un perfil de playa plana.
- Los procesos erosivos asociados a las tormentas estudiadas son muy progresivos, observándose que a pesar de que en muchos casos se alcanza el inicio del movimiento de las partículas (figura 5.41), este no está asociado a un movimiento longitudinal del sedimento, sino a cambios transversales en el perfil. Esto puede estar motivado por la dirección de incidencia del oleaje, que normalmente es perpendicular a la línea de costa.

Se ha encontrado que bajo determinadas características del oleaje poco frecuentes se produce un recuperación de sedimento en la playa, al menos en la zona cercana al faro donde se disponía de puntos fijos para su comparación. En aquellos estados en los que la altura de ola es muy baja y el periodo sufre también un decremento importante, se produce en apenas 24 horas una recuperación de material importante (figura 5.30)

- Bajo ciertas condiciones del oleaje, puede llegar a producirse para la playa de Trafalgar una subida de la máxima cota de inundación que provoca que el tómbolo aledaño quede inundado (figura 5.34). Estas condiciones forzadoras se resumen en la combinación de oleajes extremos con periodos de pico muy altos, con lo que el Run-Up del oleaje aumenta lo suficiente para superar una cota crítica situada alrededor de las 3 metros, tras la cual se produce la inundación.

Este hecho tiene especial relevancia dentro de la gestión integral de la costa, ya que afectará a las infraestructuras presentes en la zona, tales como los viales de entrada al faro y los servivios de este. También se verá modificada de forma sustancial la línea de costa, debido a que por un pequeño incremento de ese Run-up puede verse sometida bajo la influencia del sistema marino un área mucho mayor, con las consecuentes repercusiones para el medio antropogénico

- En cuanto a los modelos de propagación usados, puede decirse que de nuevo no existe plena coincidencia entre ambos. En este caso no se ha realizado una campaña de campo con respecto a la cual pueda estudiarse la bondad de las propagaciones comparando con datos reales de campo. Por tanto, los datos obtenidos mediante estos modelos deben tomarse con la suficiente precaución, ya que parece que para estudios a esta escala los errores cometidos son lo suficientemente grandes como para ello. Estos errores pueden deberse a las diferencias numéricas entre los modelos o bien a errores asociados a la diferente definición de la modelización numérica.

Conclusiones. Recomendaciones

Tras el estudio y análisis llevado a cabo mediante la técnica de video imágenes y la propagación con modelos numéricos, pueden extraerse una serie de conclusiones y recomendaciones acerca de las dos zonas de estudio.

6.1. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas han sido:

- Existen grandes diferencias entre el comportamiento de las playas atlánticas y mediterráneas debido a las grandes diferencias de morfología y clima marítimo. Mientras que en la playa disipativa atlántica de Trafalgar predominan los procesos que afectan a la sección transversal de la playa, en la playa semireflejante mediterránea de Carchuna predominan los cambios a lo largo de la línea de costa. Sin embargo, ambas playas tienen una característica común, y es que al encontrarse situadas entre dos puntos o cabos fijos, las zonas de estudio se encuentran en equilibrio dinámico siendo un sistema independiente basculando entre un extremo y otro.
- El clima marítimo de ambas zonas tiene grandes diferencias, inducidas por los distintos fetch y orientación de las mismas. En Carchuna predominan claramente dos tipos de oleaje, uno proveniente del este y otro procedente del oeste, ambos con alturas de ola que apenas superan los cuatro metros y periodos de pico bajos. Se ha encontrado que la dirección de incidencia es un factor determinante en el comportamiento de esta playa.

Sin embargo, en la playa de Trafalgar predomina una sola dirección de incidencia, ya que más del 90 % del oleaje llega desde una dirección aproximadamente oeste. Las alturas de ola significativas son mayores, llegando incluso a los 7 metros, y los periodos de pico también, alcanzando valores de 20 segundos. Es por ello que estas dos variables son las que más influyen en el comportamiento morfodinámico de la playa.

- En la playa de Carchuna se ha observado que las principales variaciones en la morfología durante episodios de tormenta se producen en la forma en planta de la playa, debido a que se produce un gran movimiento de partículas de sedimento de tamaño fino en la dirección longitudinal de la zona de estudio definida entre H2 y H3. Se ha comprobado que el sedimento grueso no inicia su movimiento ni siquiera en los estados de mar más severos.

Esos cambios morfológicos están asociados a la dirección de procedencia del oleaje. Si éste viene del este se produce una erosión generalizada en la playa que concluirá con la deposición del material movilizado durante el oleaje extremo en la zona oeste, arrastrado desde el centro de la bahía por oleaje menos severo con la misma procedencia. El resultado es una ganancia de ancho de playa en la zona oeste de hasta decenas de metros, que puede llegar a producirse en tan solo 24 horas. El tiempo de regeneración de la playa en este caso es mayor, observándose que al final de los periodos de estudio de cada tormenta los cambios seguían patentes en la playa.

Para las tormentas procedentes del oeste, se produce una erosión en la parte oeste bajo la acción del pico de la tormenta que va recuperándose poco a poco gracias a la sedimentación de material procedente del interior de la bahía, alcanzando finalmente la configuración inicial. Por lo tanto, en este caso el tiempo de regeneración es mucho menor, siempre por debajo de la semana. Este proceso de sedimentación se ve acelerado por eventos de tipo moderado que alcancen la playa posteriormente al pico. Si lo hacen con anterioridad, no se observan cambios patentes en la morfodinámica de la playa.

- Los cambios morfodinámicos de la playa de Trafalgar están asociados a variaciones en la altura de ola y periodo de pico fundamentalmente. Estos cambios son fundamentalmente en la dirección transversal de la playa, como variaciones en la morfología de las formaciones rítmicas presentes, ancho de playa, posición de la línea de costa o máxima cota de inundación. En cuanto a las morfologías rítmicas, se ha encontrado que en condiciones de tormenta predominan claramente las grandes formas cuspidales, que únicamente desaparecen para dejar un perfil de playa plana cuando la altura de ola significativa sobrepasa los 4 metros aproximadamente. La anchura de playa y la posición de la línea de costa están muy influenciadas por la gran carrera de marea de la zona, ya que variaciones de esta marea provocan cambios más significativos en estos dos parámetros que el propio oleaje.

Este comportamiento tiene una excepción. Cuando el oleaje incidente posee una gran altura de ola y un periodo de pico muy alto, se ha observado que se produce un gran incremento en la máxima cota de inundación debido a un aumento del Run-Up del oleaje. Cuando el valor del Run-Up máximo alcanza una determinada cota, poco mayor de las 3 metros, se produce la inundación de un gran área que comprende al istmo que une el faro de Trafalgar con el interior. La anchura de playa desaparece y la línea de costa deja de ser paralela a la alineación de la playa. Este comportamiento tiene un gran interés para la gestión del litoral, ya que provoca afecciones a las infraestructuras existentes y condicionará la ejecución de las futuras.

En cuanto al transporte de sedimentos, después de tomar las rocas presentes en el cabo de Trafalgar como referencia, se ha visto que los procesos de erosión con la incidencia de oleaje extremo y de posterior recuperación son muy paulatinos y no provocan grandes cambios en cortos periodos de tiempo. En el caso de oleaje de muy baja altura de ola y periodo de pico, se ha comprobado que se produce una deposición de sedimento repentina.

En cualquier caso, en Trafalgar se ha observado como, incluso tras éste periodo de inundación, la playa llegaba al fin del periodo de estudio de cada tormenta con la morfología típica o base de esta playa para las condiciones extremas, con un conjunto de grandes formas cuspidales como formaciones rítmicas.

- En cuanto a los dos modelos de propagación de oleaje, se demostró que se obtienen resultados distintos con cada uno de ellos para las zonas de estudio. Aunque estas diferencias no son muy grandes en cuanto a orden de magnitud, provocan que su uso deba ser muy cuidadoso en estudios a escalas tan ocales como este, ya que la precisión en los cálculos requerida es muy grande dada la proximidad entre puntos de control, por ejemplo. Estas diferencias pueden deberse a distintas formulaciones, como en el caso de la rotura del oleaje. también pueden estar relacionadas con la modelización numérica de las zonas de estudio llevada a cabo para cada uno de ellos.

Además, gracias a la realización de una campaña de campo por parte del Grupo de Dinámica de Fijos Ambientales de la Universidad de Granada, en la que se tomaron medidas de campo reales de altura de ola, se ha demostrado que para el caso de Carchuna los datos arrojados por el modelo SWAN se acercaban más a los reales. Esta conclusión no puede generalizarse para todas las playas, ya que las distintas modelizaciones, batimetrías y condiciones del oleaje obligan a verificar ese hecho para cada zona a estudiar.

- Los umbrales entre diferentes estados energéticos del oleaje definidos para este trabajo han demostrado ser demasiado generalistas, ya que se ha comprobado que por las distintas características de cada playa, los umbrales deben ser definidos para cada una de ellas de forma distinta. En el caso de Carchuna se ha encontrado que dentro de las definidas como condiciones energéticas medias, que en un principio no provocan cambios a corto plazo en la playa, se producen variaciones en la morfología inducidas por el transporte de sedimentos. En el caso de Trafalgar, se ha observado que para que haya cambios profundos e instantáneos en la morfología, debe incidir un oleaje con más de 4 metros de altura de ola, con lo que para esta playa debería escogerse este valor como umbral para las condiciones energéticas extremas.
- Se ha comprobado que la regeneración de las playas al finalizar los periodos de estudio de cada tormenta también presenta un comportamiento distinto según la zona de estudio. En el caso de Carchuna, para tormentas procedentes del oeste la regeneración es total, encontrándose la playa con los mismos estados inicial y final. Por tanto, para estos casos no es necesaria ninguna actuación ya que el tiempo de respuesta de la playa es del orden de una semana. En el caso de las tormentas procedentes del este, la morfología final no coincide con la inicial una semana después del paso del oleaje extremo, con lo que

no se ha podido medir el tiempo de respuesta de la playa bajo esas solicitaciones. En cualquier caso, os cambios inducidos, como la ganancia de unos cuantos metros de playa, no parecen ser suficientemente importantes como para aconsejar actuaciones sobre la zona.

Para el caso de Trafalgar, el estado final tras una semana desde el paso del pico de cada tormenta se corresponde con el perfil básico de la playa bajo condiciones energéticas mayores, con la formación de grandes formas cuspidales sin superar la línea de costa nunca la cresta de estas. Sin embargo, bajo oleajes extremos con periodos de pico muy altos se produce una inundación de lo que en principio parece terreno fuera del dominio marítimo que, a pesar de tener un carácter muy puntual, condiciona muchas infraestructuras existentes en la zona o la creación de futuras. Es el caso de los viales de acceso al faro y sus servicios, que pueden verse afectados por este proceso. Además, este efecto habrá que tenerlo muy presente para el emplazamiento de futuras estructuras que puedan verse afectadas por la subida de la máxima cota de inundación.

6.2. Recomendaciones para futuras actuaciones

Una de las actuaciones más frecuentes y solicitadas por las autoridades en las zonas costeras es la regeneración de playas con la aportación artificial de sedimento, con la finalidad de ganar anchura de playa seca en zonas erosionadas o la protección de un tramo de costa. Además del correcto diseño de la regeneración (granulometría y características del material de aportación, y volumen y técnica a emplear), la problemática esencial que aparece es analizar y valorar la necesidad de estas actuaciones. Para ello es necesario realizar como paso previo un estudio exhaustivo de la evolución del tramo de línea de costa a corto, medio y largo plazo.

Para que una actuación de este tipo sea necesaria, tiene que producirse una erosión neta considerable en un intervalo de tiempo de varios años meteorológicos, ya que los procesos costeros asociados a la modificación de la forma en planta de la costa tienen periodos de ocurrencia de ese orden de magnitud. A modo de ejemplo, la morfología costera varía según la época del año, ya que existen perfiles de verano y de invierno según la frecuencia de los eventos extremos. Por tanto, una pérdida puntual de playa en unos pocos días no es razón suficiente para llevar a cabo una regeneración, puede ser que forme parte de los procesos naturales de la playa regenerándose esta en un corto periodo de tiempo. Los procesos erosivos que provocan la necesidad de regeneraciones de playa actúan a largo plazo.

En nuestro caso, se ha visto que las tormentas incidentes en las dos zonas de estudio no provocaban cambios irreversibles, y que la mayoría de las variaciones en la morfología se recuperaban en un periodo de aproximadamente una semana, salvo en el caso de tormentas procedentes del este para la playa de Carchuna. Aún así, es necesario un estudio a lo largo de varios años para evaluar la necesidad de estas regeneraciones y obtener una respuesta firme a esta cuestión.

En el caso de que el estudio de la evolución de la playa a lo largo de varios años muestre una erosión generalizada, que pudiera corregirse temporalmente mediante una regeneración, hay que tener en cuenta el diferente comportamiento entre dos tipos de playas tan distintas como la de Carchuna y Trafalgar (es decir, playas mediterráneas de sedimento heterogéneo y playas atlánticas de sedimento fino-medio), ya que el diseño de la regeneración no se puede hacer de la misma forma en ambos entornos. Por ejemplo, en Carchuna se ha comprobado que bajo estados de mar extremos se inicia el movimiento de todas las partículas finas, sin que lo haga para las gruesas. Si se realizara una regeneración sólo con sedimento fino, este se movilizaría en poco tiempo reduciéndose la vida útil de la actuación a unos pocos meses. Además, la movilización de dicho sedimento fino provoca que se incremente la turbidez del agua, siendo las características del agua menos aptas para el baño o para captaciones que abastezcan a piscifactorías.

Por tanto, una de las cuestiones de mayor importancia a la hora de estudiar la viabilidad de una regeneración es la elección del material de aportación. Este material debe ser cuidadosamente estudiado para asegurar que su distribución granulométrica es perfectamente compatible con la del sedimento nativo. La otra cuestión básica es el volumen de aportación necesario, lo que implica el cálculo del factor de relleno, definido como el volumen que hay que aportar para que un m^3 de ese material de aportación sea retenido.

Una vez realizada la aportación, y puesto que el objetivo debe ser maximizar su vida útil, debe garantizarse la existencia de una campaña de mantenimiento y control que mediante diferentes equipos tome medidas de campo e imágenes para evaluar la evolución de la actuación a lo largo del tiempo, con datos como transporte

de sedimento, circulación de la zona, pendientes, etc. Con los datos obtenidos puede optimizarse tanto la regeneración existente como las futuras actuaciones que puedan llevarse a cabo en la zona o en zonas similares.

Finalmente, se quiere puntualizar:

1. En playas con bajo nivel de presión urbanística, como Trafalgar, los estudios de la evolución morfológica a corto, medio y largo plazo como el que se presenta en este proyecto deben servir para delimitar correctamente el dominio marítimo-terrestre, realizando para ello simulaciones mediante técnicas de Montecarlo tanto de la evolución de la línea de costa como de la cota de inundación durante los próximos 10, 25 o 50 años. Ello permitirá que las decisiones urbanísticas que se adoptan en el futuro tengan el respaldo de un sólido conocimiento científico-técnico.
2. En playas con un elevado nivel de presión urbanística, como Carchuna, los estudios morfológicos deben ayudar a discernir si la costa se encuentra en claro proceso de regresión, en cuyo caso puede ser necesario llevar a cabo medidas de protección para "fijar" la línea de costa, o si bien la costa es relativamente estable y sólo presenta cambios morfológicos asociados a eventos de gran contenido energético, en cuyo caso las medidas de protección no son necesarias. En este último caso, las afecciones que se puedan producir sobre construcciones u otros bienes materiales son consecuencia o bien de una incorrecta delimitación del dominio marítimo-terrestre, o bien de una inadecuada ocupación de la franja litoral.

6.3. Futuras líneas de investigación

Tras la realización de este estudio, han surgido nuevas cuestiones y problemáticas que podrían ser reseltas en futuras líneas de investigación que aundan en el conocimiento del comportamiento de la costa, mejorando así nuestra gestión del litoral. Estas líneas de investigación pueden resumirse en:

- Realización de una campaña de campo en la playa de Trafalgar para la medición de datos de oleaje, como la ya descrita y realizada para Carchuna. Con los datos obtenidos, podría describirse qué modelo de propagación numérica de oleaje simula mejor las condiciones reales en este tipo de playas. Los resultados podrían utilizarse para la definición de un protocolo de propagación, en el cual se indicara qué modelo debe usarse para cada tipo de playa y bajo qué simulación numérica de a zona de estudio. Estos avances mejorarían la calidad de los cálculos obteniendo datos más fiables sobre el comportamiento de zonas del litoral a través de datos obtenidos en profundidades indefinidas.
- Estudio y realización de una campaña de campo en la misma playa para la descripción y medición exacta de los perfiles que se van creando a lo largo de la misma durante una tormenta, ya que mediante la mera observación de las video imágenes resulta muy difícil la caracterización de esos perfiles. De esta manera podría adquirirse un conocimiento más exacto de cómo cambian las condiciones energéticas extremas el litoral transversalmente. Además podría estimarse el transporte de material que se moviliza en la dirección perpendicular a la línea de costa.
- Estudio a más largo plazo de la evolución morfológica de la playa de Carchuna bajo tormentas procedentes del este, ya que no se ha podido determinar cuál es el tiempo de regeneración natural de la playa bajo esas condiciones. Sería necesario seleccionar imágenes durante intervalos de tiempo mayores y estudiar la movilización de cada tipo de sedimento mediante los datos calculados con un modelo de propagación numérica. Como resultado podría obtenerse una respuesta firme a si son necesarias actuaciones en Carchuna, ya que para temporales procedentes del oeste ya se ha demostrado que no.
- Realización de un análisis exhaustivo de la zona que puede quedar inundada en la playa de Trafalgar, estudiando la zona al completo, definiendo áreas de susceptibilidad con detalle y llevando a cabo un registro de todas las afecciones posibles así como de las posibles interferencias con la actividad humana. Para ello se requiere un cálculo muy preciso del Run-Up de la zona, así como de la probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno de las condiciones necesarias para que se produzcan esas afecciones. Para ello el estudio no debe centrarse solamente en la playa, sino que deberá abarcar una escala espacial mayor.
- Estudio mediante video imágenes en ambas playas para la obtención del tiempo exacto de respuesta antes tormentas propagadas en la zona. Sería necesario el estudio no sólo de imagen de marea alta o baja, si

no de todas las obtenidas durante un día para determinar la evolución en horas de la morfodinámica de la playa. La problemática más importante en este estudio sería encontrar un método para desprejar el efecto de la marea en el nivel del mar, ya que habría que separar para cada imagen el efecto de la marea del efecto del oleaje. Este problema es mayor en Trafalgar, donde la carrera de marea es mucho mayor.

- Análisis del oleaje incidente en las playas y de los efectos de éste, orientado a la correcta definición de umbrales entre condiciones energéticas, con el correspondiente cálculo del contenido en energía del oleaje. Con un estudio de estas características podrían establecerse clasificaciones precisas de los estados de mar incidentes en las zonas de estudio para su análisis pormenorizado.

Estaciones de video monitorización.

A.1. Técnica de video monitorización

La comprensión de la morfodinámica costera depende en gran medida de la capacidad de obtener datos en condiciones naturales, al objeto de calibrar y realizar modelos sobre la evolución de la línea de costa. La tecnología tradicional implica la ubicación de sensores mediante los que se miden características del flujo, y la realización de campañas es costosa y compleja, y solamente permiten la obtención de datos en momentos puntuales. Se precisan, por tanto, datos de mayor fiabilidad y precisión sobre la variabilidad espacial y temporal de los procesos que afectan a la línea de costa.

A.1.1. Estación de video monitorización

Una estación de video monitorización se compone de una serie de cámaras visualizando oblicuamente la línea de costa. Estas cámaras se conectan a un procesador de imágenes en un ordenador que transmite los datos para su tratamiento a una estación de trabajo situada en la Universidad de Granada. Esta técnica permite la obtención de datos de forma efectiva, barata y permanente para el planeamiento, evaluación y gestión de zonas costeras.

A.1.2. Base teórica de la Técnica

La técnica de video monitorización fue desarrollada por investigadores de la Universidad de Oregon (USA) (Aarninkhof and Holman, 1999). Se basa en la obtención de información sobre fenómenos morfodinámicos mediante el tratamiento de imágenes obtenidas por cámaras de video.

A.1.3. Tipos de datos

Existen diferentes imágenes que se pueden obtener de las cámaras:

- **Imagen instantánea (snap-shot):** muestra una visión general del estado de la zona de estudio, pero no son útiles para análisis más profundos.

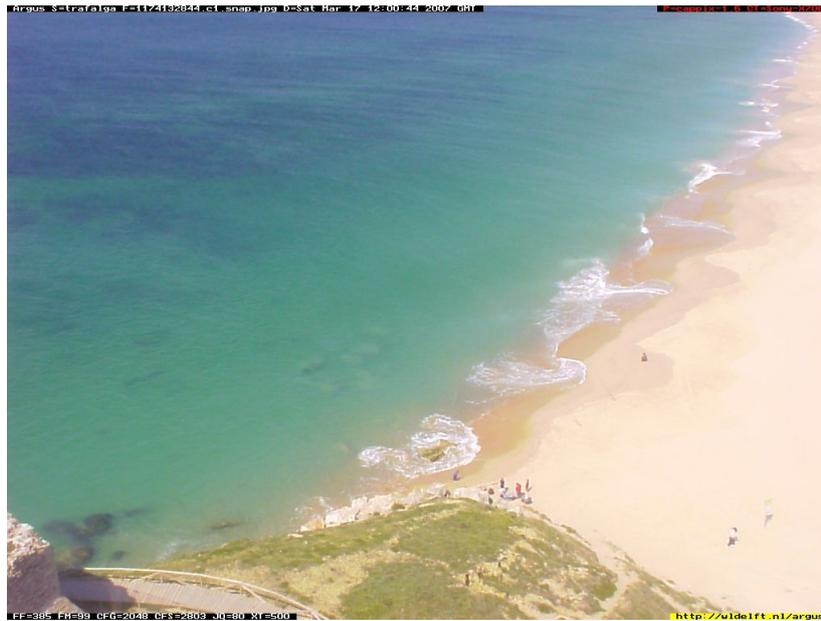


Figura A.1: Imagen instantánea de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Imagen promediada (time-exposure image):** es el resultado de promediar 1200 imágenes instantáneas tomadas con una frecuencia de 2 Hz durante los 10 primeros minutos de cada hora de servicio. Esta imagen permite la definición de los cambios en la morfología sumergida de la playa, ya que se suavizan los efectos del oleaje y se diferencian según los tonos de la imagen la línea de costa y las variaciones en la batimetría.

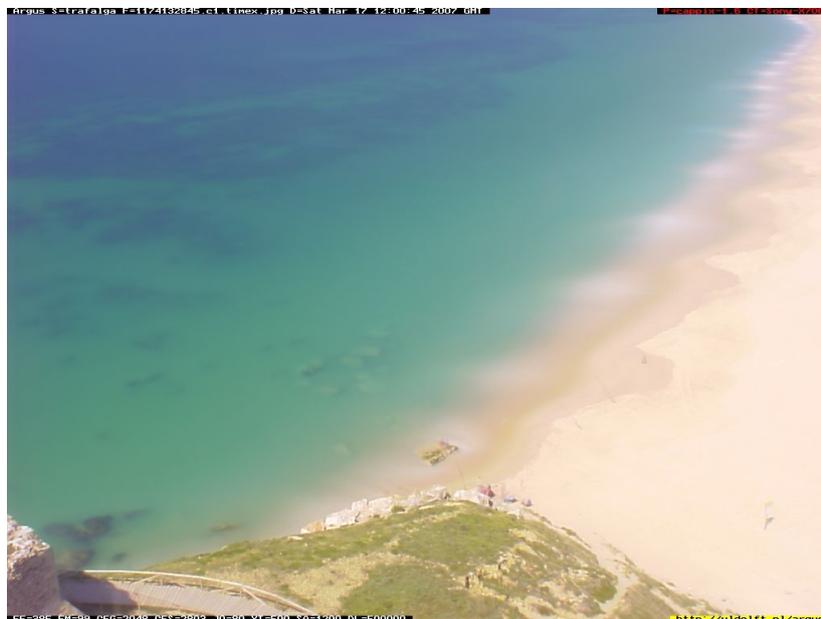


Figura A.2: Imagen promediada de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Varianza de la imagen (variance image):** reflejan la variación de la intensidad de la luz durante el mismo periodo de 10 minutos, permitiendo la identificación de las zonas que están cambiando con el tiempo. Como ejemplo, una zona de playa emergida aparecerá brillante en las imágenes promediadas, pero oscura en la imagen de la varianza.



Figura A.3: Imagen de varianza de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

- **Imagen media diaria (daytime average image):** se obtienen tras el postproceso de las imágenes horarias de cada día para tener una imagen promediada de toda la jornada y caracterizar así la morfología predominante del día.



Figura A.4: Imagen media diaria de la estación de video monitorización tomada en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

A.1.4. Análisis de imágenes

Las imágenes se pueden analizar de diferentes formas. Una de las más útiles es proceder a la restitución de la imagen (usando principios de fotogrametría), gracias a lo cual se pueden obtener medidas del ancho de la playa, tamaño, localización y evolución de formas costeras (barras...). Pero, sin duda, el elemento más potente de esta tecnología radica en el uso de la variación de la intensidad de los pixels a lo largo del tiempo, que actúan

como sensores o instrumentos de medida de las características del oleaje. El problema que plantea esta técnica de medida es la precisión que requiere el sistema para poder obtener datos de fiabilidad.

A.1.5. Información que se puede obtener a partir de los datos

- Posición de la línea de costa
- Período, altura y dirección del oleaje
- Batimetría
- Perfiles de playa
- Corrientes longitudinales
- Ancho de la playa
- Tamaño y posición de formas sumergidas
- Cambios en la formas sumergidas y características del oleaje y las corrientes que las producen
- Caracterización del tramo de costa en estudio antes y después de una tormenta

A.1.6. Características de la Instrumentación

La instrumentación que requiere la técnica de video monitorización se divide en dos partes: la instrumentación que se instala en la zona de estudio y la que se necesita en el lugar habitual de trabajo. Posteriormente se describe más en detalle, pero, a modo de introducción se puede decir que ésta es:

- Instrumentación en la zona de estudio
 - Estación de trabajo: en ella se almacenarán y se realizará un preanálisis de los datos a medida que éstos se toman para posteriormente enviarlos vía internet.
 - Cámaras de video digitales: las cámaras tendrán las especificaciones técnicas requeridas según el caso concreto: dimensiones de la zona de medida, altura de ubicación de la instrumentación, precisión deseada, etc.
 - Instrumentación complementaria de las cámaras: permitirá una adecuada conexión entre las cámaras y la estación de trabajo. Asimismo, también dependerá de las características específicas de la ubicación del material.
 - Modem y línea de teléfono: sus características dependerán del sistema elegido para la transmisión de los datos al lugar de trabajo habitual.
- Instrumentación en el lugar de trabajo Se requiere un potente equipo informático para el tratamiento y almacenamiento de las imágenes. En las siguientes secciones se describen más a fondo las características de estos instrumentos.

A.1.7. Otras aplicaciones de la técnica

La técnica de video monitorización presenta, además de las aplicaciones anteriormente mencionadas, otras aplicaciones que se pueden incluir en el campo de la Ingeniería Portuaria, entre las que se encuentran:

- Estudio y monitorización de entrada y salida de barcos Mediante el sistema de vídeo-cámaras se puede hacer un seguimiento de la entrada y salida de barcos, gestionando el proceso y analizando movimientos complementarios que se pueden generar.
- Estudio de la dispersión de materiales apilados en muelles El movimiento y la dispersión de materiales que se encuentran apilados en muelles también puede ser estudiado mediante la técnica de video monitorización, ya que gracias a la variación en la intensidad de los pixels de las imágenes como consecuencia del movimiento del material se puede realizar su seguimiento, estimando cuáles son las zonas susceptibles de sufrir depósitos o pérdidas de material para distintas condiciones meteorológicas.

A.2. Emplazamiento

A.2.1. Playa de Carchuna

El sistema de vídeo-cámaras se encuentra instalado en el Faro de Sacratif, situado en el Cabo del mismo nombre, límite occidental de la Playa de Carchuna. Se trata de una instalación dependiente de la Autoridad Portuaria Almería-Motril, cuya ubicación se puede apreciar en detalle en la figura A.5.



Figura A.5: Representación de la situación del Faro de Sacratif [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

A.2.2. Playa de Trafalgar

En este caso, el sistema se encuentra instalado en el Faro de Trafalgar, también en el cabo del mismo nombre, situado en la parte sureste de la playa y que depende de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz (Figura A.6)



Figura A.6: Imagen aérea de la situación del Faro de Trafalgar

Los motivos para los emplazamientos de las estaciones han sido:

- Campo visual: desde la parte superior de los faros se tiene una visión completa de ambas playas. Además, las cámaras estarían situadas a una cota suficiente para que los errores de la restitución fotogramétrica fueran menores.
- Los faros cuenta con suministro eléctrico propio.
- Las cámaras se instalan en el exterior del faro, de tal forma que las afecciones al entorno son nulas, tanto a las instalaciones existentes en el propio faro, como al personal que trabaja en él.
- La instalación de una nueva línea de teléfono es relativamente sencilla, en tanto que ya existe una.
- Elementos auxiliares: el Faro cuenta con personal permanente que asegura la seguridad del sistema frente a robos. Asimismo, en su interior hay zonas ideales para la ubicación del ordenador, de forma que está protegido frente a las acciones meteorológicas e inclemencias del tiempo.

A.3. Instrumentación

La instrumentación que compone cada sistema de video imágenes es:

- Estación de trabajo ubicada en la Universidad de Granada. Sus características generales son: Procesador Pentium 4 1.7 Ghz, 512 Mb de memoria RAM, disco duro de 100 Gb, sistema operativo Red Hat Linux 8.0.
- Ordenador PC ubicado en el Faro. Las características generales son las mismas que las del anterior, solamente debe ser de tamaño reducido, así como ir dotado de un puerto IEEE-1394 de alta velocidad para la transmisión de las imágenes desde las cámaras.
- 3 Cámaras de video Sony DFW-X700, 1024x768 pixels, y una frecuencia máxima de 15 Hz.
- Lentes Pentax/Cosmicar con una distancia focal de 25, 50 y 75 mm.
- Protectores de las cámaras (Camara housings") modelo HOV de Videotec.
- Brazos para los protectores de las cámaras.

- Cables de conexión de las cámaras con el ordenador del faro.
- HUB para amplificar la señal al ser la distancia entre las cámaras y el ordenador superior a los cuatro metros.
- Modem RDSI para el acceso a internet.
- Línea de teléfono y toma eléctrica.

A.4. Proceso de instalación

Tras los procesos anteriores, el primer paso consistió en asegurar el acceso a internet desde el faro. Como se ha comentado anteriormente, una de las grandes ventajas de la técnica de video monitorización es que se trata de un sistema completamente autónomo, de tal manera que las imágenes se transmiten vía internet a un ordenador ubicado en Granada para su posterior tratamiento. Por ello es fundamental la existencia de una conexión a internet de la máxima calidad. Tras contactar con Telefónica, se comprobó la imposibilidad de contratar una línea ADSL en los faros por falta de cobertura. Así, se recurrió a una conexión RDSI, contratando una tarifa plana de conexión a internet las 24 horas del día. Paralelamente, se adquirió el ordenador ubicado en UGR, al que se dotó de conexión a internet y al que se le instaló Red Hat Linux 8.0 como sistema operativo. También se diseñó y adquirió el utillaje necesario para la instalación in-situ de las cámaras.

El personal de WL/ Delft Hydraulics adquirió las cámaras de vídeo y el ordenador para el faro, dadas las características peculiares del mismo y su experiencia en ese tema. Previamente enviaron a Granada los protectores de las cámaras, ya que sus dimensiones marcan las posibles alternativas de instalación in situ. Finalmente, tras la conclusión satisfactoria de este proceso y la llegada de Irv Elshoff, de Delft Hydraulics, se procedió a la instalación in situ del material. En primer lugar se configuró el ordenador de los faros, sobre todo la conexión a internet, proporcionando diversos sistemas de seguridad que evitasen la entrada de extraños en el sistema. A la vez se instalaron las cámaras dentro de los protectores, y se hizo una instalación provisional de las mismas eligiendo inicialmente el sistema de apoyo en la barandilla. Este primer sistema consistía en un mástil de hierro vertical anclado en su base a la solera de hormigón y verticalmente en tres puntos a la barandilla. En la parte exterior de este mástil, se colocaron las cámaras con sus correspondientes protectores. El objetivo fundamental de esta parte del proceso era, ya en el terreno, encontrar el conjunto de lentes más adecuadas para visualizar el tramo de costa en estudio aunando los siguientes intereses: visualizar los entrantes y las puntas, la mayor cantidad de agua y obtener una alta precisión en ambas playas.

A.5. Imágenes de prueba

Tras la instalación provisional en el faro de Sacratif con un primer diseño de lentes con distancia focal de 25 mm para la cámara 1, que visualizaba el tramo de costa más próximo al Faro, de 25 mm para la cámara 2 y de 50 mm que visualizaba el tramo de costa final, se tomaron las primeras imágenes de prueba, que no resultaron ser satisfactorias en tanto que era necesario un nuevo diseño de lentes. Ello fue debido a la resolución de los tramos de costa intermedio y final. Asimismo, se decidió cambiar la ubicación de las cámaras del mástil vertical al muro del faro, ya que para determinadas frecuencias de viento las vibraciones que se generaban en las imágenes podían dar problemas en su posterior tratamiento. Así, se estableció como nuevo emplazamiento la parte exterior del muro del faro. En el caso del faro de Trafalgar, se optó directamente por la solución adoptada en Sacratif, obteniendo también resultados satisfactorios.

A.6. Reajuste de lentes

Fue necesario un nuevo diseño de lentes (con una distancia focal de 25, 50 y 75 mm, para la cámara 1, cámara 2 y cámara 3, respectivamente), y tras la toma de las respectivas imágenes de prueba, esta elección resultó adecuada. Así pues, tras cambiar las lentes de las cámaras 2 y 3 se alcanzaba la máxima resolución posible satisfaciendo a su vez la condición de visualizar un amplio tramo de costa.

A.7. Instalación definitiva

La instalación definitiva consistió en fijar las cámaras a los protectores, y sellarlos adecuadamente al objeto de evitar la entrada de agua y humedad. Posteriormente el cableado fue adecuadamente protegido de posibles inclemencias del tiempo, así como para evitar molestias al personal del faro. En el interior, el ordenador quedó protegido adecuadamente, y la instalación se dio por concluido. Desde ese momento, el sistema se encuentra tomando imágenes, que son enviadas a la Universidad de Granada para su análisis.

A.8. Campaña topográfica

El último proceso que era necesario realizar era determinar las coordenadas reales de una serie de puntos que permitiesen la restitución fotogramétrica de las imágenes. Para ello era adecuado esperar hasta la plena instalación del sistema, de manera que estos puntos pudiesen ser identificados en las imágenes de las cámaras, y al mismo tiempo, reconocidos en el terreno. Así pues, con la ayuda de un equipo de topografía, se procedió a la toma de dichas coordenadas. En concreto, en Sacratif se determinaron 40 puntos de tal forma que se asegurase un alto nivel de precisión en el proceso. Asimismo, se obtuvieron las coordenadas precisas de las cámaras partiendo de un vértice geodésico de primer orden denominado Vázquez (458738.701, 4062933.286, 329.700). Tras ello, el proceso de instalación y ajuste del sistema estaba completado.



Figura A.7: Puntos elegidos para el ajuste de una de las cámaras en la playa de Carchuna [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

Para el caso de Trafalgar, se obtuvieron 31 puntos para asegurar ese nivel de precisión, con las coordenadas de las cámaras obtenidas a partir del vértice geodésico de primer orden de Meca (764030.36, 4010234.47, 169.10).



Figura A.8: Puntos elegidos para el ajuste de una de las cámaras en la playa de Trafalgar [Fuente: Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (UGR)]

Modelos de propagación. Introducción teórica

B.1. Modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore)

B.1.1. Introducción

SWAN (Simulating waves nearshore), (Booij *et al.*, 1999), es un modelo espectral que simula la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta las zonas costeras, teniendo en cuenta cambios de altura, forma y dirección de la ola como resultado de la acción del viento, rotura de ola, transferencia de energía entre componentes y variaciones de la profundidad del fondo así como la aparición de corrientes.

Está basado en los llamados modelos de tercera generación, (WANDI-Group, 1998) (Komen *et al.*, 1994) WAVEWATCH II (Tolman, 1991) TOMAWAC (Benoit, 2005) para la propagación de oleaje en aguas profundas y a su vez, dichos modelos, están basados en la ecuación de Balance de Energía. Estos modelos no pueden ser aplicados a zonas costeras con unas escalas de longitud (resolución espacial) menores de 20-30 km y profundidades menores de 20-30 m debido a que:

- No tienen en cuenta efectos de profundidades reducidas como rotura e interacción onda-onda
- Las técnicas numéricas empleadas son muy costosas computacionalmente en escalas pequeñas y zonas de profundidad reducida.

Como solución a estos inconvenientes se propone (Booij *et al.*, 1999):

- Modificar dichos modelos (también llamados phase-averaged) para introducir los fenómenos que tienen lugar en aguas reducidas, mediante otras técnicas numéricas.
- Utilizar otro tipo de modelos (phase-resolving) basados en las Ecuaciones de Hamilton: (Miles, 1981) (Radder, 1992); ecuaciones de Boussinesq: (Freilich y Guza, 1984) (Madsen y Sørensen, 1992) (Peregrine, 1966) o en la Ecuación elíptica de Pendiente Suave (Berkhoff, 1972) (Radder, 1979) en su aproximación parabólica o más recientemente (Dingemans, 1997).

Con estos últimos tipos de modelos también se pueden modelar los procesos de disipación por fricción o rotura, aunque no tienen en cuenta la generación de oleaje por viento. Además, debido al tipo de discretización espacial y temporal que se utiliza en su resolución numérica, fracciones de la longitud de onda y periodo, solo son útiles en escalas pequeñas ($\approx 1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$). En escalas mayores serían impracticables numéricamente.

Por ello y para poder tener una gran variedad de escalas de aplicabilidad, es necesario el uso y modificación de los modelos tipo phase-averaged, los cuales se clasifican en Lagrangianos y Eulerianos cuyas ventajas e inconvenientes se resumen brevemente a continuación:

- **Lagrangianos:** se basan en el transporte de energía de la onda a lo largo de un rayo de onda. Pueden modelar procesos de generación y disipación aunque son numéricamente ineficientes cuando se tienen en cuenta fenómenos como rotura o interacción onda-onda.
- **Eulerianos:** La evolución de la onda se modela en una red. El modelo WAM (WANDI-Group, 1998) es un ejemplo de este tipo de modelos. Todos los procesos relevantes son modelados como términos fuentes o sumideros en las ecuaciones de gobierno. Las limitaciones de este tipo de modelos son: (1) la imposibilidad de describir procesos de difracción y (2) se basan en la teoría lineal de ondas.

Teniendo en cuenta estos inconvenientes, parece aceptable utilizar modelos tipo phaseaveraged para situaciones reales (escalas 20-30 km y profundidades 20-30 m). Para ello se proponen las siguientes mejoras:

- Alejar el área de interés en unas pocas longitudes de onda con respecto a los obstáculos.
- Introducir correcciones no lineales para tener en cuenta interacción onda-onda y procesos de generación y disipación.

La mayoría de los modelos Eulerianos (Komen *et al.*, 1994) (WANDI-Group, 1998), son fácilmente aplicables a zonas de profundidad reducida introduciendo una velocidad de propagación dependiente de la profundidad y una representación (Euleriana) de la refracción. Sin embargo, estos modelos no tienen en cuenta los fenómenos de rotura e interacción onda-onda. Otra desventaja de los modelos existentes es que están construidos sobre esquemas numéricos explícitos, los cuales son condicionalmente estables. Esto puede suponer un problema en las regiones costeras donde se utilizan discretizaciones temporales pequeñas y redes espaciales de gran resolución.

El modelo SWAN es desarrollado con el objetivo de mejorar a dichos modelos mediante el:

- Uso de esquemas implícitos, incondicionalmente estables.
- Modelado de rotura inducida por la profundidad e interacción onda-onda

B.1.2. Ecuaciones de gobierno

El oleaje en las zonas oceánicas es caótico y una descripción en el dominio del tiempo es bastante limitada. Alternativamente a dicha descripción, se puede realizar un estudio espectral de oleaje, esto es, en el dominio de las frecuencias. Dicha descripción se basa en la obtención de la densidad espectral.

En multitud de problemas ondulatorios reales no es suficiente definir una densidad de energía como función única de la frecuencia, sino que es necesario introducir una dependencia de la energía con la dirección del oleaje. En este caso, dicha función o espectro se denotara como $E(f, \theta)$ y en particular, se obtiene el espectro de frecuencias como

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta$$

siendo f la frecuencia de la onda y θ la dirección de procedencia.

Es evidente que toda la información a cerca de la superficie libre del mar está contenida en la densidad de energía espectral $E(f, \theta)$, distribuida sobre todas las frecuencias y direcciones de propagación.

Normalmente, los modelos de tercera generación, determinan la evolución de la densidad de acción en lugar de la densidad de energía. La densidad de acción se define como

$$N(\vec{x}, t, \sigma, \theta) = \frac{E(\vec{x}, t, \sigma, \theta)}{\sigma}$$

en el espacio y en el tiempo. La razón por la cual se utiliza dicha magnitud es porque esta es conservada durante la propagación del oleaje en presencia de corrientes marinas, mientras que la densidad $E(f, \theta)$ no lo es, (Whitham, 1974). En general, se asume que la corriente, denotada como \vec{U} , es uniforme con respecto a la coordenada vertical.

La evolución de la densidad de acción N es gobernada mediante la ecuación de balance (Komen *et al.*, 1994; Mei, 1983)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \vec{x} \left[(\vec{c}_g + \vec{U}) N \right] + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

El término izquierdo de la ecuación es la parte cinemática de la ecuación. El segundo término denota la propagación de la energía en el espacio geográfico, con velocidad $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ con una relación de dispersión $\sigma^2 = g|\vec{k}| \tanh(\vec{k}|d)$ donde \vec{k} es el vector número de onda y d la profundidad del agua. El tercer término representa los efectos de cambio de frecuencia debido a variaciones de la profundidad y corrientes. El cuarto término representa la refracción inducida por batimetría y corrientes. Las velocidades c_σ y c_θ , ya definidas, representan la propagación de energía en el espacio espectral (σ, θ) . El miembro derecho de la ecuación, S_{tot} ,

contiene las fuentes y sumideros que representan los procesos físicos de generación, disipación y redistribución de energía.

La ecuación también puede ser expresada tanto en coordenadas cartesianas como coordenadas esféricas. En el caso de aplicaciones a pequeña escala (escala regional) y coordenadas cartesianas dicha ecuación se expresa (Hasselmann *et al.*, 1973) del modo siguiente:

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

donde:

- $\frac{\partial N}{\partial t}$ representa la variación local en el tiempo de la densidad de transporte
- $\frac{\partial c_x N}{\partial x}$ y $\frac{\partial c_y N}{\partial y}$ representan la propagación de transporte en el espacio
- $\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}$ representa el cambio en la frecuencia debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes.
- $\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}$ representa la refracción debida a cambios en la profundidad y en las corrientes.
- $\frac{S}{\sigma}$ el término $S = S(\sigma, \theta)$ es el término fuente y tiene en cuenta los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales onda-onda

Dentro de este último término, SWAN tienen en cuenta 6 procesos físicos que contribuyen a la generación, disipación y transformación de la energía. Estos procesos son representados por los siguientes términos fuente:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b}$$

Dichos términos denotan, respectivamente, crecimiento de oleaje por viento, transferencia no lineal de energía mediante interacción entre 3 y 4 componentes y disipación debida a la rotura por descrestamiento y por fondo y disipación por fricción con fondo.

B.1.3. Modelado de obstáculos

SWAN puede estimar la transmisión del oleaje a través de estructuras lineales tales como un rompeolas. Se asume que el obstáculo es estrecho comparado con el tamaño de las celdas de la red computacional. Si en realidad la anchura del obstáculo es grande comparada con las celdas de la red, éste se tomará como un rasgo de la batimetría.

Para el caso de obstáculos lineales el campo de oleaje se ve afectado mediante tres procesos:

- reduciendo la altura de ola que se propagan a través del obstáculo o sobre toda su longitud.
- produciendo reflexión de las ondas.
- produciendo efectos de difracción en sus bordes.

En oleaje irregular, sin embargo, parece que el efecto de la difracción es pequeño, excepto en una región que diste menor que una o dos longitudes de la punta del obstáculo (Booij, 1977). Por tanto, el modelo puede tener en cuenta razonablemente la evolución del espectro alrededor del obstáculo si el espectro direccional que llega al mismo no es demasiado estrecho.

B.2. Modelo Ref-Dif (REFraction - DIFraction)

B.2.1. Introducción

Cuando una onda se propaga sobre una batimetría irregular y/o alrededor de cabos e islas se producen procesos de asomeramiento, refracción, disipación de energía, difracción y rotura. Existen numerosos modelos numéricos que simulan la propagación del oleaje en presencia de estos complejos fenómenos. Generalmente estos modelos se dividen en dos grandes grupos: modelos basados en la simulación de flujos de superficie libre empleando las ecuaciones de Navier-Stokes o las ecuaciones de Boussinesq, y modelos basados en la teoría de propagación de ondas (teoría del rayo y ecuación para pendientes suaves) que requieren en general asumir una serie de hipótesis sobre el fenómeno. Sin embargo estos últimos permiten obtener formulaciones muy compacta con un coste computacional muy bajo en comparación con los primeros. A pesar de su elevado coste computacional y su rango de validez de $h/L \approx 0.50$ (Madsen *et al.*, 1992) el empleo de las ecuaciones de Boussinesq (1872) proporciona buenos resultados de la propagación de ondas largas. Estos modelos se usan además para estudiar la agitación en puertos y fenómenos de resonancias en dársenas y permiten evaluar no solo la difracción y refracción del oleaje sino también la reflexión de las ondas inducida por las paredes del contorno y la radiación de energía hacia el exterior del dominio del fluido. En este anejo se describe el modelo débilmente no lineal de refracción- difracción combinada, modelo denominado REF/DIF presentado por primera vez por Kirby y Dalrymple (1983). Este modelo se basa en un desarrollo en serie de Stokes de las ecuaciones que definen el problema de propagación de ondas incluyendo una aproximación hasta el tercer orden de la celeridad de onda. La amplitud de la onda se aproxima hasta el segundo orden (Liu y Tsay, 1984). Los modelos de refracción- difracción combinada se emplean porque incluyen ambos efectos (refracción y difracción) y permiten modelar el oleaje donde la batimetría es irregular y/o donde los efectos de la difracción son importantes. Este tipo de modelos numéricos permiten calcular la altura de ola y su dirección en zonas como bahía y alrededor de islas cerca a la costa. La aplicación del modelo teórico a situaciones practicas incluye el uso de una aproximación parabólica, que limita la dirección de propagación de oleaje dentro de un rango de $\pm 55^\circ$ alrededor de la dirección de propagación dominante. La aproximación parabólica permite obtener la amplitud de la onda resolviendo las ecuaciones mediante diferencias finitas con un coste computacional muy reducido, pero no permite reproducir correctamente la reflexión del oleaje producida por estructuras maritimas.

B.2.2. Ecuaciones de gobierno

B.2.2.1. Ecuación de pendiente suave

La propagación de ondas de Stokes en 2D sobre batimetría con variación suave ha sido predicha teóricamente por Chu y Mei (1970) y Djordjevic and Redekopp (1978). Sin embargo el problema de la propagación sobre batimetría irregular es tridimensional con condiciones de contorno no lineales. Para la simplificación del problema tridimensional Berkhoff (1972) formuló una ecuación denominada "mild slope equation" que representa el desplazamiento de la superficie libre $\eta(x, y)$ mediante el operador gradiente horizontal $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x_j}; j = 1, 2$ según la fórmula:

$$\vec{\nabla}(c c_g \vec{\nabla} \eta) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0$$

donde $C = \sqrt{(g/k) \tanh kh}$ es la celeridad de la onda y $c_g = c \frac{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)}{2}$ la celeridad de grupo en función de la aceleración de gravedad g , de la profundidad local del agua $h(x, y)$ y del numero de onda local $k(x, y)$, relacionado con la frecuencia angular y la profundidad a través de la ecuación de dispersión lineal.

El perfil de onda se representa según la fórmula:

$$\eta = A(x, y) \exp(i\sigma t)$$

donde σ es la frecuencia angular y $A(x, y)$ es la amplitud compleja con información sobre la fase y la amplitud real de la onda.

Radder (1979) desarrolló una aproximación parabólica de la ecuación de pendiente suave en forma elíptica de Berkhoff, que permite simplificar las condiciones de contorno y además permite una técnica de resolución

muy eficiente por medio de un modelo en diferencias finitas. Booij (1981) mejoró la aproximación parabólica de Berkhoff. El procedimiento de Booij es el que se utiliza en el modelo OLUCA-MC.

La aproximación parabólica débilmente no lineal a la ecuación de pendiente suave se define por:

$$c_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(k_0 - k)c_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[c c_g \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0$$

donde k_0 es un valor promedio del número de onda a lo largo del eje y , con D igual a:

$$D = \frac{\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh}{8 \sinh^4 kh}$$

La ecuación de pendiente suave modificada para una corriente débil ha sido obtenida por Kirby y Dalrymple (1983) y se representa mediante la fórmula, donde U y V representan la velocidad media en la dirección x e y :

$$(c_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(k_0 - k)(c_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{V}{\sigma} \right] A + \\ - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[(c c_g - V^2) \frac{\partial A}{\partial y} \right] - i\sigma k^2 D |A|^2 \frac{A}{2} = 0$$

Por último Kirby y Dalrymple (1985) han desarrollado una versión no lineal del modelo parabólico que incluye corrientes fuertes para un fluido no viscoso e irrotacional, donde despreciando la influencia de la onda larga y la dependencia de A respecto del tiempo, los autores obtienen una ecuación parabólica para la amplitud compleja, cuyo desarrollo se puede encontrar en Kirby y Dalrymple (1985) y Kirby (1986), y que representa la ecuación discretizada en el modelo OLUCA-MC.

El modelo SMC en su forma parabólica se basa en la hipótesis de fondo de pendiente suave, esto significa que las variaciones del fondo con las coordenadas horizontales son pequeñas en comparación con la longitud de onda. Las comparaciones entre un modelo numérico exacto y la ecuación de pendiente suave para el modelo lineal efectuado por Booij (1981) precedió que hasta pendientes de fondo de 1:3 el modelo de la pendiente suave resulta exacto Berkhoff *et al.* (1982).

B.2.2.2. Débil no linealidad

El modelo se basa en un desarrollo de Stokes que resulta menos restrictivo en aguas profundas e intermedias. Para cuantificar la no linealidad se emplea el número de Ursell que se define como:

$$U = \frac{|A|L^2}{h^3}$$

Para valores del número de Ursell $U < O(1)$ la solución lineal de Stokes deja de ser válida.

En aguas poco profundas, para que el modelo sea válido se implementa como opción la relación de dispersión que modela la dispersión por amplitud, dada por Hedges (1976) y representada por la fórmula:

$$\sigma^2 = gk \tanh[k(h + |A|)]$$

En aguas poco profundas la relación tiende a:

$$\sigma^2 = gk^2(h + |A|)$$

que representa la velocidad de propagación de una onda solitaria de altura: $H = |A|$. En aguas profundas la ecuación de la dispersión se aproxima asintóticamente a los resultados de onda lineal con $\frac{|A|}{h} \rightarrow 0$.

Con las diferentes relaciones de dispersiones posibles, se dispone de tres opciones en el SMC:

- Modelo Lineal
- Modelo Stokes-Hedges no lineal

- Modelo de Stokes

En la simulación se ha empleado un modelo lineal que permite describir bien todos los fenómenos que se producen en las zona de estudio.

B.2.2.3. Modelización de la disipación de energía

La simulación realista de la propagación de oleaje requiere la inclusión de efectos de disipación de energía. La presencia localizada de disipación de energía provoca la difracción del oleaje, así como su atenuación. La inclusión de un término de disipación de energía en la ecuación de propagación fue estudiada por Skovgaard, Jonsson y Bertelsen (1975), que presentaron un modelo de disipación por fricción de fondo y siguiendo esta idea Booij (1981) y posteriormente Dalrymple, Kirby y Hwang (1984) desarrollaron modelos parabólicos incluyendo dicho término de disipación.

Dalrymple, Kirby y Hwang (1984) introdujeron un factor de disipación γ en la ecuación de Berkhoff (1972), donde γ es la disipación de energía dividida por la energía y su unidad es la inversa del tiempo. Ese factor adopta diferentes expresiones en función del origen de la disipación de energía.

- Capa límite turbulenta en el fondo

En el campo las condiciones de oleaje son tales que la capa límite en el fondo es siempre turbulenta. En este caso la disipación de energía se puede obtener utilizando el coeficiente de fricción de Darcy Weisbach, f_w . Se puede demostrar (Dean y Dalrymple, 1984), que la disipación de energía para esta capa límite viene dada por la expresión:

$$\gamma = \frac{2\sigma 4f_w k|A|(1-i)}{3\pi \sinh(2kh) \sinh(kh)}$$

con $f_w = 0,01$ (Coeficiente de Darcy Weisbach para olas).

- Rotura

El fenómeno más significativo de la hidrodinámica costera es la rotura del oleaje. El análisis de la rotura sirve para determinar la pérdida de energía, la altura de la ola y la profundidad a la que rompe la ola. El modelo OLUCA-MC utiliza un modelo que determina la variación espacial de la energía de las ondas, desarrollado por Dally, Dean y Dalrymple (1985). Este modelo no solo describe la rotura sino también el proceso de recomposición de las olas. El modelo ha sido calibrado con los ensayos de Horikawa y Kuo (1966) en laboratorio para un determinado número de pendiente de fondo, periodo de ola y altura de ola.

Kirby y Dalrymple (1986) adaptaron este modelo de rotura para la aproximación parabólica. Para ello Kirby y Dalrymple (1986) asumieron que la ecuación de la energía se escribía de la forma:

$$\frac{\partial(Ec_g)}{\partial x} = -WE$$

Donde Ec_g es el flujo de energía de energía integrado verticalmente y promediado en el tiempo dado por la teoría lineal en aguas pocos profundas y donde W es el factor de disipación por rotura incluido en la ecuación en del modelo OLUCA-MC:

$$W = \frac{Kc_g}{h} \left(1 - \left(\frac{\Gamma h^2}{2|A|} \right) \right)$$

con $K = 0,15$ y $\Gamma = 0,40$ constantes empíricas determinadas por Dally *et al.* (1985). El criterio de inicio rotura utilizado es el de Mc Cowan que se define como: $H_b \geq 0,78h_b$. El modelo OLUCA-MC es capaz de calcular e oleaje dentro y fuera de la zona de rotura. El algoritmo de rotura es siempre activo en el modelo.

■ Zona de tierra

Las grandes islas y las costas se tratan mediante la técnica de la "película delgada" de Dalrymple Kirby y Mann (1984), que permite el cálculo de las alturas de olas alrededor de islas, reemplazando las islas por bajos extremadamente someros (1mm). De esta manera el Oluca-MC no distingue desde el punto de vista computacional las islas de las aéreas de mayor profundidad, obteniendo como resultado la influencia de las islas sobre el oleaje.

B.2.2.4. Modelización de oleaje monocromático

Para una determinada frecuencia, la dirección del oleaje viene determinada por la distribución de la altura de onda inicial sobre la línea de mar abierto correspondiente a $x=0$, línea paralela a la línea de costa. Entonces la onda se define generalmente como:

$$A(0, y) = A_0 \exp(i by)$$

B.2.2.5. Método de resolución

Las ecuaciones empleadas en el modelo resultan entonces: asomeramiento, refracción por fondo, difracción, presencia de corrientes, disipación de energía rotura y dispersión por amplitud. Estas ecuaciones se resuelven con el método de diferencias finitas sobre una malla rectangular. El dominio de estudio constituido por la batimetría tiene que ser transformado desde un dominio continuo a un dominio discreto, constituido por nodos donde se definen las variables del problema.

Entonces una malla está formada por una red rectangular de puntos de dimensione D_x , D_y en x e y . En cada nodo de la malla se obtienen la profundidad, las componentes horizontal y vertical de la corriente, la amplitud compleja A del oleaje que satisface la ecuación parabólica. Las coordenadas de un nodo se definen mediante los índices i, j . El procedimiento incluye el expresar todas las derivadas en las direcciones (x,y) en términos de la amplitud compleja en varios puntos de la malla.

Las aproximaciones parabólicas son ecuaciones complejas de difusión no lineales. Para su resolución se emplea el método de Crank- Nicholson, implícito de segundo orden. La precisión del esquema empleado es de orden $O(D_x^2, D_y^2)$.

La solución progresa moviendo una fila de la malla en la dirección x (incrementando i en uno) y utilizando la técnica implícita implícita de doble pasada se determina la amplitud compleja $A_{i+1,j}$ para todos los valores j de esa fila. Progresando en la dirección del oleaje, se repiten los cálculos hasta determinar los $A_{i,j}$ en todos los puntos i,j . Aunque parezca que el método de Crank Nicolson pueda ser costoso en tiempo de ordenador, debido a que se realiza una inversión de matriz para cada fila de la malla, las matrices son $3 \times N$ y el procedimiento de inversión es, de hecho, muy rápido. El procedimiento es económico en requerimientos de memoria, dado que sólo son necesarios los valores en las filas i e $i+1$ en cada cálculo. En la fila correspondiente a $i=1$, se definen las ondas incidente que se propagan sobre la batimetría del modelo. Para que el sistema de ecuaciones quede definido es necesario especificar unas condiciones de contorno laterales. En el modelo se ha elegido la condición en contornos laterales abiertos, que permiten la transmisión del oleaje siendo la condición mas realista que permite tanto la entrada como la salida del oleaje sin producir reflexiones que además no resultan reales en los contornos laterales. Este condición de reflexión se obtiene bajo la hipótesis de ondas planas, sin cambios de la profundidad en los contornos en dirección Y y bajo la validez de la ley Snell es válida en los contornos (Kirby, 1986).

Tormentas seleccionadas en Trafalgar

En este apéndice se muestran las imágenes y gráficas de aquellas tormentas que no han sido representadas anteriormente.

Bibliografía

- [1] LOSADA, M.A., ORTEGA-SÁNCHEZ, M., BAQUERIZO, A., SANTIAGO, J.M., SÁNCHEZ, E. 2009. Dinámica de la costa andaluza. *Proyecto Andalucía. Ecología* (obra completa, ISBN: 978-84-933178-2-9), tomo XXIX (*Ecología II*, ISBN: 978-84-036736-1-1), capítulo 9, 284-344.
- [2] WRIGHT, L.D., SHORT, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches. *Marine Geology* 56, 93-118.
- [3] MASSELINK, G., SHORT, A.D., 1993. The effect of the tide range on beach morphodynamics: a conceptual model. *Journal of Coastal Research* 9, 785-800.
- [4] RANASINGHE, R., SYMONDS, G., BLACK, K., HOLMAN, R., 2004. Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study. *Coastal Engineering* 51, 629-655.
- [5] GUZA, R.T., INMAN, D.L., 1975. Edge waves and beach cusps. *Journal of Geophysical Research* 80, 2997-3012.
- [6] WERNER, B.T., FINK, T.M., 1993. Beach cusps as self-organized patterns. *Science* 260, 968-971.
- [7] DEAN, R.G., MAURMEYER, E.M., 1980. Beach cusps at Point Reyes and Drakes Bay beaches, California. *Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, pp. 863-884.
- [8] COCO, G., O'HARE, T.J., HUNTLEY, D.A., 1999. Beach cusps: a comparison of data and theories for their formation. *Journal of Coastal Research* 15 (3), 741-749.
- [9] HOLLAND, K.T., 1998. Beach cusp formation and spacings at Duck, USA. *Continental Shelf Research* 18, 1081-1098.
- [10] MASSELINK, G., RUSSELL, P., COCO, G., HUNTLEY, D., 2004. Test of edge wave forcing during the formation of rhythmic beach morphology. *Journal of Geophysical Research* 109, C06003.
- [11] SUNAMURA, T., 2004. A predictive relationship for the spacing of beach cusps in nature. *Coastal Engineering* 51, 697-711.
- [12] COCO, G., MURRAY, A.B., 2007. Patterns in sand: from forcing templates to self-organisation. *Geomorphology* 91, 271-290.
- [13] BUSCOMBE, D., MASSELINK, G., 2006. Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews* 79, 33-52
- [14] ORTEGA SÁNCHEZ, M., FACHIN, S., SANCHO, F. LOSADA, M.A., (2008c) Relations between beach-face morphology and wave climate at Trafalgar beach (Cádiz, Spain). 2008b. *Geomorphology* 99, 171-185.
- [15] QUEVEDO, E., BAQUERIZO, A., LOSADA, M.A., ORTEGA SÁNCHEZ, M. (2008a). Large-Scale coastal features generated by atmospheric pulses and associated edge waves. *Marine Geology (Mar Geol)* 247, 226-236.
- [16] ORTEGA SÁNCHEZ, M., LOSADA, M.A., BAQUERIZO, A. (2004). Reply to Comment on "On the development of large features on a semi-reflective scale beach: Carchuna beach, Southern Spain" by A Ashton and A Brad Murray. *Marine Geology (Mar Geol)* 206, 285-288.

- [17] ORTEGA SÁNCHEZ, M., LOSADA, M.A., BAQUERIZO, A. (2003). On the development of large-scale cusped features on a semi-reflective beach: Carchuna beach, Southern Spain. *Marine Geology (Mar Geol)* 198, 209-223.
- [18] HOLMAN, R.A., STANLEY, J., 2007. The history and capabilities of Argus. *Coastal Engineering* 54, 477-491. Inman, D.L., Guza, R.T., 1982.
- [19] SUNAMURA, T., HORIKAWA, K., 1974. Two-dimensional beach transformation due to waves, *Proceedings of the 14th Conference on Coastal Engineering*, 920-938.
- [20] KOMAR, P.D., 1976. Beach processes and sedimentation. *Prentice Hall, N.J., USA*
- [21] AARNINKHOF, S.G.J. AND HOLMAN, R.A, 1999. Argus video-based monitoring of the nearshore zone: A tool for both nearshore science and coastal zone management. *Backscatter* 10, 2, 8-11.
- [22] BOOIJ, N., RIS, R.C. Y HOLTHUIJSEN, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res*, 104 (C4): 7649- 7666.
- [23] KOMEN, G.J. et al., 1994. Dynamics and Modelling on Ocean waves. *Cambridge University Press.*, New York, 532 pp.
- [24] TOLMAN, H.L., 1991. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents. *J. Phys. Oceanogr.*, 21(6): 782-797.
- [25] BENOIT, M., 2005. Evaluation of methods to compute the non-linear quadruplet interactions for deep-water wave spectra, *Proc. 5th Int. Symp. WAVES 2005*, Madrid, Spain.
- [26] MILES, J.W., 1981. Hamiltonian formulations for surface waves *Appl. Sci. Res.*, 37: 185- 204.
- [27] RADDER, A.C., 1992. An explicit Hamiltonian formulation of surface waves in water of finite depth. *J. Fluid Mech.*, 237: 435-455.
- [28] FREILICH, M.H. y GUZA, R.T., 1984. Nonlinear effects on shoaling surface gravity waves. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, (A311): 1-41.
- [29] MADSEN, P.A. Y SØRENSEN, P., 1992. A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics, 2, A slowly-varying bathymetry. *Coastal Eng.*, 18: 183-205.
- [30] PEREGRINE, D.H., 1966. Long waves on a beach. *J. Fluid Mech.*, 27: 815-827.
- [31] BERKHOFF, J.C. W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. In: ASCE (Editor), *Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering*, New York, pp. 471-490.
- [32] RADDER, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation. *J. Fluid Mech.*, 95: 159-176.
- [33] DINGEMANS, M.W., 1997. Water wave propagation over uneven bottoms. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 13. World Scientific, 471 pp.
- [34] WHITHAM, G.B., 1974. Linear and nonlinear waves. *Wiley*, New York, 636 pp.
- [35] MEI, C.C., 1983. The applied dynamics of ocean surface waves. *Wiley*, New York, 740 pp.
- [36] KOMEN, G.J. et al., 1994. Dynamics and Modelling on Ocean waves. *Cambridge University Press.*, New York, 532 pp.
- [37] HASSELMANN, K. et al., 1973. Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12(A8): 1-95.
- [38] KIRBY, J.T. Y R. A DALRYMPLE (1983). A parabolic equation for the combined refraction- diffraction of Stokes Waves by mildly varying topography. *J. Fluid Mech.*, 136, pp.543-566.
- [39] LIU, P.L.F. Y T.K. TSAY (1984). On weak reflection of water waves. *Journal Fluid Mech.*, 131, pp. 59-71.

- [40] CHU, V.C. Y C.C. MEI (1970). On Slowly Varying Stokes Waves. *J. Fluid Mech.*,41,pp. 873-887.
- [41] DJORDJEVIC, V. D.Y L.G. REDEKOPP(1978). On the development of packets of surface gravity waves moving over and Uneven Bottom. *Z. Angew. Math. And Phys.*, 29,pp.950-962.
- [42] BERKHOFF, J. C. W. (1972). Computation of Combined Refraction-Diffraction. *Proceedings of the 13th International Conference of Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver,pp. 471-490.
- [43] RADDER, A. C. (1979). On the parabolic equation method for water - wave propagation. *Journal of fluid mechanics*, vol. 95, part 1,pp. 159-176.
- [44] BOOIJ, N. (1981). Gravity Waves on Water with Non- uniform Depth and Currents. *Report n. 81-1*, Delft University of Technology, 131 pp.
- [45] KIRBY, J. T. Y R. A. DALRYMPLE (1985) . Modifications to a rpropagation model for the combined refraction- diffraction of Stokes waves; Shallow water, Large angle and breaking wave effects. *Report UFL/COEL- 85/001*, Coastal and Oceanographical Engineering department, University of Florida, Gainesville.
- [46] KIRBY, J.T. (1986). Rational approximations in the parabolic equation method for water waves.. *Coastal Engineering*, 10,pp. 355-378.
- [47] BERKHOFF, J. C. W., N. BOOIJ Y A. C. RADDER (1982). Verification of Numerical wave Propagation Models for simple harmonic Linear Waves. *Coastal Engineering*,6,pp 255-279.
- [48] HEDGES, T. S. (1976). An empirical modification to linear wave theory.Proc. *Institute of Civil Engineering*,61,pp.575-579.
- [49] SKOVGAARD, O., I.G. JONSSON Y J. A.BERTELSEN (1975). Computation of wave heights due to refraction and friction. *Journal of waterway, port, Coastal and Ocean division*, ASCE,101,WW1,pp. 15-31.
- [50] DALRYMPLE, R.A., J.T.KIRBY Y P.A. HWANG (1984). Wave diffraction due to areas of energy dissipation. *Journal of Waterway, Port, oastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol. 110, n 1, pp. 67-79.
- [51] DEAN, R. G. Y R.A. DALRYMPLE (1984). Water wave mechanics for engineers and scientists. *Englewood Cliffs: Prentice- Hall*
- [52] KIRBY, J. T. Y R. A. DALRYMPLE (1986) . Modelling waves in surf-zone and around islands. *Journal of waterway, Port, coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol.112, n 1,pp. 78-93.
- [53] DALLY, W.R., R.G.DEAN Y R.A.DALRYMPLE (1985). Wave Height variation across beaches of arbitrary profile. *Journal of Geophysical research*,90, C6,pp 11917-11927.