



IISTA

Instituto Interuniversitario de Investigación
del Sistema Tierra en Andalucía

**DISEÑO DE GRANJAS DE CONVERTIDORES DE
ENERGÍA DEL OLEAJE Y ESTUDIO DE SUS
IMPLICACIONES EN LA DINÁMICA COSTERA**

Trabajo Fin de Grado

Autor: Adolfo García García

Tutores: Miguel Ortega Sánchez - Rafael Jesús Bergillos Meca

Departamento: Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



ugr

Universidad
de Granada



DISEÑO DE GRANJAS DE CONVERTIDORES DE ENERGÍA DEL OLEAJE Y ESTUDIO DE SUS IMPLICACIONES EN LA DINÁMICA COSTERA

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Adolfo García García

Tutores:

Miguel Ortega Sánchez

Rafael Jesús Bergillos Meca



ugr

Universidad
de Granada



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 4 |
| 1. Introducción..... | 6 |
| 2. Objetivos..... | 10 |
| 3. Zona de Estudio..... | 11 |
| 3.1. Evolución Línea de Costa..... | 13 |
| 3.2. Problemática Actual de Playa Granada..... | 17 |
| 3.3. Análisis General del Clima Marítimo..... | 21 |
| 4. Metodología..... | 25 |
| 4.1. Revisión de Trabajos Previos..... | 25 |
| 4.2. Disposición y Geometría de la Granja de Olas: Planteamiento de Alternativas..... | 26 |
| 4.3. Modelado Numérico de Propagación del Oleaje: Delft3D-Wave..... | 29 |
| 4.4. Modelado de Evolución del Perfil de Playa: XBeach-G..... | 31 |
| 5. Resultados..... | 33 |
| 5.1. Influencia de las Granjas en la Propagación del Oleaje..... | 33 |
| 5.2. Influencia de las Granjas en el Run-Up..... | 36 |
| 5.3. Influencia de las Granjas en la Evolución del Perfil de Playa (Volumen Emergido)..... | 39 |
| 6. Selección de Alternativa..... | 51 |
| 7. Presupuesto de la Alternativa Seleccionada..... | 54 |
| Bibliografía..... | 57 |

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado pretende encontrar una solución óptima al problema de erosión en Playa Granada (Motril) provocado, entre otros factores, a un desequilibrio del sistema como consecuencia de la disminución de los aportes de sedimentos procedentes del río Guadalfeo. Se plantea como objetivo de este trabajo establecer una solución basada en el estudio de la influencia de convertidores de energía del oleaje en la morfología de playas heterogéneas.

Playa Granada (Motril) es una playa de tipo heterogénea, cuya característica principal es el amplio rango de tamaños de sedimentos, con una estratificación vertical cambiante, y cuya proporción y gradación son variables tanto transversalmente como longitudinalmente. Pertenece a un sistema deltaico, delta del Guadalfeo, donde se producen fenoles transición entre ambientes fluviales y marítimos, siendo vulnerable a cambios climáticos. La zona se encuentra sometida a un oleaje bidireccional, siendo las direcciones predominantes Este-Sureste y Oeste-Suroeste.

Para llevar a cabo este estudio, en primer lugar se obtuvo información relevante mediante la revisión de trabajos previos relacionados con nuestra zona de estudio y en los cuáles se han llevado a cabo diferentes actuaciones sobre la misma. Posteriormente, se plantearon y trazan en AutoCad las posibles alternativas para la implantación de las granjas de convertidores de energía con sus correspondientes dispositivos.

Estas alternativas se introdujeron como obstáculos en el modelo DelftD, el cuál realiza la propagación de oleaje desde profundidades indefinidas hacia la costa. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el modelo de propagación de oleaje indican que la mejor alternativa para la implantación de una granja de convertidores de energía es la alternativa número 5, debido a que presenta mayores valores de potencia de las olas y que, junto con el análisis de las variables hidrodinámicas y morfológicas presentadas en este trabajo, concluimos que es la mejor ubicación en términos de rendimiento energético y protección costera. A continuación, se ha realizado un estudio

de la evolución del perfil de playa con el modelo XBeach-G para analizar las repercusiones sobre la misma y estos resultados se utilizaron para cuantificar el oleaje y los cambios morfológicos tormentosos en los perfiles de estudio para cada escenario.

Posteriormente, se ha realizado un estudio comparativo basado en criterios funcionales, económicos y medioambientales para determinar la mejor alternativa en conjunto , consistiendo en la construcción de una granja que contiene 11 WaveCat dispuestos en dos filas, con una separación entre los dispositivos de $2.2D$, donde $D = 90$ m, siendo esta la distancia entre los arcos gemelos de un solo dispositivo, ocupando un área aproximada de $1.500\text{m} \times 350\text{m}$.

A continuación, se incluye el proceso constructivo de cada Wavecat así como la secuencia en la que éstos deben ser construidos. Finalmente, se determina la valoración económica de los dispositivos Wave Dragon, incluyendo el coste capital, costes de operación y mantenimiento, factores que influyen en los costes, evolución con el tiempo y costes de la tecnología seleccionada. La suma total de estos costes da como resultado el coste total de la granja de olas, compuesta por 11 dispositivos WaveCats (Wave Dragon) con un valor estimado total de 118.000.000 €.

1. Introducción

En las últimas décadas, las actividades humanas, como la canalización, la desviación de canales o la regulación de los ríos, han alterado la dinámica natural de las costas deltaicas y han generado problemas de erosión en todo el mundo (*Syvitski and Saito, 2007; Syvitski et al., 2009; Anthony et al., 2014*). Estas áreas son particularmente vulnerables, no sólo a los cambios impulsados por los seres humanos, sino también a los efectos del calentamiento global (*Jeftic et al., 1996, Nicholls and Hoozemans, 1996*). En este contexto, es esencial investigar estrategias para la mitigación y/o adaptación a los problemas mundiales de erosión (*Syvitski et al., 2005, Anthony, 2015*) y las consecuencias futuras del aumento del nivel del mar (*Payo et al., 2016; Spencer et al. Al., 2016*).

Las energías renovables tienen por definición la gran ventaja de ser recursos limpios con escaso impacto ambiental que proceden de una fuente natural inagotable. El caso tratado en esta TFG es uno de ellos: la energía undimotriz o del oleaje. Con un funcionamiento eficiente de ésta, se reduciría la dependencia exterior al combustible fósil y permitiría mayor autonomía energética al país.

Es posible predecir con cierta antelación el estado de mar de una zona, sin embargo, la explotación de éste recurso íntegramente se hace problemática debido a la imposibilidad de concentrar la energía en un punto para su extracción. Por ello, aunque en principio el oleaje sea una fuente con mayor capacidad y continuidad de salida energética, no presta tan buenos resultados como la eólica o la solar.

El estado actual es el característico de una tecnología en desarrollo, quedan todavía importantes retos por superar que requieren una fuerte inversión en I + D+ I. Así como otras renovables han obtenido un gran apoyo institucional en investigación y subvención de la tarifa o prima eléctrica, la energía undimotriz únicamente está contemplada en la legislación y en el Plan de

Energías Renovables de forma genérica. Las energías marinas reciben menos apoyo puesto que tienen una evolución más larga y lenta desde la fase de prototipo hasta llevar a cabo pruebas en mar abierto. Para una buena evolución sería necesario fomentar el I+D+I y un marco regulatorio por parte del estado.

En el mercado actual dista mucho de ser una energía competitiva. La inversión inicial requerida por un proyecto de esta magnitud es muy elevada y contiene una componente de riesgo difícil de asumir. No sólo ésta es desorbitada, sino que también lo son los posteriores costes de instalación, operación y mantenimiento. Los dispositivos alejados de la costa tienen una componente adicional debida al sistema de amarre, que debe ser revisado y sustituido cada poco tiempo. La tendencia con el tiempo es que la tecnología sea cada vez más competitiva con el resto gracias, entre otros factores, a la posibilidad de construir dispositivos mas potentes que reduzcan el coste por kW y a la mejora de los rendimientos.

El oleaje real presenta una gran irregularidad en la amplitud, fase y dirección de la ola, la potencia entrante es totalmente aleatoria. Los dispositivos tienden a intentar seguir el perfil irregular, por este motivo, los convertidores vienen equipados con un sistema que acumule la energía (volante de inercia o un acumulador hidráulico) que suavice los picos que llegan al generador. A pesar de todo, se hace difícil obtener el máximo rendimiento en todo el intervalo de frecuencias. Es necesario realizar mejoras en los rendimientos del sistema energético.

Es necesario conocer en la medida de lo posible el rango y la frecuencia de los distintos periodos y alturas de ola presentes para tratar de que el diseño no opere por debajo de las posibilidades de la zona ni por lo contrario, esté sobredimensionado y actúe por debajo del punto de eficiencia óptima.

Analizando las combinaciones más problemáticas de clima de oleaje se ha obtenido:

1. Olas con periodos cortos y alturas elevadas. Son olas peraltadas que pueden llegar a romper sobre el dispositivo, una excesiva carga sobre el aparato podría causar daños estructurales. Se procede a la desactivación puesto que se antepone la supervivencia a la extracción de energía.
2. Estados de mar con escasa energía en el oleaje para generar electricidad de manera económica.
3. La energía del oleaje está por encima de la capacidad de absorción del aparato. Los dispositivos se dimensionan con una potencia máxima de salida de manera que sean lo más competitivos posible.
4. Con olas de periodos muy largos la energía es casi inaccesible.

Trabajos recientes sobre convertidores de energía de las olas (WECs) han señalado que se pueden alcanzar rendimientos óptimos para las olas con períodos de pico relativamente cortos (*e.g.*, *López-Ruiz et al. (2015) or Jalón et al. (2016)*). Este es un hallazgo clave para las costas mediterráneas, donde el clima es predominantemente moderado (*Ortega-Sánchez et al., 2017*). El desempeño y la gestión de los WECs que trabajan en el litoral también han recibido una creciente atención en los últimos años (*e.g.*, *Veigas et al. (2014) or López-Ruiz et al. (2016)*).

Cuando las granjas WECs se encuentran cerca de la costa, se ha descubierto que actúan como elementos de defensa costera debido tanto a la energía de las olas absorbida por la formación, como a la disipación inducida por los obstáculos, con muchos trabajos que muestran la reducción significativa de las alturas de ola en el lado de sotavento de las granjas (*Beels et al., 2010, Palha et al., 2010; Ruol et al., 2011; Carballo e Iglesias, 2013, Monk et al., 2013; Rusu and Soares, 2013; Zanuttigh and Angelelli, 2013; Iglesias y Carballo, 2014*). Los efectos de las granjas de olas sobre las respuestas morfológicas, tanto de la línea costera (*Millar et al., 2007; Mendoza et al., 2014*)

como del perfil de playa (*Abanades et al., 2014b, a, 2015*), también se han cuantificado en playas arenosas . Así, los dispositivos para la explotación de las fuentes de energía marinas traen una oportunidad para mejorar la gestión sostenible de la zona costera.

Los objetivos principales de este trabajo son cuantificar y analizar la influencia de la posición costera de las granjas de olas en la hidrodinámica y morfodinámica de una costa deltaica dominada por grava (Guadalfeo, sur de España) bajo condiciones de tormenta. Para alcanzar estos objetivos, se evaluaron los patrones de propagación de olas, la evolución de estas y los cambios morfológicos de la playa mediante la aplicación de modelos calibrados morfodinámicos y de propagación de olas a ocho escenarios distintos de ubicación de las granjas. Todos los resultados se compararon con la situación actual (sin granja) y se seleccionó la mejor alternativa, basada en el rendimiento energético y los criterios de protección costera. Este último se cuantificó como las reducciones en la altura de las olas costeras, la evolución de estas y la erosión de las playas.

Este documento está estructurado de la siguiente manera:

- Las secciones 3 y 4 describen la zona de estudio y los métodos utilizados para llevar a cabo este estudio, respectivamente.
- La sección 5 detalla los resultados, es decir, la influencia de las granjas de WEC en la propagación del oleaje y los cambios morfológicos de la playa en función de su localización en la costa.
- Finalmente, se procede a la selección de la alternativa más eficiente recogida en la Sección 6 asociada a un presupuesto de construcción desarrollado en la Sección 7.

2. Objetivos

Este Trabajo Fin de Grado pretende encontrar una solución óptima al problema de erosión en Playa Granada (Motril) provocado, entre otros factores, a un desequilibrio del sistema como consecuencia de la disminución de los aportes de sedimentos procedentes del río Guadalfeo. Se plantea como objetivo de este trabajo establecer una solución basada en el estudio de la influencia de convertidores de energía del oleaje en la morfología de playas heterogéneas, estableciendo:

- Cuantificación de la influencia de las granjas de convertidores de energía en la propagación del oleaje y el transporte de sedimentos.
- Análisis de los efectos de las granjas en la evolución del perfil de playa.
- Estudio de las alternativas y selección de la localización óptima de la granja.
- Descripción del proceso constructivo de la granja en el emplazamiento seleccionado.
- Estudio comparativo basado en criterios funcionales, económicos y medioambientales para determinar la mejor alternativa en su conjunto, consistiendo en la construcción de una granja que contiene 11 WaveCat dispuestos en dos filas, con una separación entre los dispositivos de $2.2D$, donde $D = 90$ m, siendo esta la distancia entre los arcos gemelos de un solo dispositivo, ocupando un área aproximada de $1.500\text{m} \times 350\text{m}$. (*Figura 1*)

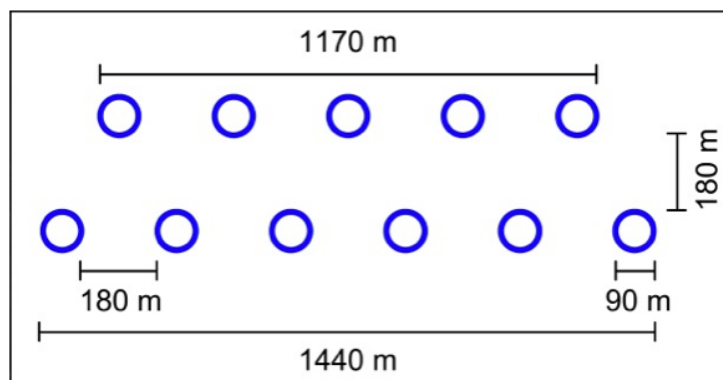


Figura 1: granja de convertidores de energía con disposición de los WaveCat y dimensiones.

3. Zona de Estudio

La costa deltaica del Guadalfeo es una playa micromareal de 6,8 km de longitud localizada en la costa sur de España frente al Mar Mediterráneo, limita al oeste con el Peñón de Salobreña y al este con Puerto Motril (*Félix et al., 2012*). (*Figura 2*)

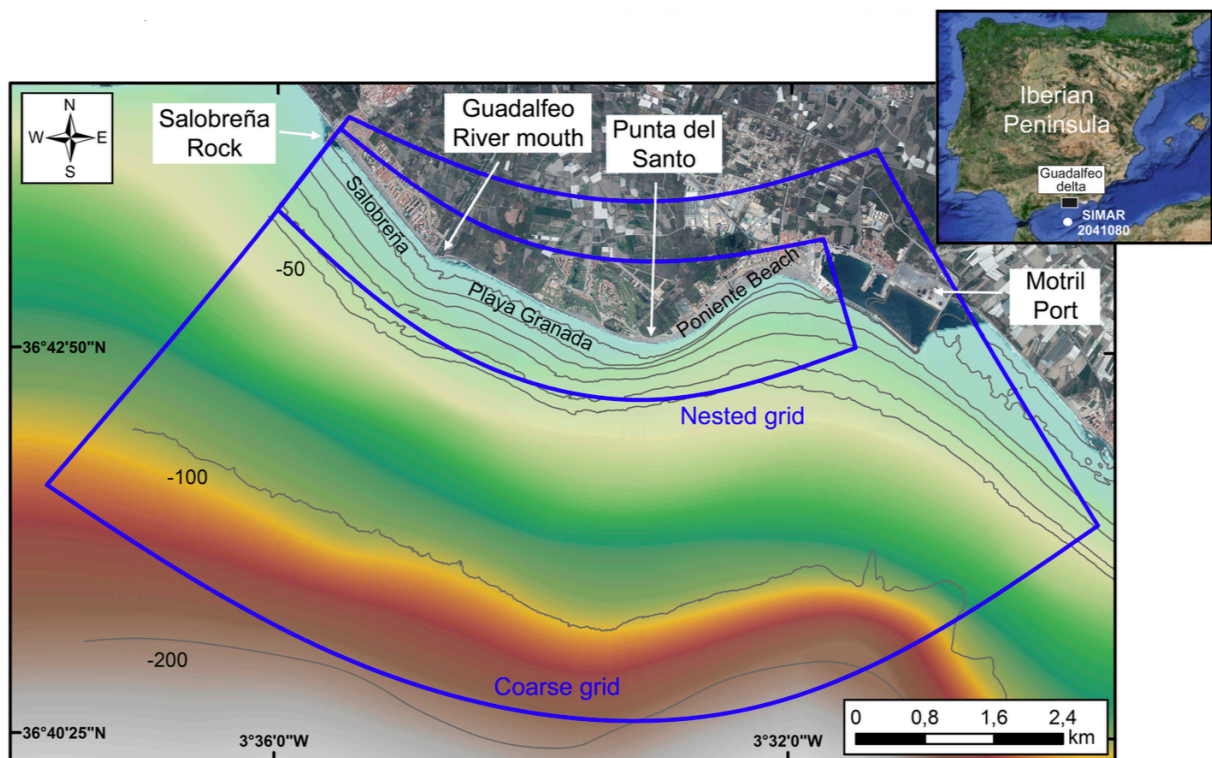


Figura 2: Panel superior derecho: Ubicación de la zona de estudio (delta del Guadalfeo, sur de España). Panel central: contornos batimétricos, cuadrículas utilizadas en el modelo de propagación del oleaje y localización del Peñón de Salobreña, desembocadura del Río Guadalfeo, Playa Granada, Punta del Santo, Playa Poniente y Puerto de Motril.

El Río Guadalfeo aporta la mayor parte de los sedimentos a la playa (*Bergillos et al., 2016d*). Su cuenca abarca una superficie de 1.252 km², incluyendo los picos más altos de la Península Ibérica (~ 3.400 metros), y el río está asociado con uno de los sistemas de drenaje con mayor energía a lo largo de la costa mediterránea española (*Millares et al., 2014*).

El río fue represado 19 km aguas arriba de la desembocadura en 2004, regulando el 85% de la escorrentía de la cuenca (*Losada et al., 2011*). Como consecuencia de la erosión, el delta

experimenta actualmente un retroceso en la costa, graves problemas de erosión (*Bergillos et al., 2016c*) e inundaciones costeras frecuentes. (*Figura 3*)



Figura 3: a) Problemas de erosión causados por las tormentas en Playa Granada (Marzo de 2014), b) inundaciones costeras en la Playa de Poniente (Febrero de 2017).

El tramo central de costa (Playa Granada) se ha visto particularmente afectado y ha sufrido mayores niveles de retroceso de la costa en los últimos años que los tramos occidental y oriental, conocidos como Salobreña y Playa de Poniente, respectivamente. En consecuencia, se han llevado a cabo con frecuencia proyectos de regeneración artificial desde la entrada en funcionamiento de la presa (*Bergillos et al., 2015b*). Sin embargo, el éxito de estas intervenciones ha sido muy limitado ya que duró menos de tres meses (*Bergillos y Ortega-Sanchez, 2017*). La distribución del tamaño de partícula en el área costera estudiada presenta proporciones variables de arena y grava (*Bergillos et al., 2015a*), con tres fracciones predominantes: arena ($\sim 0,35$ mm), grava fina (~ 5 mm) y grava

gruesa (~ 20 Mm). Sin embargo, la respuesta morfodinámica de la playa está dominada por la fracción de grava gruesa debido a la eliminación selectiva del material más fino (*Bergillos et al., 2016c*) y la forma reflectante del perfil es similar a las encontradas en playas de grava (*Masselink et al., 2010; Poate et al., 2013*). Los trabajos numéricos previos también demostraron que los mejores ajustes para los perfiles medidos (*Bergillos et al., 2016b*) y las costas (*Bergillos et al., 2017b*) se obtienen suponiendo que la playa está formada por grava gruesa.

La región está sometida al paso de ciclones atlánticos tropicales y tormentas mediterráneas, con velocidades medias de viento de 18-22 m / s (*Ortega-Sánchez et al., 2003*), que generan oleaje bajo condiciones limitadas derivados de su morfología (aproximadamente 200 a 300 km). El oleaje de tormenta es bimodal con direcciones predominantes oeste-suroeste (ciclones extra-tropicales) y este-sureste (tormentas del Mediterráneo) (*Bergillos et al., 2016a*). Las alturas de ola significativas del 90%, 99% y 99,9%, en aguas profundas son 1,2 m, 2,1 m y 3,1 m, respectivamente. El rango de marea astronómica es de ~ 0,6 m, mientras que los niveles típicos del oleaje de tormenta pueden superar los 0,5 m (*Bergillos et al., 2016c*).

3.1. Evolución de la línea de costa

El objetivo de este apartado es el que nos encontramos, es conocer de un modo genérico la evolución histórica que ha sufrido la línea de costa objeto de este estudio.

- Entre los años 1947 y 1999 se produce una evolución general de la línea de costa con dos periodos diferenciados debidos a los aportes del río Guadalfeo: retroceso en la alineación Oeste de la playa, concretamente en la zona entre la desembocadura del río y la Punta del Santo. Por otro

lado, un periodo de crecimiento entre las zonas de la Punta del Santo y el Puerto de Motril debido al obstáculo que supone para los sedimentos el dique del puerto mencionado, unido a los oleajes predominantes del SO que generan deriva litoral. **(Figura 4)**

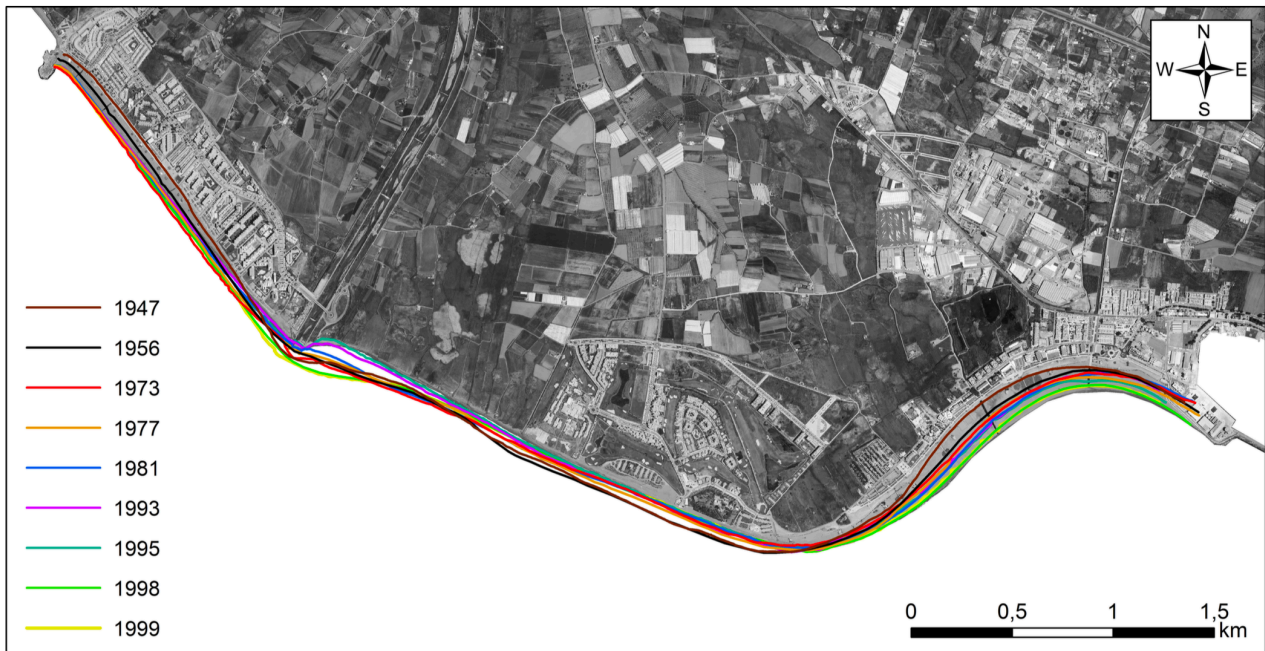


Figura 4: Evolución histórica de Playa Granada.

- Gran acumulación entorno a la desembocadura del río Guadalfeo. La línea de costa se suaviza con un reparto de sedimentos a ambos lados de la misma, aunque se produce mayor acumulación al Este. Con la entrada en funcionamiento de la Presa de Rules en el año 2004 y en los años posteriores, este proceso cambia y se produce una importante erosión que deriva en una reducción muy importante de sedimentos, lo que implica la pérdida de playa. **(Figura 5)**

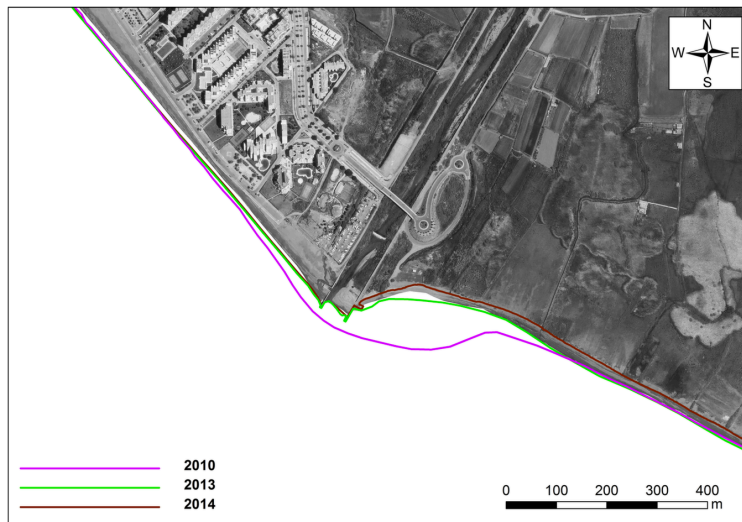


Figura 5: Evolución desembocadura río Guadalfeo.

- La zona ubicada entre la desembocadura y la Punta del Santo sufre etapas de avance y retroceso de la línea de costa. Debido a la dinámica litoral del oleaje de procedencia O-SO (mayor energía), se produce un intercambio de sedimentos de la parte occidental a la oriental. *(Figura 6)*

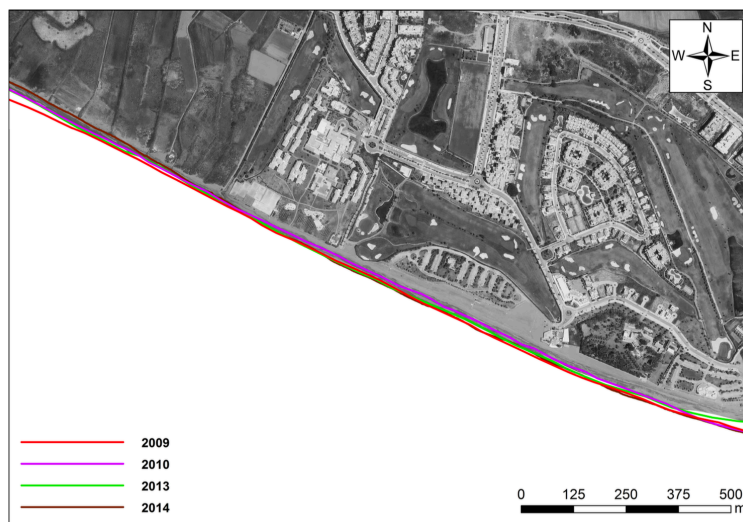


Figura 6: Evolución zona comprendida entre la desembocadura del río Guadalfeo y Punta del Santo.

- La zona de costa que comprende la Punta del Santo es una parte que se mantiene en equilibrio y se mantiene fija como eje de erosión y avance de sedimentos. **(Figura 7)**

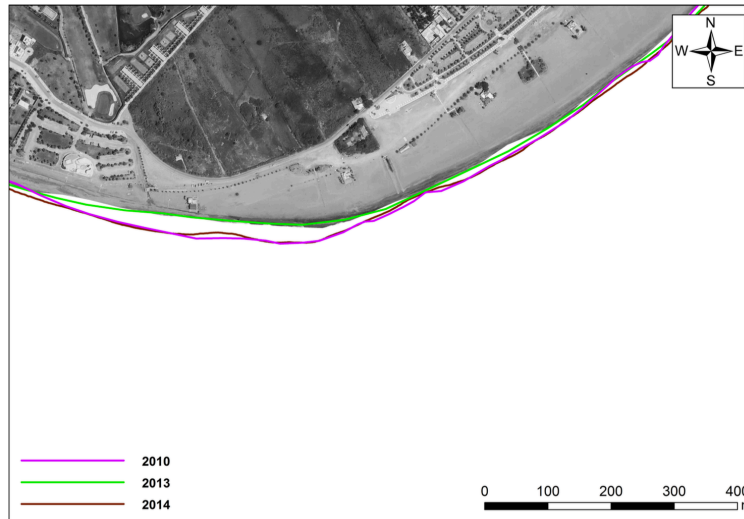


Figura 7: Evolución Punta del Santo.

- La Playa de Poniente es la zona más próxima al Dique de abrigo del Puerto de Motril, el cual actúa como barrera de sedimentos y se encuentra en constante avance debido al transporte longitudinal O-E de sedimentos. **(Figura 8)**

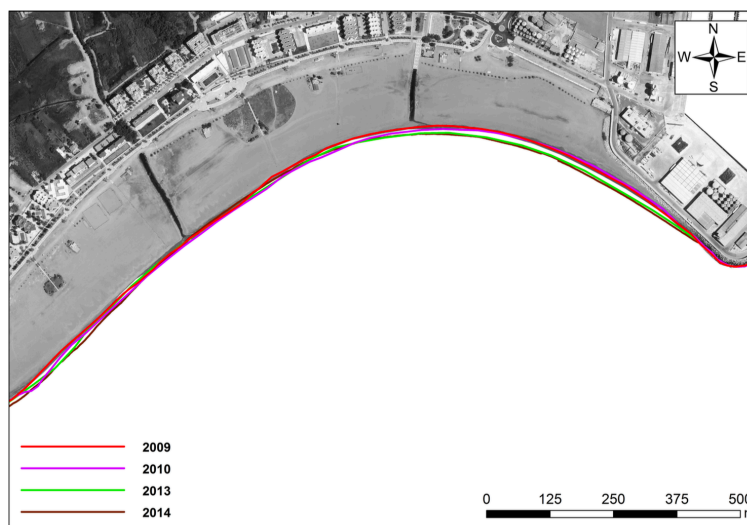


Figura 8: Evolución Playa de Poniente.

A modo de conclusión, destacar que la línea de costa se ha visto condicionada por diferentes acontecimientos históricos derivados de las actuaciones humanas, tales como la construcción de la Presa de Rules en el cauce del Río Guadalfeo y la construcción del dique de abrigo en el Puerto de Motril y su posterior ampliación, factores que han tenido una influencia drástica en el crecimiento y retroceso del perfil de playa.

3.2. Problemática actual de Playa Granada

Playa Granada, actualmente, se ve afectada de graves problemas, tanto de erosión en la parte oeste de la playa donde la línea de costa ha sufrido un gran retroceso visible en los últimos años, como problemas de acumulación de sedimentos en la parte mas oriental de la misma.

Nuestra sección de costa se encuentra en el centro de la llanura deltaica del Guadalfeo, limitando en el Oeste por el actual encauzamiento de la desembocadura del río Guadalfeo y al Este con la Punta del Santo, antigua desembocadura del río. A su vez, se encuentra limitada por el Oeste por el Peñón de Salobreña y al Este por el Puerto de Motril, siendo este último una barrera artificial que impide el transporte longitudinal de sedimentos en la dirección Este. El tramo final del río sirve también como límite entre los municipios de Salobreña y Motril. (*Figura 9*)



Figura 9: a) Planta, b) Alzado y c) Perfil del encauzamiento de la desembocadura del río Guadalfeo. d) Punta del Santo y Puerto de Motril

El río Guadalfeo es la principal fuente de aporte de sedimentos en Playa Granada y durante el recorrido de su cauce fluvial nos encontramos con la Presa de Rules, la principal causa de la falta de entrada de sedimento natural a la zona costera. La dinámica de la playa estaba formada por erosión en su parte occidental debido a un oleaje principalmente de dirección oeste y compensada por un aporte de sedimentos procedentes del río Guadalfeo. Dicho aporte de sedimentos se vio interrumpido drásticamente tras la construcción de la citada presa de Rules que, actualmente, actúa como barrera reteniendo los sedimentos transportados a lo largo del cauce fluvial y que se depositaban en la playa. Como principal consecuencia, se produjo un gran retroceso de la línea de costa que actualmente persiste, provocando que la parte oeste de la línea de costa sea prácticamente nula con apenas unos metros de playa y que contrasta con la zona este, que no para de recibir el

sedimento erosionado de la otra zona de la playa donde la acumulación de estos ha provocado el ensanche de la playa.

Este problema obliga a realizar operaciones muy costosas para la regeneración de la playa, siendo una solución temporal de aporte de arenas que, debido al oleaje, son eliminadas cíclicamente y que no dan solución al problema. (Figura 10,11,12)

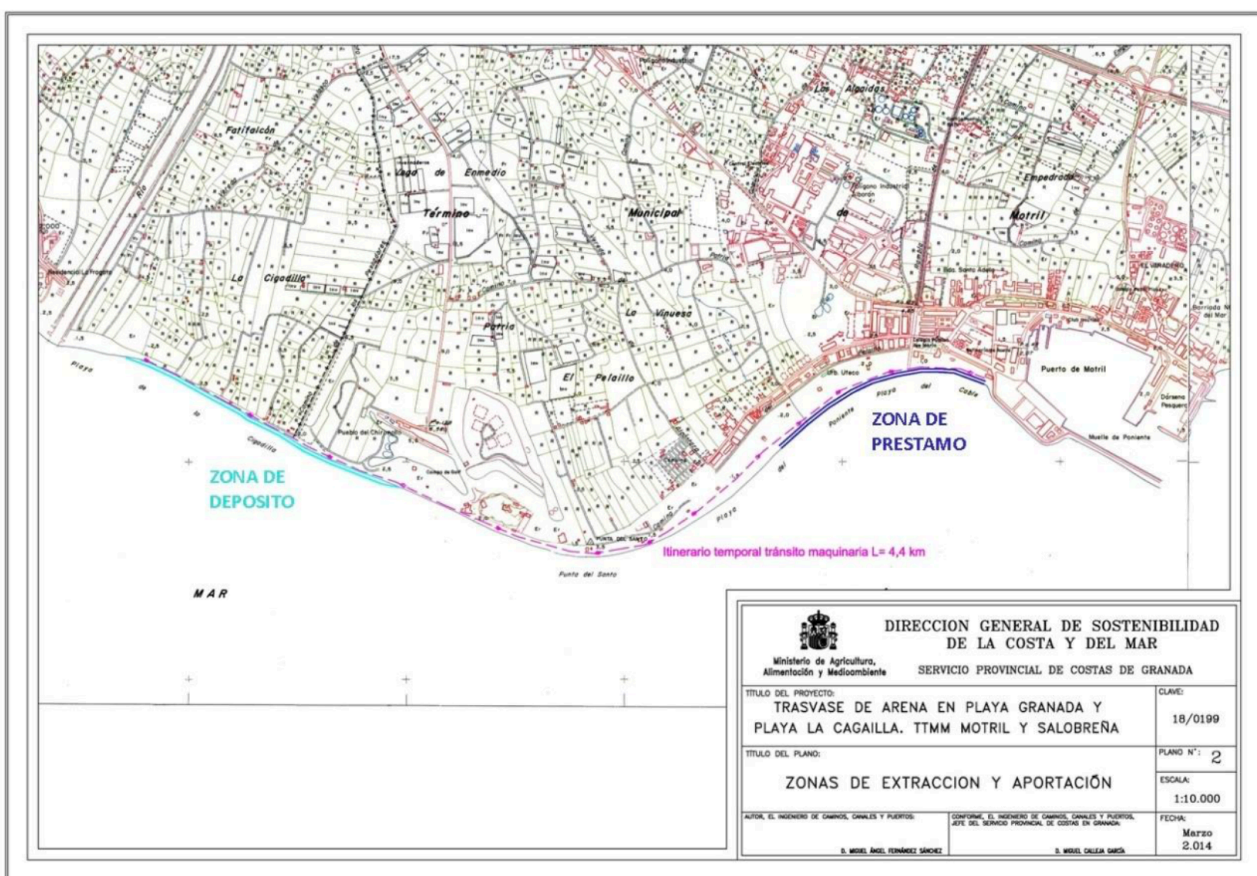


Figura 10: Traslado de arena en Playa Granada y Playa La Cagailla, Marzo de 2014.



Figura 11: Foto aérea Playa Granada previa a la actuación de regeneración.

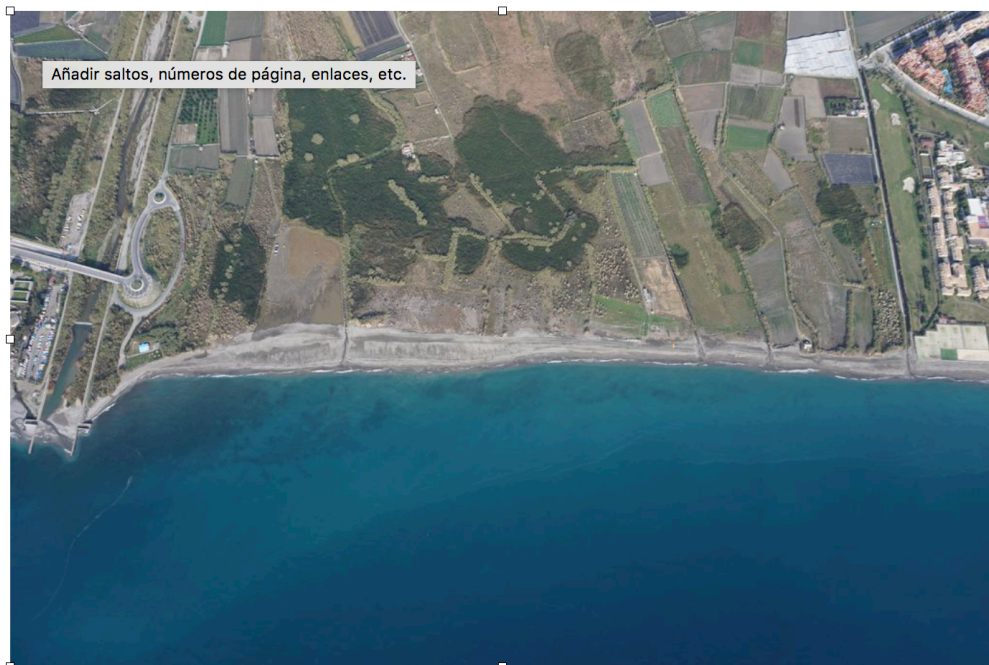


Figura 12: Foto aérea Playa Granada posterior a la actuación de regeneración.

3.3. Análisis general del clima marítimo

El objetivo del análisis del clima marítimo es llegar a conocer las condiciones del oleaje en aguas profundas que serán utilizadas para caracterizar el oleaje de Playa Granada.

Para conocer las condiciones de oleaje que existen en la zona de estudio, se hace referencia a los datos ofrecidos por el punto SIMAR 2041080, proporcionado por Puertos del Estado, y situado en las coordenadas UTM (448.171, 4.058.442).

Para realizar este análisis general del régimen medio del clima marítimo, se han usado los siguientes datos, analizando una serie de estados comprendidos entre los años 1958 y 2016:

- Altura de ola significativa espectral (H_0).
- Periodo pico espectral (T_p).
- Dirección media de procedencia del oleaje ($N=0^\circ$, $E=90^\circ$).
- Velocidad media del viento (m/s).
- Dirección media de procedencia del viento ($N=0^\circ$, $E=90^\circ$).

La altura de ola significativa espectral media en la zona de estudio es de 0,5487 m y el período de pico espectral medio es de 4,6529 segundos. Estos resultados nos indican el bajo contenido energético al que está normalmente sometida nuestra zona de estudio.

La dirección predominante para el oleaje es O-SO y E-SE, siendo la dirección de oleaje con mayor altura de ola y, por tanto, con mayor valor energético, proveniente de la dirección O-SO.

(Figura 13)

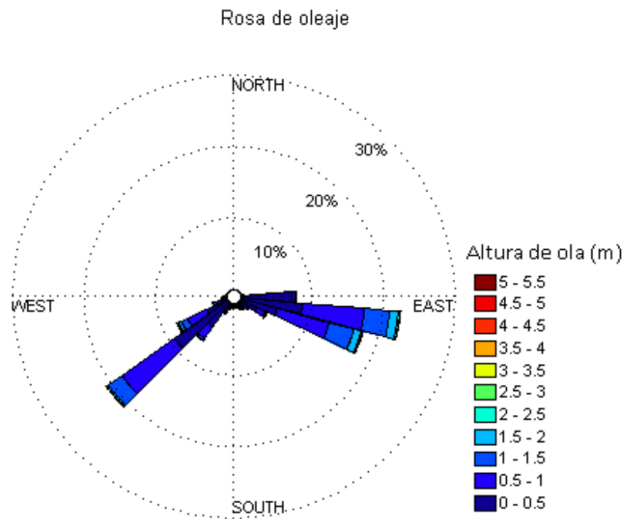


Figura 13: Rosa de oleaje.

La dirección predominante para el viento es O y E, estableciendo una velocidad media de 3,5571 m/s. (**Figura 14**)

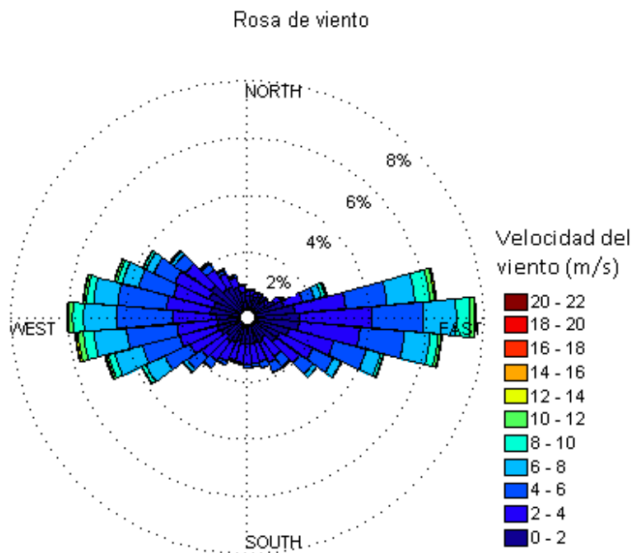


Figura 14: Rosa de viento.

En cuanto a la relación entre la altura de ola y su periodo, hacemos referencia al diagrama de dispersión (*Figura 15*), distinguiendo los siguientes aspectos más relevantes:

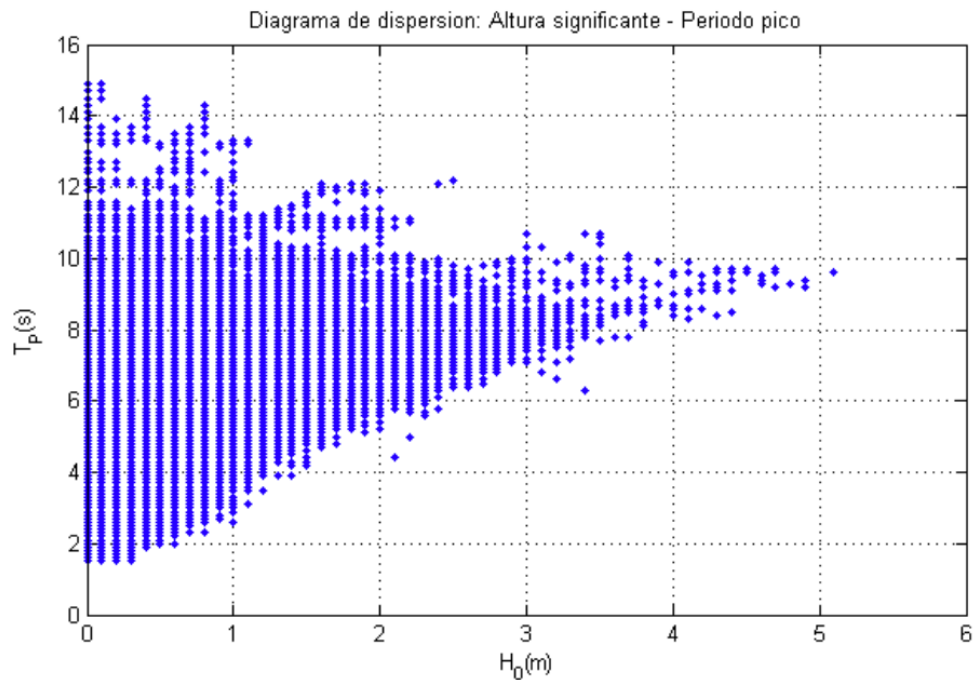


Figura 15: Diagrama de dispersión: relación entre altura de ola significativa y periodo pico.

- Para las mayores alturas de ola el periodo pico alcanza los 9 segundos, mientras que para alturas de ola menores (menores de 1 metro), dicho valor está comprendido entre 2-12 segundos.
- La mayor altura de ola registrada es de 5,1 m, con una dirección de oleaje SO y periodo pico espectral de 14,9 segundos.
- La mayor velocidad de viento registrada es de 20,6 m/s con dirección SO y altura de ola de 3m.

Una vez analizadas las condiciones climáticas de nuestra zona de estudio de un modo general, podemos concluir estableciendo que:

- El oleaje presenta un comportamiento bidireccional por la procedencia dispar de temporales: dirección O-SO (los mas energéticos y con transporte longitudinal de sedimentos de O-E que favorecen la acumulación en el Puerto de Motril) y dirección E-SE (transporte longitudinal de sedimentos de E-O que favorecen la regeneración de Playa Granada).

- Durante los periodos de tormenta, la altura de ola en profundidades indefinidas supera los 3 m, alcanzando picos de 4,5-5 m.

- El rango de la marea astronómica se sitúa entorno a los 0,6 m, siendo por tanto una zona micromareal (*Ortega-Sánchez et al., 2014*).

4. Metodología

Para evaluar la eficiencia de una granja de olas como defensa costera, se simularon los impactos de las tormentas extremas sur-oeste y sureste ($H_{99,9\%}$) utilizando los modelos Delft3D-Wave y XBeach-G a lo largo de toda la costa deltaica para ocho escenarios diferentes (Sección 3.1). Cada escenario se corresponde con una localización diferente en la costa de la granja de olas. Las variables de ola modeladas fueron:

- $H_0 = 3,1$ m
- $T_p = 8,4$ s (el período más frecuente bajo condiciones de tormenta)
- $\theta_{0, SW} = 238^\circ$
- $\theta_{0, SE} = 107^\circ$ (las direcciones más frecuentes bajo tormentas del suroeste y sureste, respectivamente).

Estos estados marinos constantes, resumidos en la *Tabla 1 de la sección 4.2*, fueron simulados considerando un oleaje de tormenta de 0,5 m con una duración de 6 horas durante la marea alta (pico de marea de 0,3 m), de acuerdo con *Bergillos et al. (2017a)*. Estas condiciones de ola fueron probadas debido a que las tormentas son las principales responsables de los problemas de erosión y las inundaciones costeras en la zona del estudio.

4.1.Revisión de trabajos previos

Playa Granada se abastece de los sedimentos que aporta el río Guadalfeo. En el año 2004 se llevó a cabo la construcción de la Presa de Rules sobre el río Guadalfeo, a 19 km aguas arriba de la desembocadura. Actualmente, dicha presa regula el 85% de la esorrentía del río Guadalfeo, por lo

que únicamente llega a las playas una mínima porción del sedimento que solía llegar con anterioridad a la construcción de la presa.

Este cambio en el aporte de sedimentos se ha notado considerablemente en los últimos años en Playa Granada, donde se han tenido que llevar a cabo diversas actuaciones de regeneración de la playa con aportes artificiales de sedimento en la zona cercana a la desembocadura del río. Estos aportes no han resultado ser duraderos en el tiempo, dado que el oleaje de poniente, dirección predominante y que aporta mayor energía a la costa (dirección de procedencia O-SO), transporta el sedimento hacia el Puerto de Motril, acumulándolo junto al dique de abrigo y provocando que la línea de costa avance considerablemente hacia el mar en esa zona de la playa. Por otro lado, la zona junto al río Guadalfeo, zona que más sufre dichos fenómenos de erosión debido a los temporales de poniente, queda prácticamente sin playa.

Como consecuencia de este fenómeno erosivo y el respectivo retroceso de la línea de costa ha ocasionado numerosos daños materiales, tanto en complejos turísticos y zonas de ocio próximos a esta.

4.2. Disposición y geometría de las granjas de olas: planteamiento de alternativas

López-Ruiz et al. (2016) cuantificó el potencial de la energía mareo motriz en 24 lugares a lo largo de la costa deltaica del Guadalfeo durante un período de 25 años (*vida promedio de los WECs según Margheritini et al. (2009) and Guancho et al. (2014), entre otros*). **(Tabla 1)**

| | SW storm | SE storm |
|----------------|----------|----------|
| H_0 (m) | 3.1 | 3.1 |
| T_p (s) | 8.4 | 8.4 |
| θ_0 (°) | 238 | 107 |
| η_{ss} | 0.5 | 0.5 |

Tabla 1: Estados marinos modelados con Delft3D-Wave y XBeach-G para estudiar la influencia de las granjas de olas en la morfodinámica costera para cada escenario.

Los mayores valores medios y extremos de la potencia de olas se obtuvieron a 30 m de profundidad de agua, siendo la razón para definir los ocho escenarios de las granjas de olas (**Figura 16**) con localizaciones centradas a esta profundidad (*A30 a H30 en López-Ruiz et al. (2016)*).

Esta gama de profundidades de agua para la ubicación de las granja de olas está de acuerdo con otros trabajos anteriores (*e.g., Mendoza et al. (2014), Abanades et al. (2014b) o López-Ruiz yet al.(2017b)*).

Por lo tanto, podemos comparar y seleccionar el mejor escenario teniendo en cuenta no sólo la disponibilidad de energía mareomotriz, sino también los efectos hidrodinámicos y morfológicos de la granja de olas en la costa. Cada granja contiene once WaveCat dispuestos en dos filas, con una distancia entre los arcos gemelos de un WaveCat igual a 90 m (*Carballo and Iglesias, 2013*) y una distancia entre dispositivos igual a 180 m (*Figura 16a*), siguiendo la disposición geométrica propuesta en trabajos previos (*e.g., Abanades et al. (2014a) and Abanades et al. (2015)*). WaveCats están superando los WECs, desarrollados por *Fernández et al. (2012)*, que están amarrados al fondo del mar por una única cadena, permitiendo la auto-orientación del dispositivo con las direcciones de olas locales (*Allen et al., 2016*).

Cada escenario fue simulado por medio del modelo de propagación de olas detallado en la Sección 4.3 para evaluar la influencia de la granja en la altura de ola significativa. Además, se obtuvieron el Run-up del oleaje y sus cambios morfológicos en ocho perfiles de playa seleccionados (P1-P8, *Figura 16*) a través del modelo XBeach-G (Sección 4.4). Todos los resultados se compararon con la configuración actual de la costa, que se observó como escenario 0.

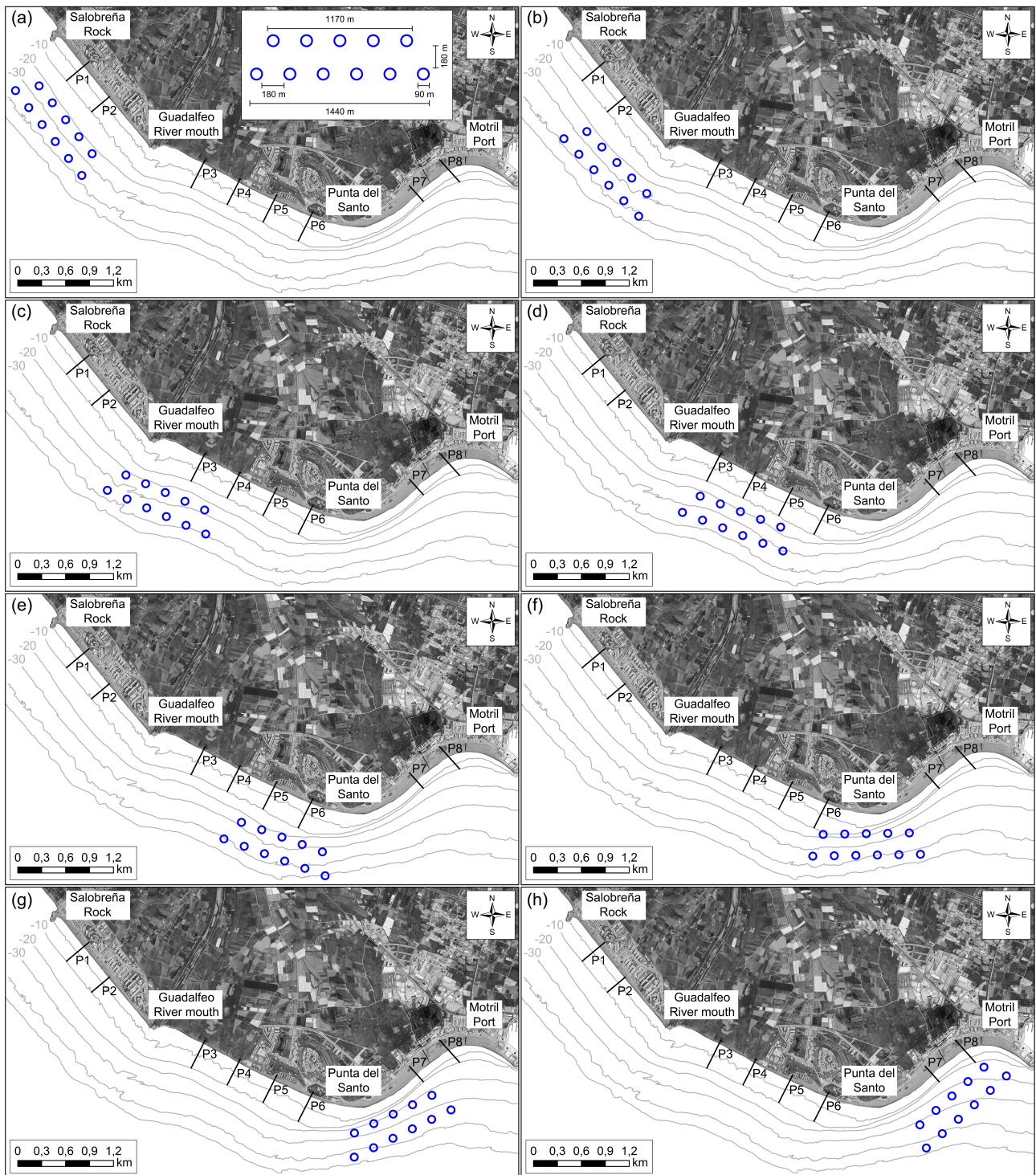


Figura 16: Geometría y emplazamientos de las granjas de olas modeladas: a) escenario 1, b) escenario 2, c) escenario 3, d) escenario 4, e) escenario 5, f) escenario 6, g) Escenario 7, (h) escenario 8. Los perfiles de playa de estudio se muestran (P1-P8).

4.3. Modelo numérico de propagación de oleaje: Delft3D-Wave

Para poder comprobar que efecto tienen las diferentes alternativas antes expuestas en la reducción de la energía del oleaje, hemos recurrido a utilizar Delft3D, un software que simula la evolución de las olas generadas por el viento en las aguas costeras. El módulo de onda de Delft3D calcula la programación de ondas, la generación de olas por el viento, las interacciones y disipaciones no lineales de ondas, campos de viento, niveles de agua y campos de corrientes en aguas profundas, intermedias y finitas.

El primer paso efectuado ha sido imponer las condiciones de contorno, así como los oleajes que llegarán a nuestra malla de estudio. En concreto, hemos supuesto 2 oleajes independientes, uno del Este y otro del Oeste (el más energético), cada uno con 3 fronteras de malla, E, SE y S para el oleaje del Este y O, SO y S para el oleaje del O, además cada frontera tiene 2 estados de mar separados entre sí 60 segundos. Estos oleajes pertenecen a tormentas tipo con alturas de olas que son sobrepasadas un 1% del tiempo, puesto que suponer una altura de ola de proyecto con un período de retorno mayor no nos permitiría elegir correctamente la mejor alternativa. Sin embargo utilizaremos dicha altura de ola de proyecto para diseñar la granja de ola una vez elegida la mejor alternativa.

El último paso antes de correr las diferentes alternativas ha sido introducir las granjas de olas como obstáculos en el programa. Para ello, los hemos diseñado primero en AutoCad sobre una planta con las batimétricas de nuestra zona obtenidas gracias al grupo de dinámica de flujos ambientales de la Universidad de Granada. Después hemos pasado estos objetos a un mapa de puntos en un archivo .txt para por último introducir las coordenadas de estos puntos en nuestro caso del programa Delft3D.

Respecto a las condiciones de estas granjas de olas, los hemos introducido como tipo “dam”, es decir, el coeficiente de transmisión depende de las condiciones del oleaje incidente en el obstáculo y de la altura del obstáculo.

Las condiciones del mar mostrados en la *Tabla 1* se propagaron desde aguas profundas hasta las proximidades de la costa usando el módulo WAVE del modelo Delft3D (*Lesser et al., 2004; Lesser, 2009*), que se basa en el modelo SWAN (*Holthuijsen et al., 1993*). Los principales procesos incluidos en el modelo son la refracción debido a las variaciones de la corriente; barreras, bloqueos y reflexiones debidas a corrientes opuestas; transmisión / bloqueo a través / por obstáculos; efectos del viento; rompiente; rotura de ola a profundidad inducida; fricción de fondo; y interacciones ola-ola no lineales (*López-Ruiz et al., 2015*). Los resultados se utilizaron para abordar las alturas de ola significativas en el lado de sotavento de las granjas y para proporcionar las condiciones de frontera para el modelo XBeach-G para cada escenario.

El modelo es capaz de simular los efectos de los obstáculos en los patrones de propagación de olas, es decir, la reducción de la altura de la ola que se propaga detrás o sobre el obstáculo a lo largo de su longitud, la reflexión de las olas que afectan al obstáculo y la difracción de éstas alrededor de sus límites (*Rusu and Soares, 2013*). Los WECs fueron incluidos en el modelo como obstáculos de forma circular, de modo que los dispositivos siempre exponen el mismo ancho a las olas incidentes, independientemente de la dirección de la ola entrante, simulando el comportamiento de auto-orientación del dispositivo (*López-Ruiz et al. 2017b*). Basado en los resultados de las pruebas de laboratorio detalladas por *Fernández et al. (2012)*, se adoptaron valores medios constantes de los coeficientes de reflexión y transmisión iguales a $k_r = 0,43$ y $k_t = 0,76$, respectivamente. Estos valores son coincidentes con los considerados por *Abanades et al. (2014b)* para modelar este tipo de WECs.

El modelo dominante consistía de dos rejillas diferentes, mostradas en la *figura 2*. La primera es una rejilla curvilínea gruesa con celdas de 82x82 que cubre toda la región deltaica, con tamaños de celda que disminuyen con la profundidad de 170x65 a 80x80 m. La segunda es una cuadrícula anidada que cubre el área de la playa con 244 y 82 células en las direcciones longitudinales y transversales, respectivamente, y con tamaños de celda de aproximadamente 20x15 m. Este modelo fue calibrado para estas rejillas particulares por *Bergillos et al. (2017b)* a través de la comparación con datos de campo, obteniendo coeficientes de determinación superiores a 0,86.

4.4. Modelo de evolución del perfil de playa: XBeach-G

El modelo basado en procesos 1D XBeach-G es una extensión del modelo XBeach (*Roelvink et al., 2009, 2010*) que incorpora:

(1) un término de corrección de presión no hidrostática que permite resolver olas de forma explícita en el modelo.

(2) un modelo de aguas subterráneas que permita la infiltración y la exfiltración.

(3) el cálculo del transporte de la carga del lecho marino, incluyendo los efectos de la ventilación del agua subterránea y las fuerzas de aceleración de flujo, para estimar los cambios en el nivel del lecho (*McCall et al., 2014, McCall et al., 2015, McCall, 2015*).

Los datos topográficos y batimétricos medidos se utilizaron como morfologías iniciales de los perfiles de playa de estudio (P1-P8, *Figura 16*). Las condiciones de frontera de ola de entrada se obtuvieron a partir del modelo Delft3D-WAVE a una profundidad de 10 m. Este límite de aguas profundas cumple con todos los requisitos detallados en el manual del modelo XBeach-G (*Deltares, 2014*), y es más profundo que la profundidad de cierre en el zona de estudio (*Bergillos et al., 2016d, 2017b*). Los valores del factor de fricción del sedimento y los límites de Nielsen utilizados para las

simulaciones fueron 0,03 y 20°, respectivamente, que resultaron óptimos durante la calibración del modelo (*Bergillos et al., 2016b, 2017a*), demostrando que es capaz de reproducir los procesos costeros bajo condiciones de tormenta.

Los rompeolas localizados hacia tierra de los perfiles P1, P2, P7 y P8 (*Figura 16*) y la infraestructura asociada con el complejo hotelero frente a los perfiles P5 y P6 (*Figura 16*) que están incluidos en el modelo como objetos no erosionables e impermeables ; mientras que los asentamientos agrícolas situados frente a los perfiles P3 y P4 se introdujeron como límites no erosionables y permeables.

Los resultados de XBeach-G se utilizaron para cuantificar el oleaje y los cambios morfológicos tormentosos en los perfiles de estudio para cada escenario.

5. Resultados

5.1. Influencia de las granjas en la propagación del oleaje

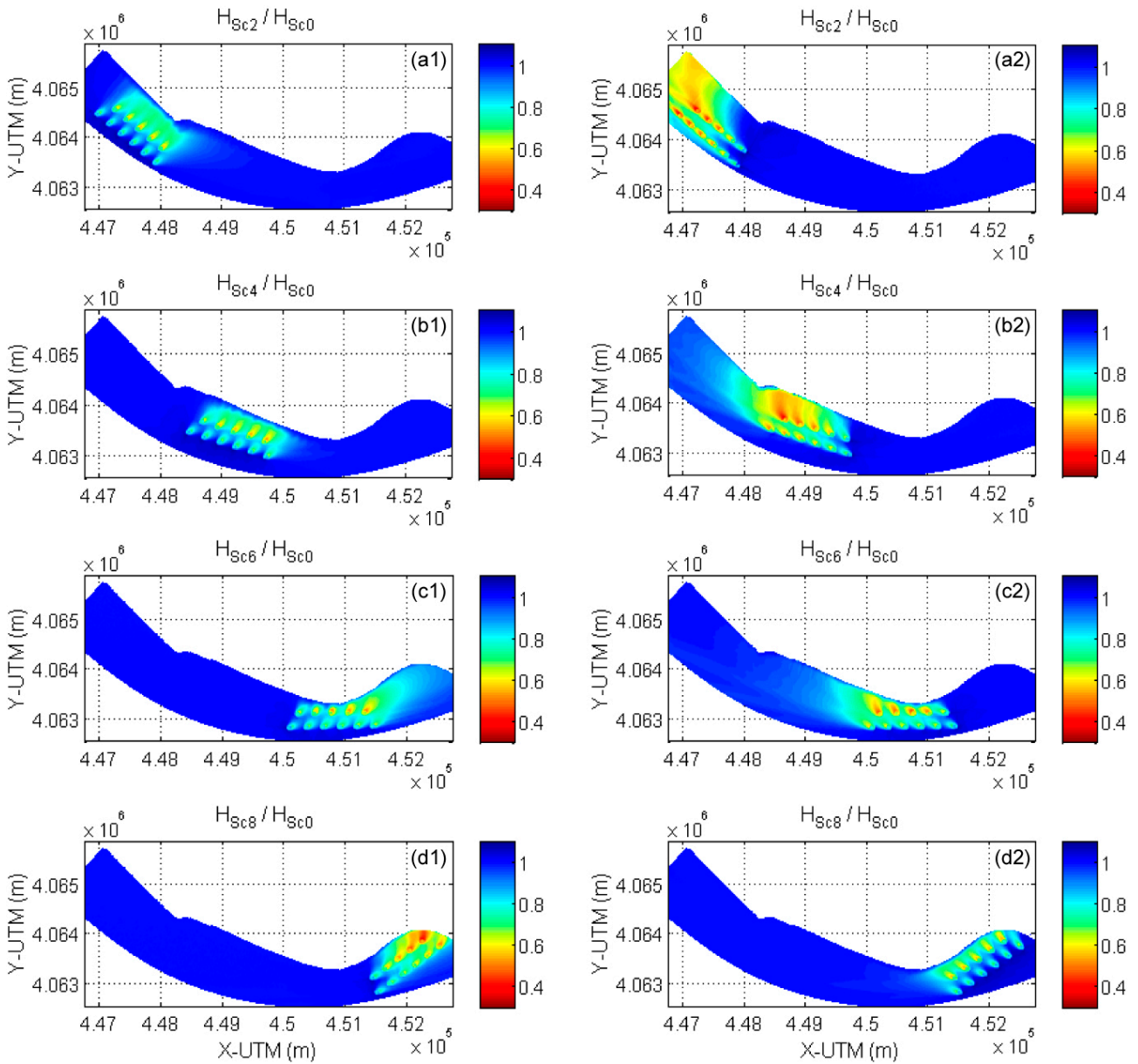


Figura 17: Distribución espacial de las reducciones en altura significativa de olas para los escenarios 2 (a), 4 (b), 6 (c) y 8 (d) con respecto al escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental (1) y oriental (2).

La **Figura 17** muestra las reducciones de la altura de ola significativa para cuatro escenarios de ubicación de la granja de olas con respecto al escenario 0. Las reducciones de altura de ola significativa más alta se obtienen bajo las tormentas occidentales (con valores de hasta 1,4 m), donde el área influenciada por la granja es mayor bajo las olas orientales (*Figura 17a2-d2*). Esto es particularmente relevante en el tramo comprendido entre el Peñón de Salobreña y la Punta del Santo debido a la mayor oblicuidad de las olas del este en comparación con las del oeste. Como era de esperar, los efectos de los escenarios 2, 4 y 8 son mayores en Salobreña, Playa Granada y Playa de Poniente, respectivamente; siendo casi insignificante para el resto de tramos de playa.

Por otro lado, la explotación de olas ubicada en las inmediaciones de la Punta del Santo (escenario 6) conduce a variaciones de propagación de las olas (en comparación con el escenario 0) tanto en Playa Granada como en la Playa de Poniente bajo tormentas orientales y occidentales, respectivamente (*Figura 17c*).

Las alturas de ola significativas a 10 m de profundidad (H_{10m}) generalmente son mayores bajo condiciones de tormenta occidental (**Figura 18**). Los efectos de la granja de olas, dependiendo de su ubicación a lo largo de la costa, también se observan claramente en la *Figura 18*, correspondiente a la zona con oscilaciones en H_{10m} . Si se promedian los valores de H_{10m} occidental y oriental, teniendo en cuenta el número de tormentas que inciden desde cada dirección en los últimos 25 años, la H_{10m} más baja tanto en la sección sometida a una erosión más fuerte (Playa Granada, H_{PG}) como a lo largo de toda la costa deltaica (H_T) para el escenario 5, con valores inferiores a 1,74 m. Los escenarios 3, 4 y 6 proporcionan valores tanto de H_{PG} como de H_T inferiores a 2 m; mientras que el H_{10m} más alta se obtiene para el escenario 1 (*Figura 18*).

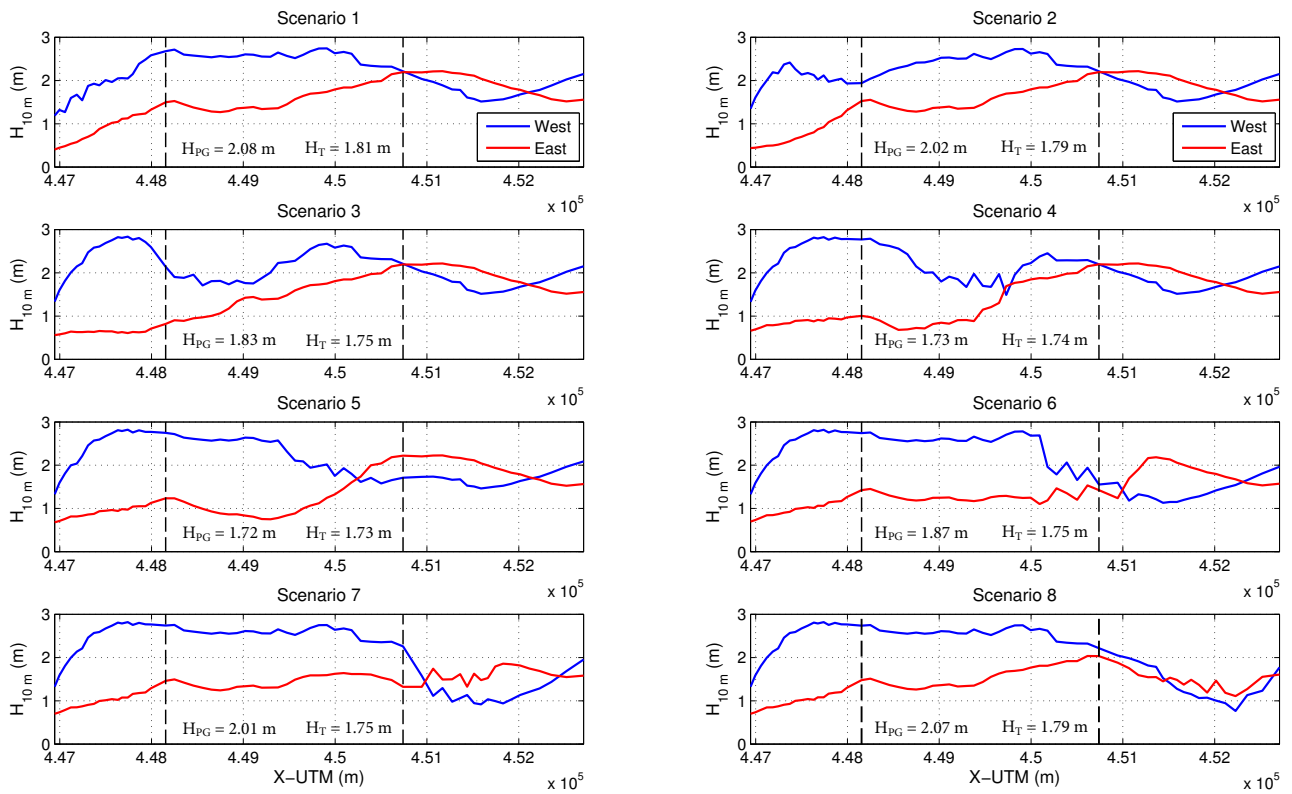


Figura 18: Variación a lo largo de la costa de la altura significativa de olas a 10 m de profundidad para cada escenario bajo condiciones de tormenta occidental (azul) y oriental (roja). Se indican los valores medios en Playa Granada (HPG) ya lo largo de toda la costa deltaica (HT).

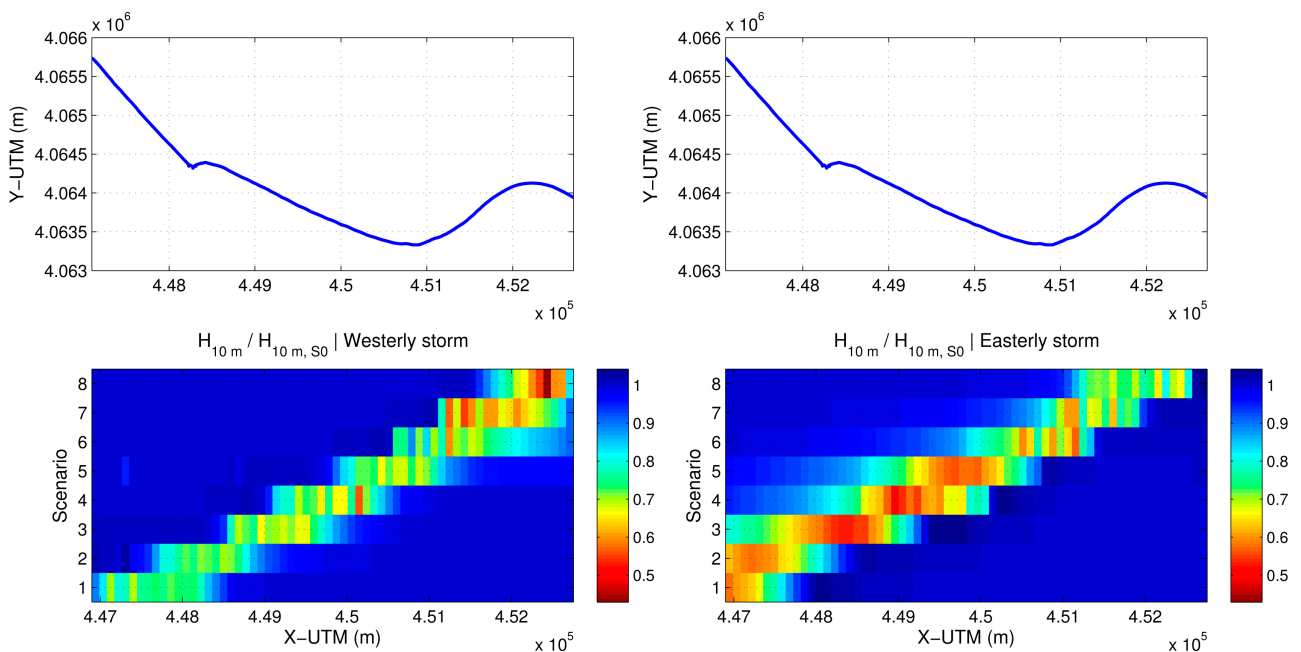


Figura 19: Reducciones de la altura significativa de olas a 10 m de profundidad para cada escenario con respecto al escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental (panel izquierdo) y oriental (panel derecho). La línea de costa se muestra en los paneles superiores.

Las reducciones medias con respecto al escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental son hasta 7.7% a lo largo de toda la costa deltaica y hasta 15.7% en la sección de Playa Granada (ambos para el escenario 4). Por el contrario, en el escenario 5 se obtienen las máximas reducciones de las tormentas orientales, con valores promedio del 24% en Playa Granada y del 12,4% a lo largo de toda la costa deltaica (**Figura 19**). Si se considera de nuevo el promedio ponderado de las tormentas occidentales y orientales, se alcanzan las reducciones máximas en H_{10m} para el escenario 5, con reducciones del 9,8% en toda la costa deltaica y del 18,3% en Playa Granada. Este último valor es superior al obtenido en una playa arenosa (*Perranporth, Reino Unido*) a través de granjas de olas a 30 m y 35 m de profundidad, con reducciones promedio de aproximadamente 15% y 9%, respectivamente; pero inferior al obtenido por medio de una granja de olas a 25 m de profundidad (25%), según *Abanades et al. (2015)*.

En lo que respecta a las distancias a lo largo de la costa afectada por las granjas de olas, la protección más alta bajo las olas occidentales es proporcionada por el escenario 6, con una longitud total de reducción de la altura ola de unos 2.300 m; mientras que el escenario 5 presenta la mayor influencia bajo las tormentas orientales, induciendo reducciones de alturas de ola a lo largo de aproximadamente 2.400 m. En términos relativos (es decir, longitud alterada entre la longitud total), el mayor porcentaje (promedio ponderado de tormenta occidental y oriental) a lo largo de toda la costa deltaica se obtiene con el escenario 6. La mayor protección en Playa Granada es proporcionada por el escenario 5, con más del 60% del tramo afectado por disminuciones inducidas por la granja en altura de ola significativa, como se muestra en los valores en negrita en la **Tabla 2**.

| | H _{10m} | | R _{2%} | | AV | |
|-------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Total | PG | Total | PG | Total | PG |
| Escenario 1 | 4,35 % | 0,29 % | 4,49 % | 0,96 % | 11,08 % | 8,95 % |
| Escenario 2 | 5,69 % | 2,96 % | 4,17 % | 1,83 % | 2,62 % | 4,44 % |
| Escenario 3 | 8,58 % | 10,96 % | 4,31 % | 5,43 % | 6,06 % | 5,64 % |
| Escenario 4 | 9,27 % | 16,99 % | 4,87 % | 8,56 % | 23,30 % | 44,53 % |
| Escenario 5 | 9,84 % | 18,31 % | 7,73 % | 10,57 % | 22,82 % | 44 % |
| Escenario 6 | 8,77 % | 11,94 % | 5,32 % | 8 % | 14,67 % | 19,15 % |
| Escenario 7 | 8,36 % | 4,87 % | 2,32 % | 3,26 % | 3,36 % | 14,83 % |
| Escenario 8 | 6,84 % | 0,74 | 3,03 % | 1,14 % | 5,09 % | 4,34 % |

Tabla 2: Porcentaje de reducción de la altura significativa de las olas a 10 m de profundidad de agua (H_{10m}), onda de ascenso (R_{2%}) y erosión de la playa (AV) para cada escenario con respecto al escenario 0.

5.2. Influencia de las granjas en el Run-Up

Como se informó en la *Sección 3*, la inundación costera es un problema común en el zona estudio (*Figura 3b*), siendo el run-up el principal contribuyente (*Bergillos et al., 2016c, b*). Por este motivo, en los perfiles de playa de estudio (P1-P8, *Figura 16*) se calcularon los valores de superación del 2% del run-up por encima de la marea y de los niveles del oleaje (R_{2%}) en condiciones de tormenta occidental y oriental. Este valor de run-up (R_{2%}) se usa típicamente en aplicaciones de ingeniería costera (*e.g., Stockdon et al. (2006) or Matias et al. (2012)*). Los resultados, que se muestran en la *Figura 20*, ponen de relieve que el R_{2%} es más alto bajo tormentas occidentales que bajo tormentas orientales. Considerando ambas direcciones, se alcanza el R_{2%} mínimo con el escenario 5: los valores medios son 1,09 m y 1,18 m a lo largo de toda la costa deltaica y en Playa Granada, respectivamente.

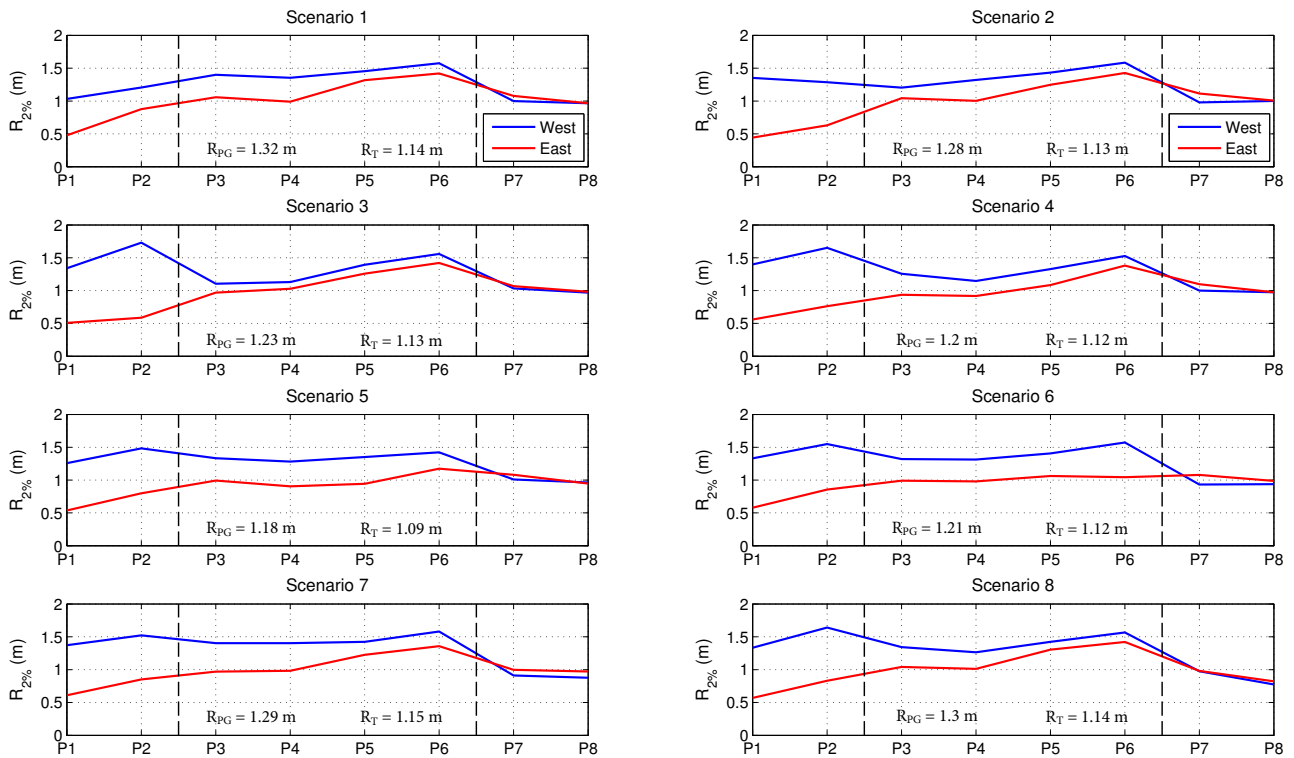


Figura 20: Variación a lo largo de la costa del oleaje para cada escenario bajo condiciones de tormenta occidental (azul) y oriental (roja). Se indican los valores medios en los perfiles de playa de Playa Granada (R_{PG}) y en todos los perfiles de playa (R_T).

Bajo las tormentas occidentales, las reducciones máximas con respecto al escenario 0 son iguales al 7,8% a lo largo de toda la costa deltaica (escenario 2) y 9,1% en Playa Granada (escenario 3); mientras que en tormentas orientales se obtienen los máximos descensos del oleaje para el escenario 5, con valores medios de 8,8% en todo el delta y 15,6% en la Playa de Granada (**Figura 21**). Teniendo en cuenta tanto las tormentas occidentales como orientales, las reducciones máximas en comparación con el escenario 0 son iguales a 7,7% y 10,6% en toda la costa deltaica y en Playa Granada (ambos para el escenario 5), respectivamente (**Tabla 2**).

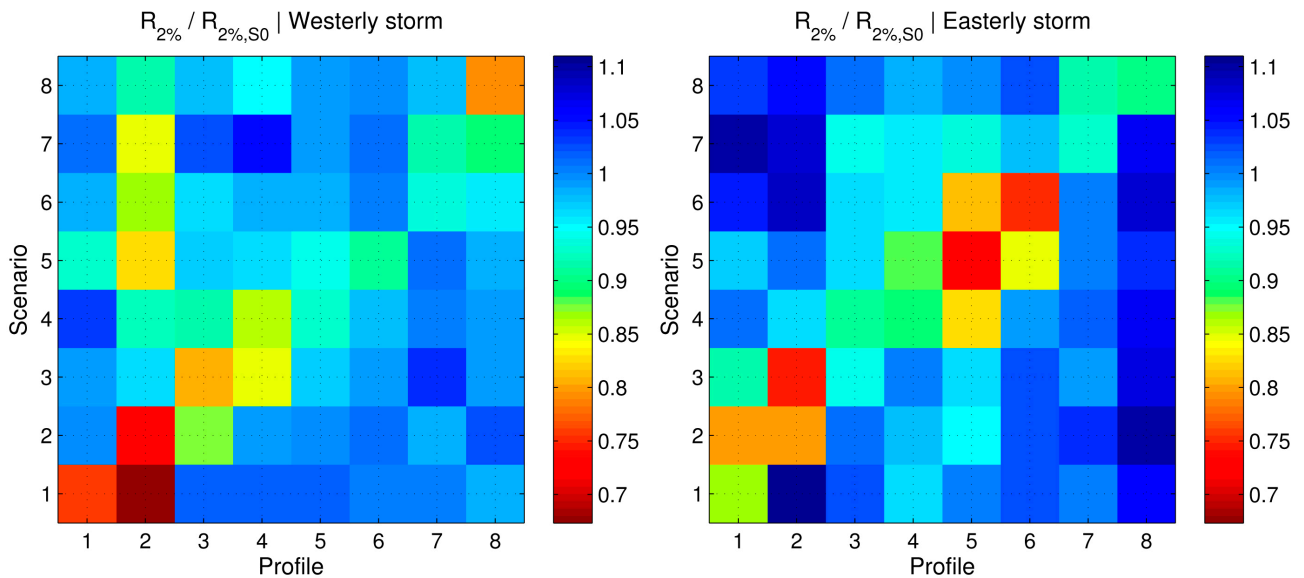


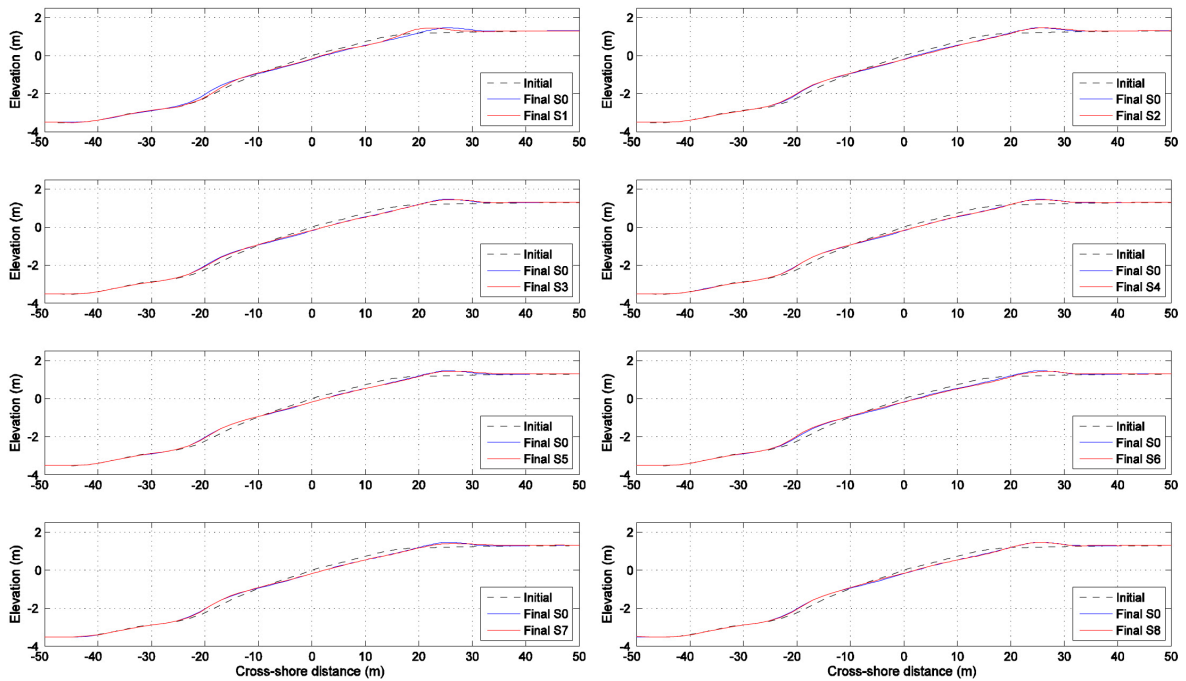
Figura 21: Reducciones en la velocidad de las olas para cada escenario con respecto al escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental (panel izquierdo) y oriental (panel derecho) en los perfiles P1 a P8.

5.3. Influencia de las granjas en la evolución del perfil de playa (volumen emergido)

Para evaluar los efectos de las granjas de olas sobre la morfología de las playas, se analizaron las respuestas de tormentas de los perfiles de playa de estudio para cada escenario y se compararon con la situación real (escenario 0). Todos los resultados revelan que las respuestas de los perfiles se ven muy afectadas por dos o tres escenarios con granjas localizadas en su proximidad (que conducen a reducciones en la erosión de los perfiles emergidos), con variaciones significativamente inferiores para el resto de escenarios. Estos cambios morfológicos están altamente influenciados por las direcciones de ola entrantes, en parte debido a los patrones de propagación de olas (*Figuras 17 y 18*).

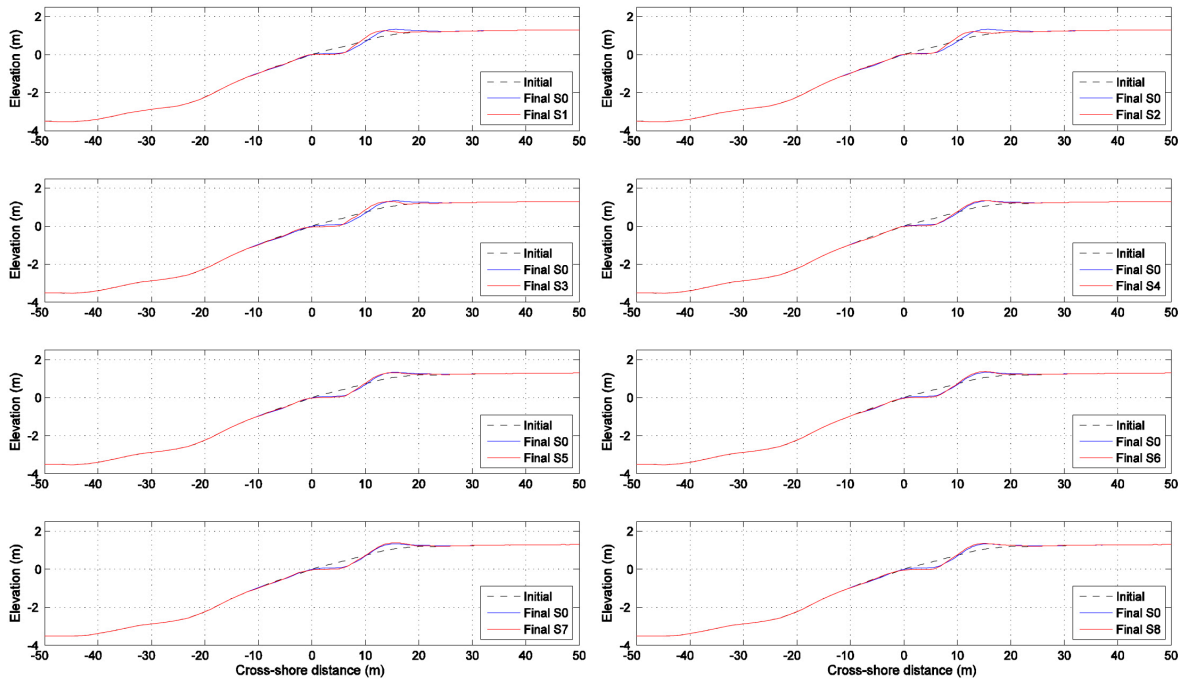
Estas tendencias se observan en las siguientes figuras que muestran los cambios morfológicos de los perfiles en los que se observan las diferencias entre el perfil inicial (negro), el perfil final correspondiente al escenario 0 (azul) y el perfil influenciado por la ubicación de los diferentes escenarios de las granjas (rojo):

Figura 22. Influencia en Perfil de Playa: P1 (tormenta W)



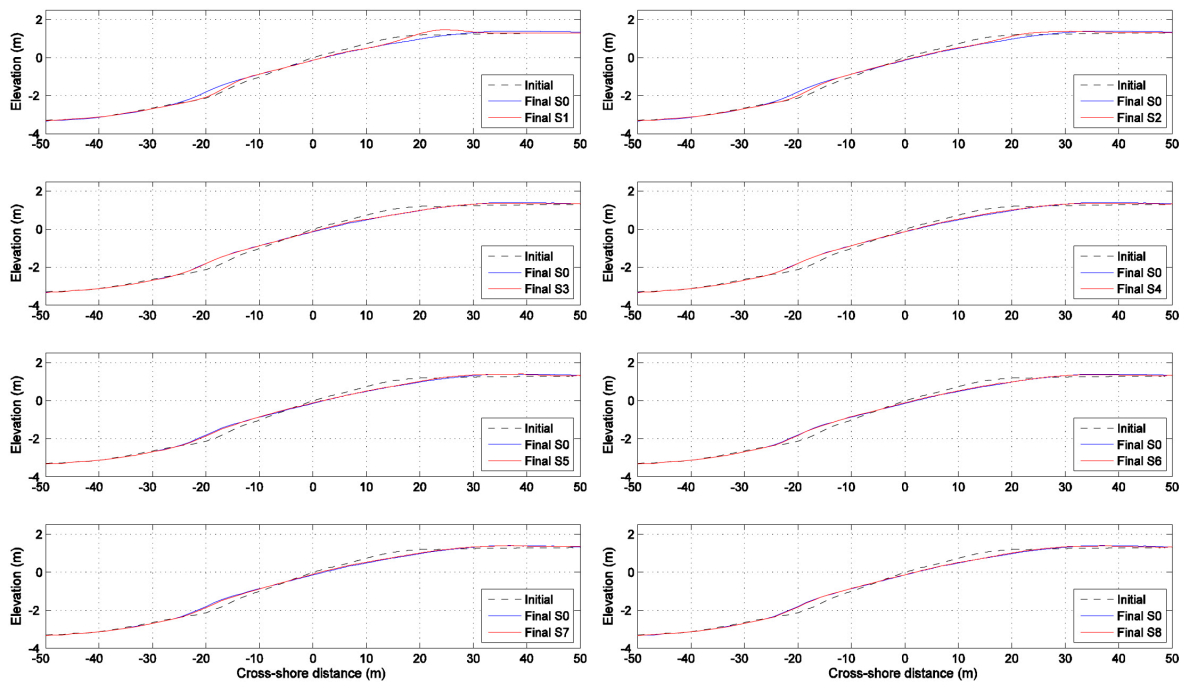
La mayor disminución de la erosión en el perfil P1 debido a tormentas occidentales se obtiene en el escenario 1 (Peñón Salobreña - Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 23. Influencia en Perfil de Playa: P1 (tormenta E)



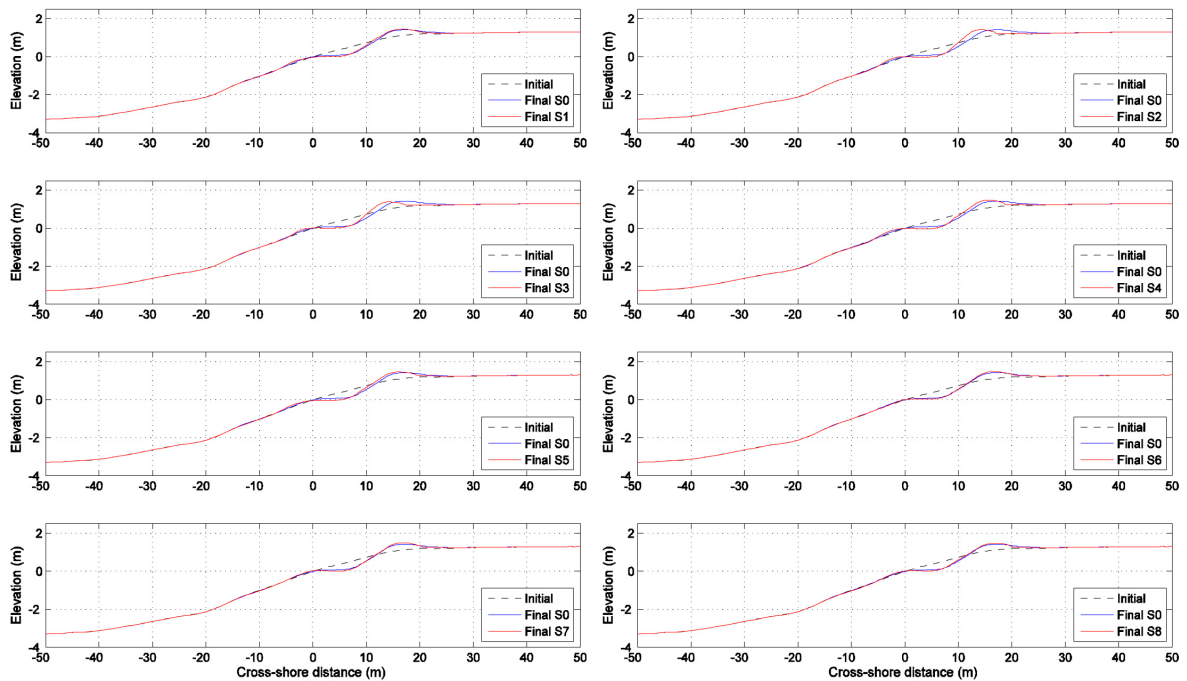
La mayor disminución de la erosión en el perfil P2 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 1, 2 y 3 (Peñón Salobreña - Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 24. Influencia en Perfil de Playa: P2 (tormenta W)



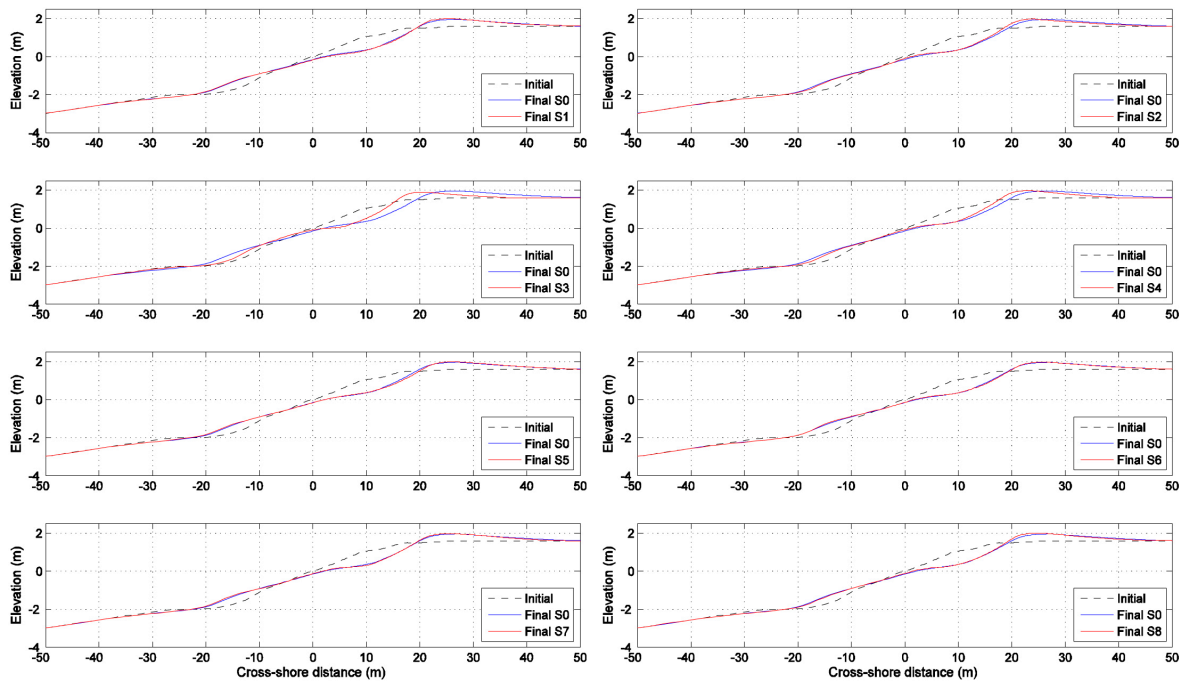
La mayor disminución de la erosión en el perfil P2 debido a tormentas occidentales se obtiene en el escenario 1 (Peñón Salobreña - Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 25. Influencia en Perfil de Playa: P2 (tormenta E)



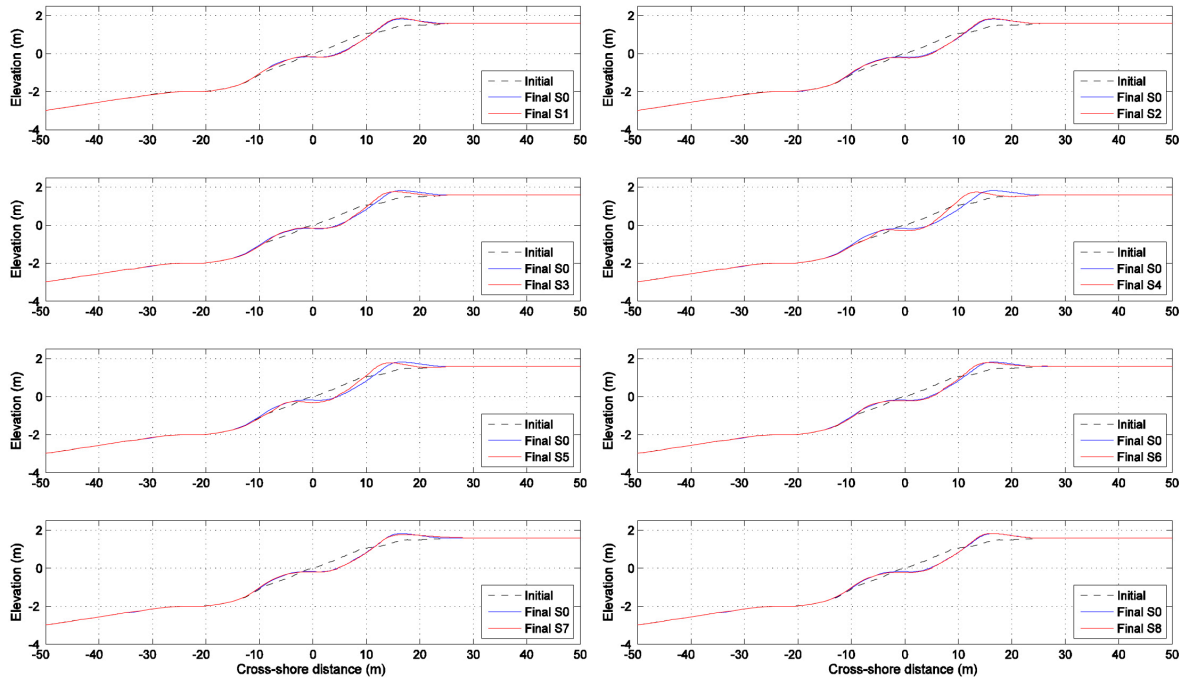
La mayor disminución de la erosión en el perfil P2 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 2 y 3 (Peñón Salobreña - Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 26. Influencia en Perfil de Playa: P3 (tormenta W)



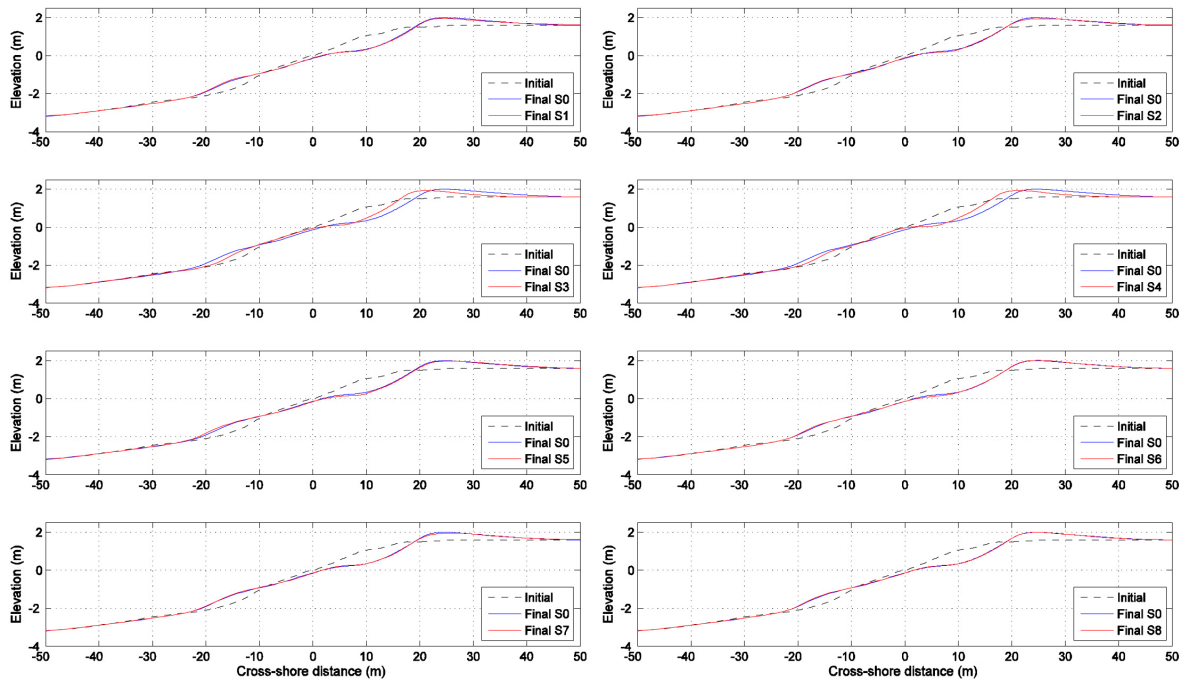
La mayor disminución de la erosión en el perfil P3 debido a tormentas occidentales se obtiene en el escenarios 3 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 27. Influencia en Perfil de Playa: P3 (tormenta E)



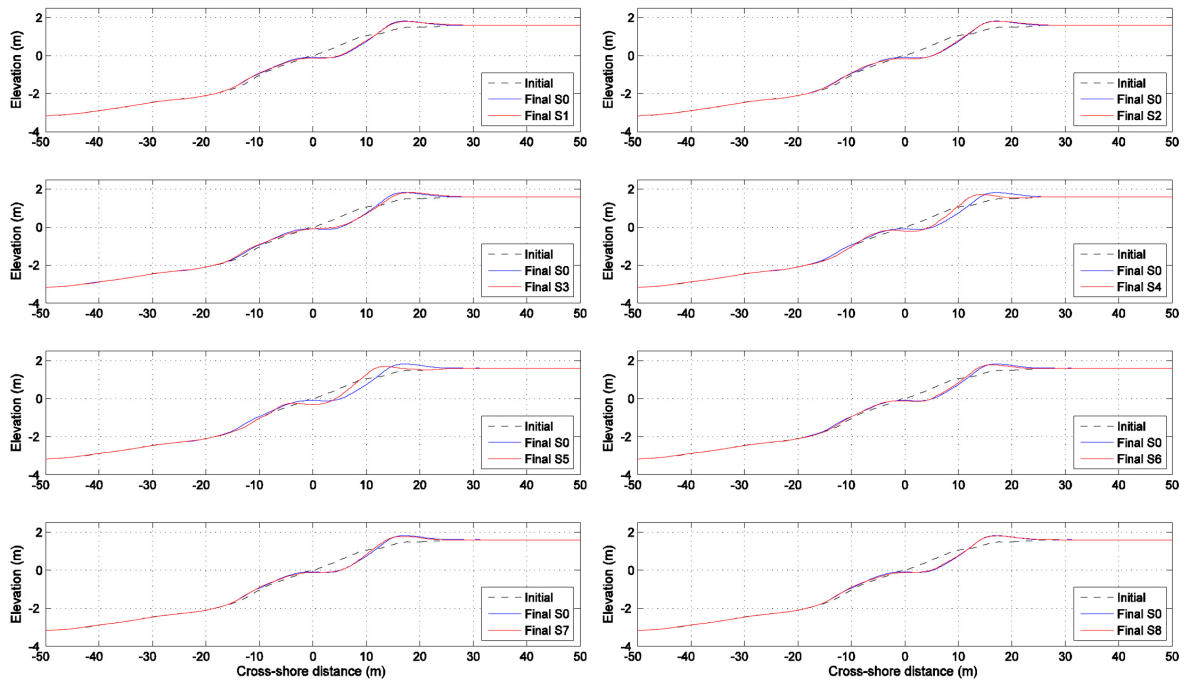
La mayor disminución de la erosión en el perfil P3 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 4 y 5 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 28. Influencia en Perfil de Playa: P4 (tormenta W)



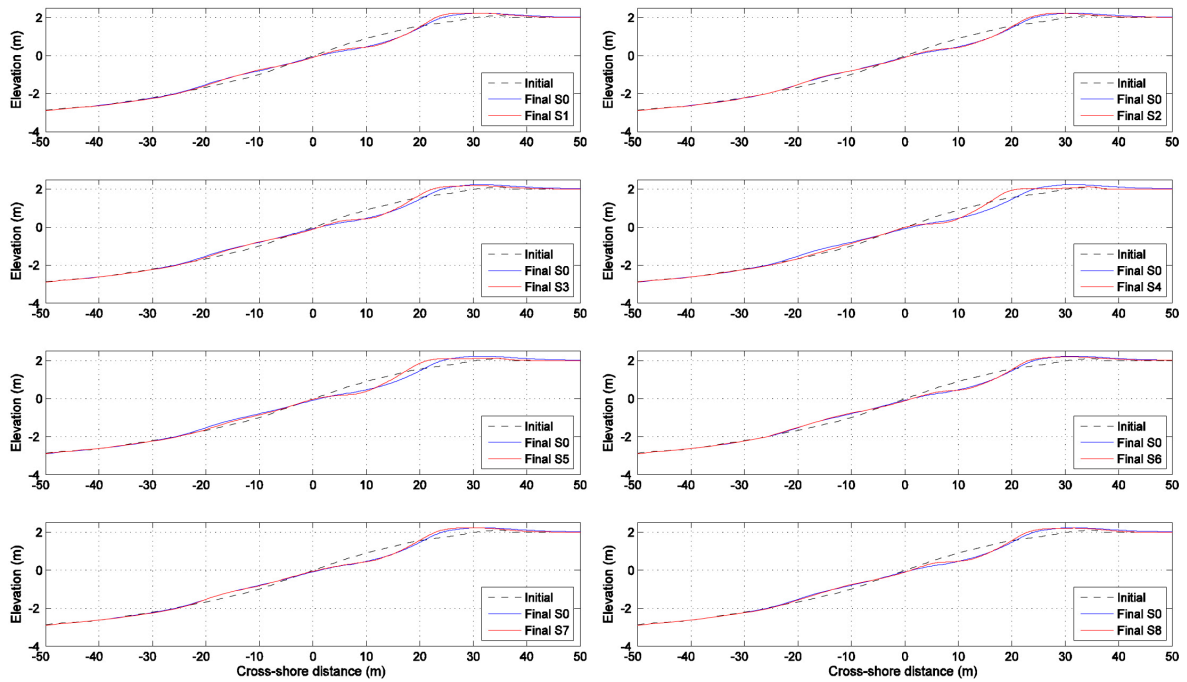
La mayor disminución de la erosión en el perfil P4 debido a tormentas occidentales se obtiene en los escenarios 3 y 4 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 29. Influencia en Perfil de Playa: P4 (tormenta E)



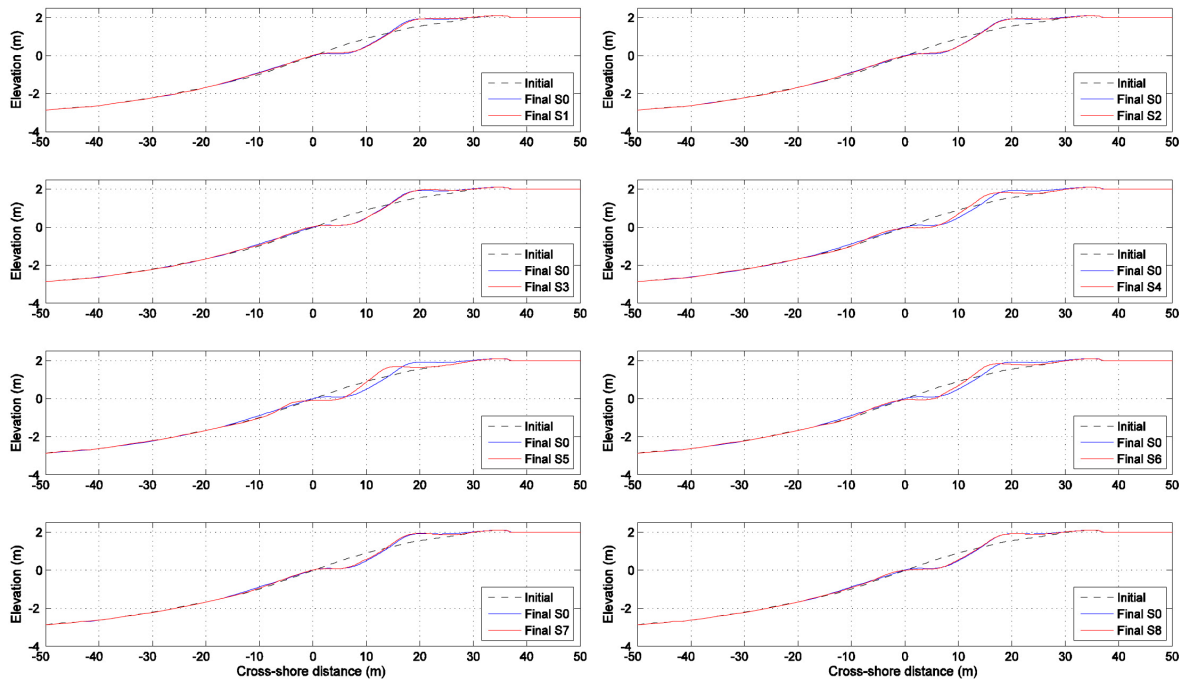
La mayor disminución de la erosión en el perfil P4 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 4 y 5 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 30. Influencia en Perfil de Playa: P5 (tormenta W)



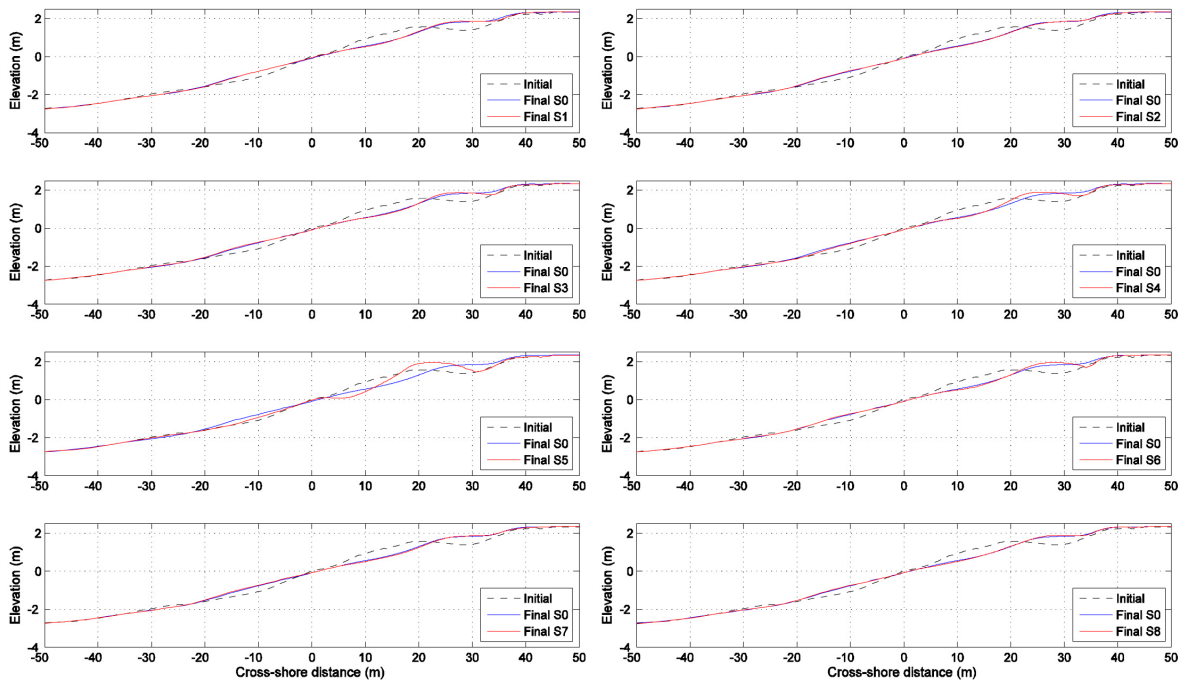
La mayor disminución de la erosión en el perfil P5 debido a tormentas occidentales se obtiene en los escenarios 4 y 5 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 31. Influencia en Perfil de Playa: P5 (tormenta E)



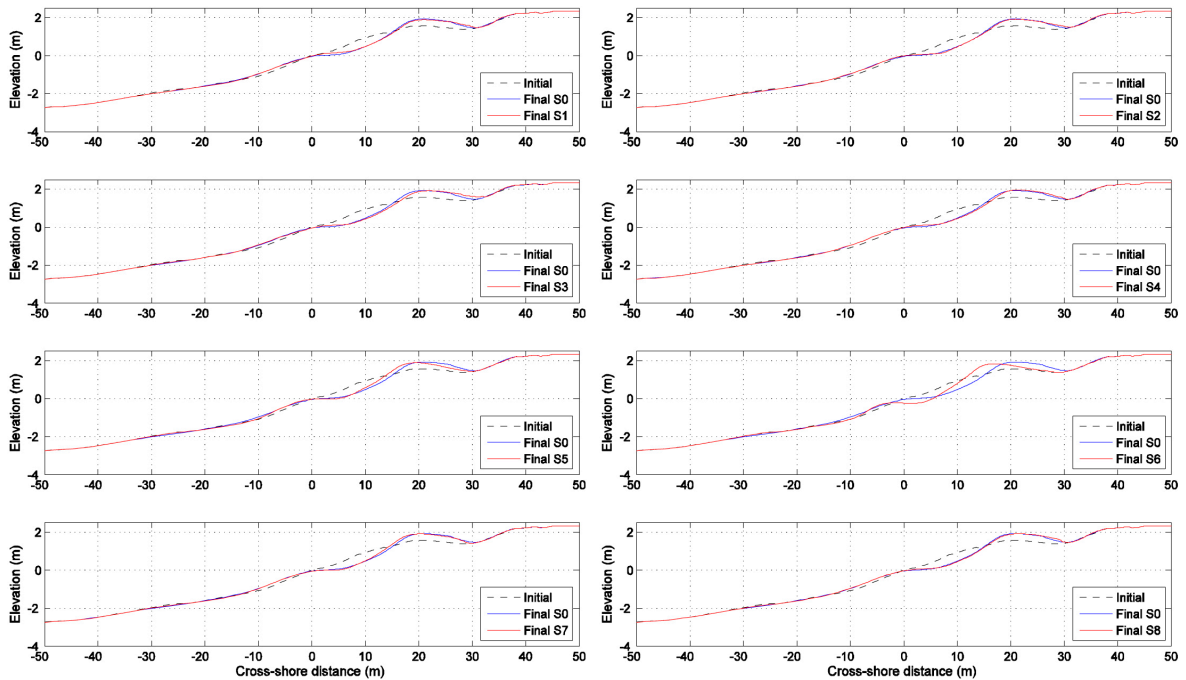
La mayor disminución de la erosión en el perfil P5 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 4 y 5 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 32. Influencia en Perfil de Playa: P6 (tormenta W)



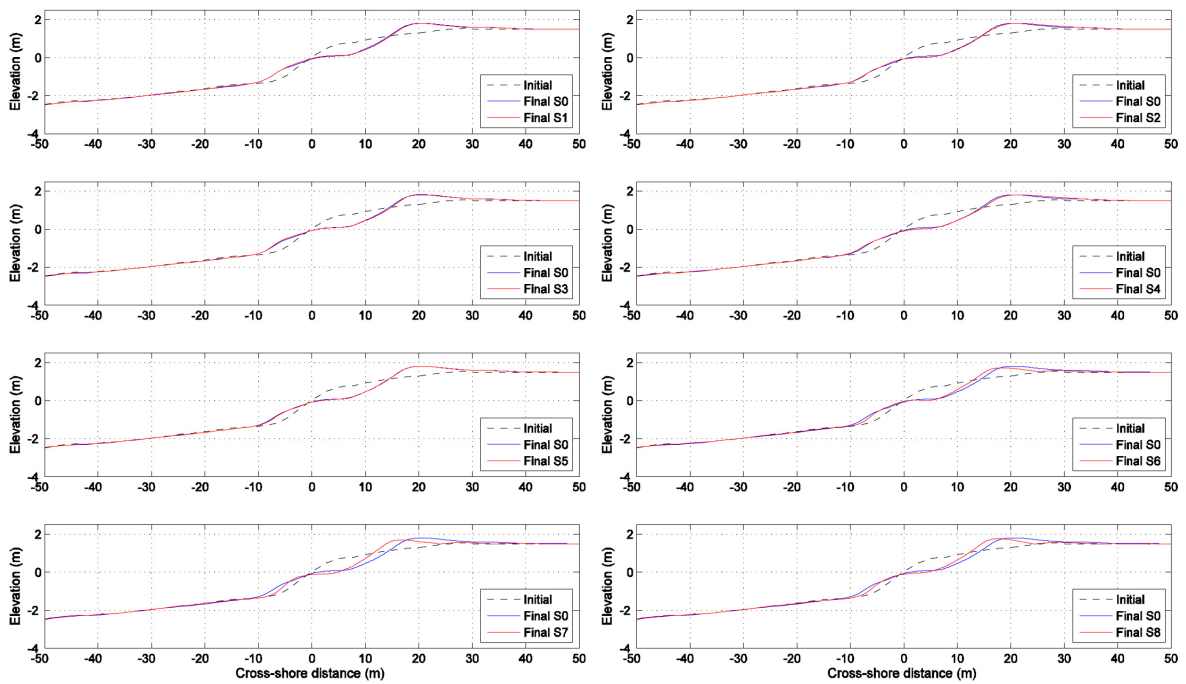
La mayor disminución de la erosión en el perfil P6 debido a tormentas occidentales se obtiene en el escenario 5 (Playa Granada) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 33. Influencia en Perfil de Playa: P6 (tormenta E)



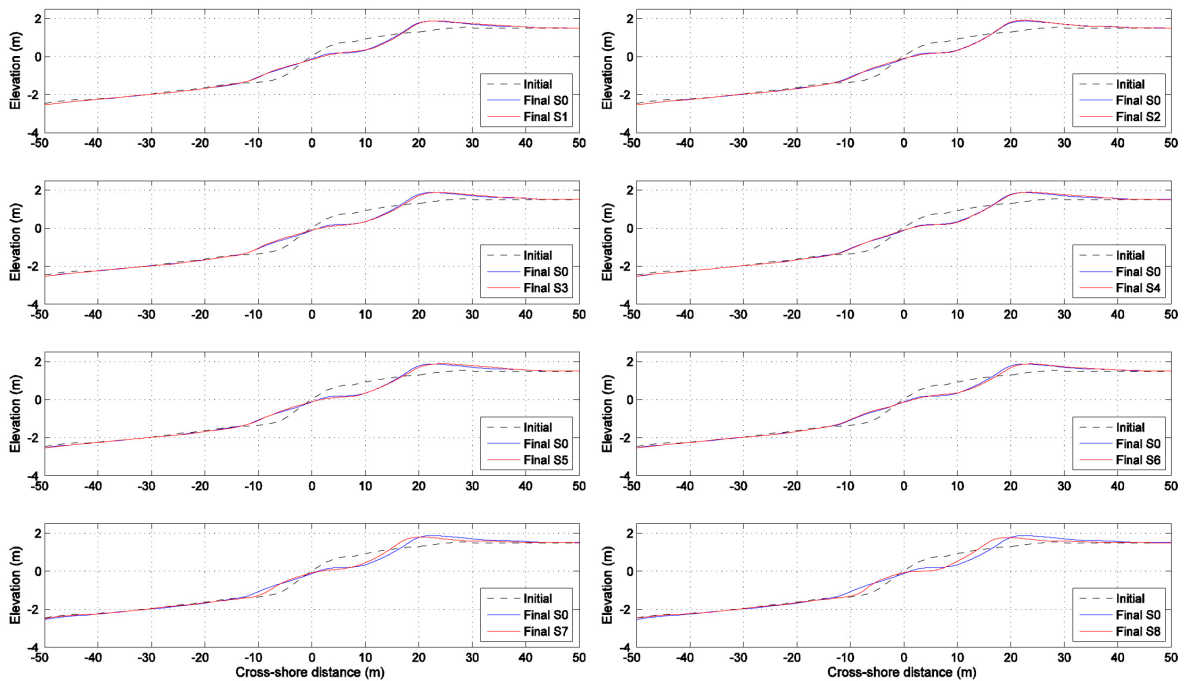
La mayor disminución de la erosión en el perfil P6 debido a tormentas orientales se obtiene en el escenario 6 (Punta del Santo) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 34. Influencia en Perfil de Playa: P7 (tormenta W)



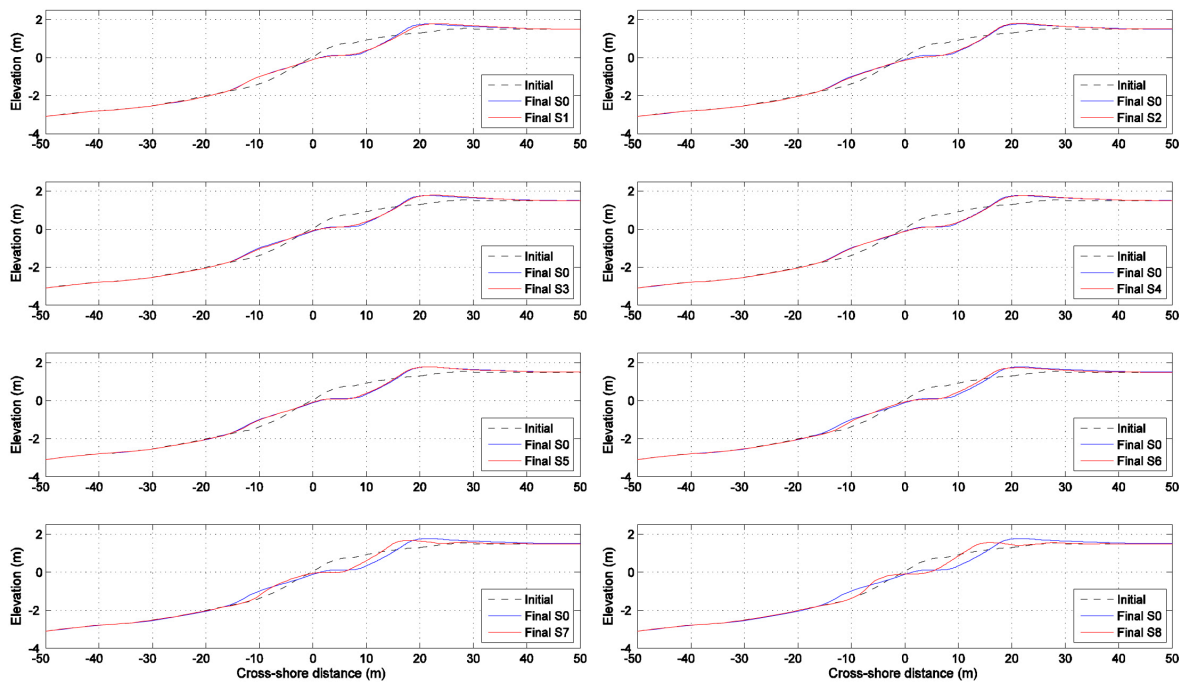
La mayor disminución de la erosión en el perfil P7 debido a tormentas occidentales se obtiene en los escenarios 7 y 8 (Playa Poniente) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 35. Influencia en Perfil de Playa: P7 (tormenta E)



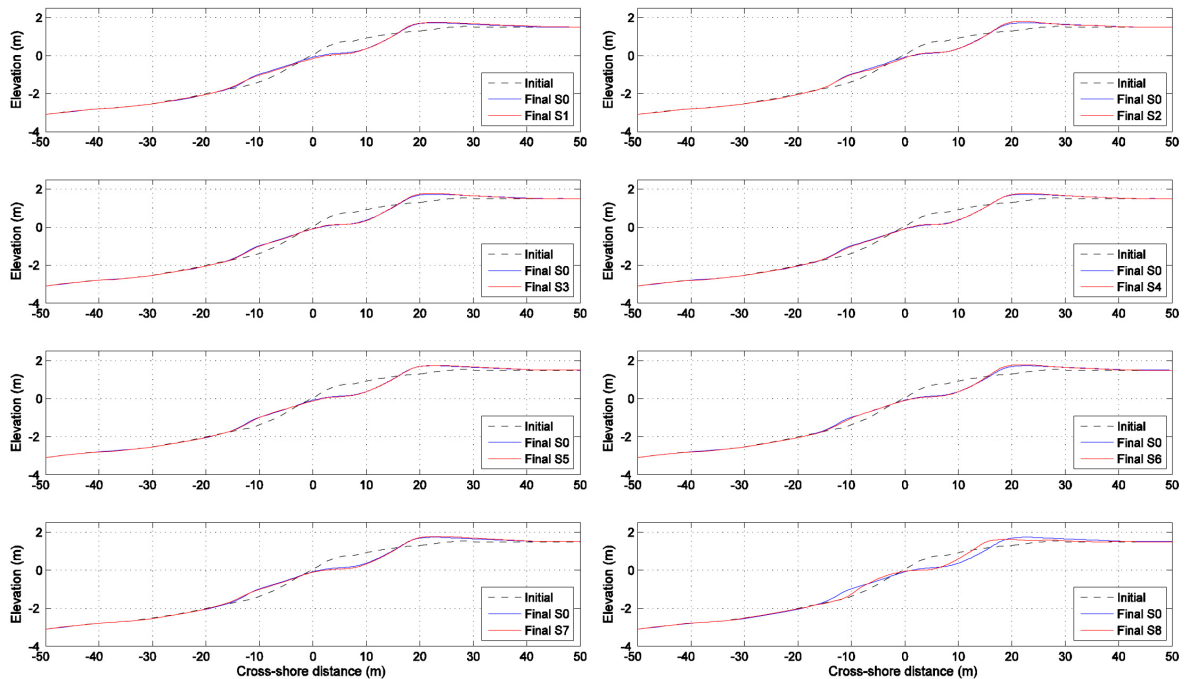
La mayor disminución de la erosión en el perfil P7 debido a tormentas orientales se obtiene en los escenarios 7 y 8 (Playa Poniente) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 36. Influencia en Perfil de Playa: P8 (tormenta W)



La mayor disminución de la erosión en el perfil P8 debido a tormentas occidentales se obtiene en el escenario 8 (Playa Poniente) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

Figura 37. Influencia en Perfil de Playa: P8 (tormenta E)



La mayor disminución de la erosión en el perfil P8 debido a tormentas orientales se obtiene en el escenario 8 (Playa Poniente) debido a que la localización de la granja de olas actúa como elemento de defensa y protección costera. En el resto de escenarios se mantiene más o menos constante el perfil de playa con pequeñas variaciones de la erosión.

A continuación, en la **Figura 38**, se muestra un resumen de los cambios morfológicos de dos perfiles (P4 y P7, *Figura 16*) para la situación actual y para los tres escenarios de ubicación de la granja de olas con mayor influencia en la morfología de la playa (escenarios 3, 4 y 5 para el perfil P4, y escenarios 6, 7 y 8 para el perfil P7). Se observa que las mayores disminuciones de la erosión de la playa en el perfil P4 (en Playa Granada) se obtienen para los escenarios 4 y 3 bajo tormentas occidentales, y los escenarios 5 y 4 bajo tormentas orientales (*Figuras 38a-c*). En el perfil P7 (en la playa de Poniente), la máxima protección es proporcionada por los escenarios 7 y 8: la reducción de la erosión de la playa es mayor para el escenario 7 (escenario 8) bajo condiciones de tormenta occidental (oriental).

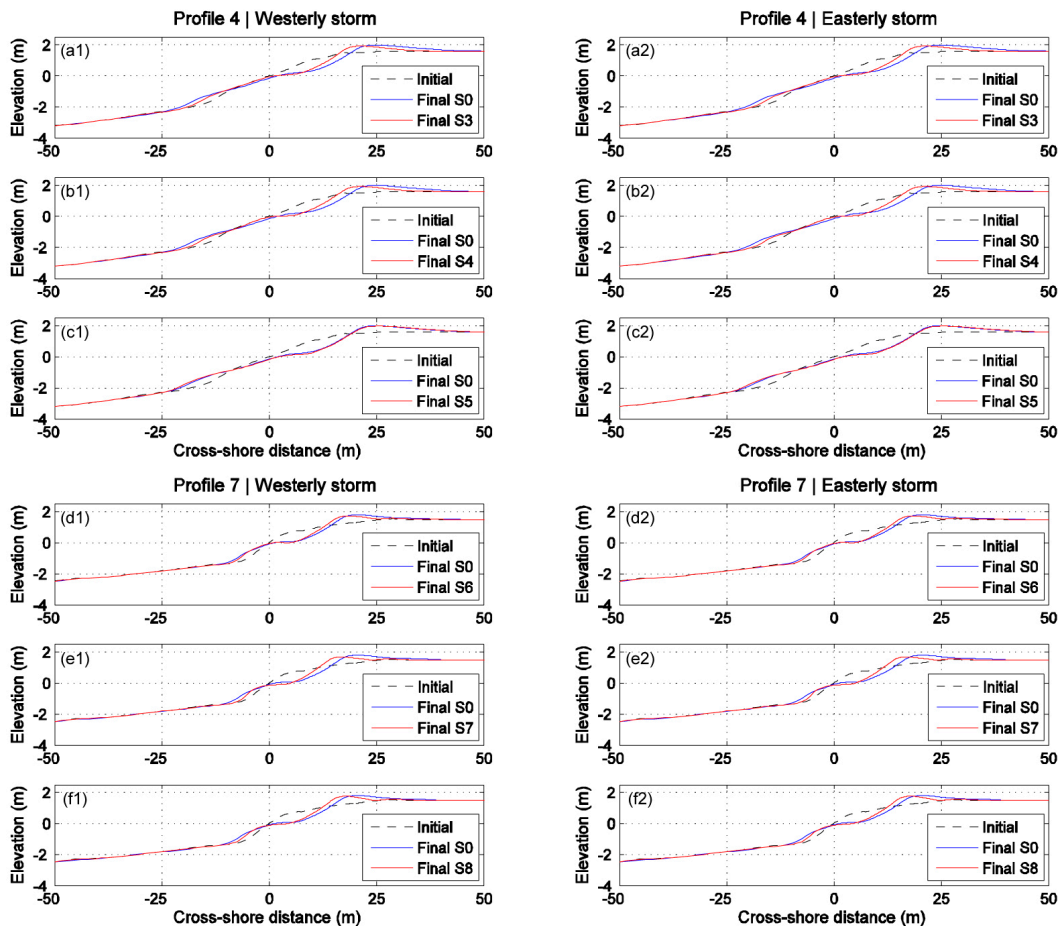


Figura 38: Perfil inicial (negro), perfil final del escenario 0 (azul) y perfiles finales para los tres escenarios con los cambios morfológicos más altos en comparación con el escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental (1) y oriental (2): 4 (Playa Granada), (df) Perfil 7 (Playa de Poniente).

Las diferencias en los cambios en el nivel del lecho marino de todos los perfiles de estudio para cada escenario con respecto al escenario 0 bajo tormentas occidentales se muestran en la **Figura 39**. Se observa que se obtienen las mayores reducciones de erosión en Playa Granada (P3 a P6, *Figura 16*) con los escenarios 3, 4 y 5; mientras que los escenarios 7 y 8 presentan las mayores disminuciones de erosión en la playa de Poniente (P7 y P8, *Figura 16*). Las diferencias con respecto al escenario 0 son significativamente más bajas a lo largo de la sección de Salobreña (P1 y P2, *Figura 16*). En conjunto, la mayor protección a lo largo de toda la costa deltaica bajo tormentas occidentales se obtiene por medio del escenario 4, con una disminución promedio en el volumen erosionado del 14%. Este valor aumenta hasta el 32% en la sección más afectada por los problemas de erosión (Playa Granada).

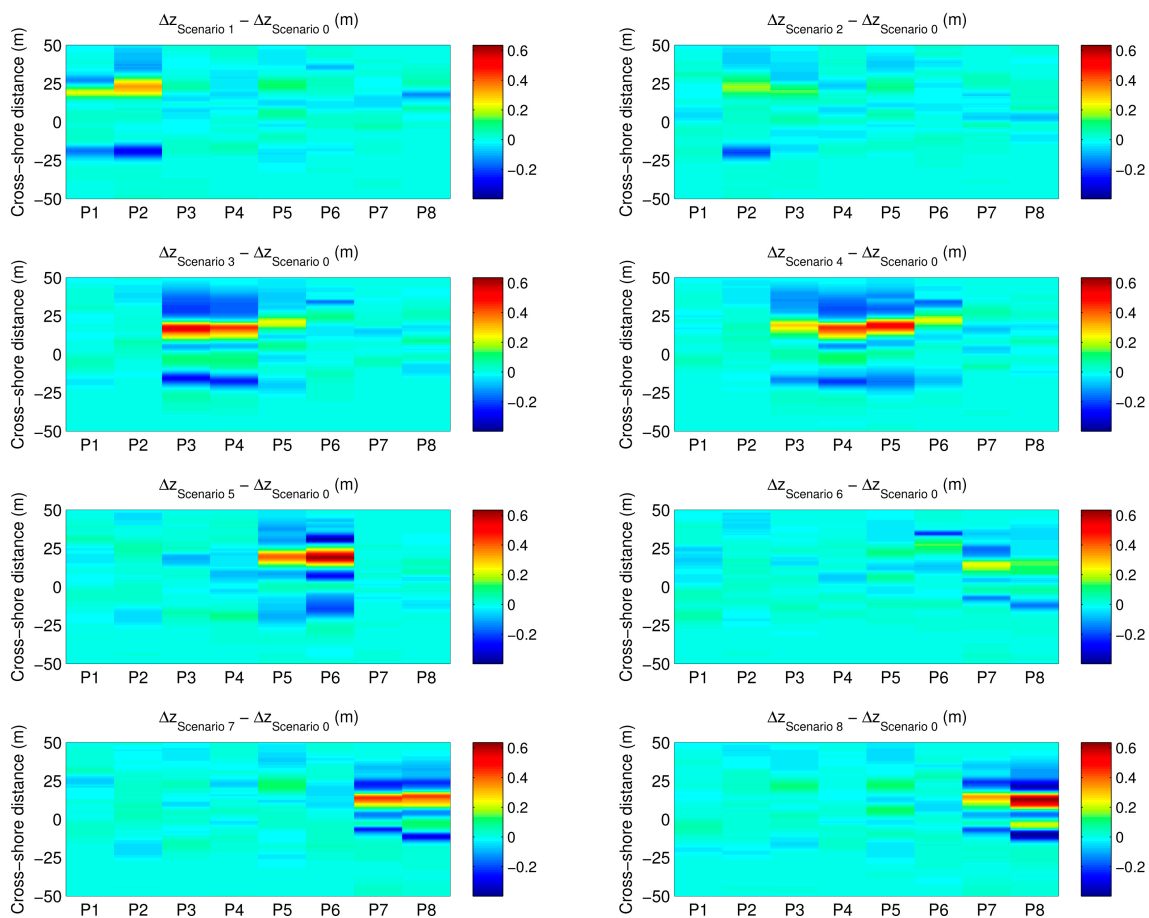


Figura 39: Diferencias en los cambios en el nivel del lecho marino para cada escenario comparado con el escenario 0 bajo condiciones de tormenta occidental en los perfiles P1 a P8. Los valores positivos (negativos) de la barra de color representan la reducción (aumento) de la erosión con respecto al escenario 0. Los valores positivos (negativos) de la distancia cruzada de la costa corresponden a la parte emergida (sumergida) de los perfiles de la playa.

En las condiciones de tormenta oriental, las mayores diferencias se obtienen para los escenarios 4, 5 y 6 (**Figura 40**), con reducciones medias del volumen erosionado hasta 33% a lo largo de la costa deltaica y 70,6% en Playa Granada (ambos para el escenario 5) . Teniendo en cuenta el promedio ponderado de los valores bajo las dos direcciones de tormenta predominantes, se obtienen las mayores protecciones para los escenarios 4 y 5, con disminuciones de 23,3% y 22,8% a lo largo de toda la costa, y 44,5% y 44% en Playa Granada, respectivamente (*tabla 2*). Estos valores son superiores a los obtenidos por *Abanades et al. (2015)*, con reducciones globales de la erosión de las playas iguales al 15% a través de la granja ubicada a 25 m de profundidad y alrededor del 10% por medio de las granjas a 30 my 35 m de profundidad. Esta mayor reducción es atribuible a la menor distancia a la costa en nuestro zona de estudio (hasta 1 km) con respecto a las distancias de Perranporth (alrededor de 2, 4 y 6 km para las granjas ubicadas a profundidades de 25, 30 y 35 m, respectivamente).

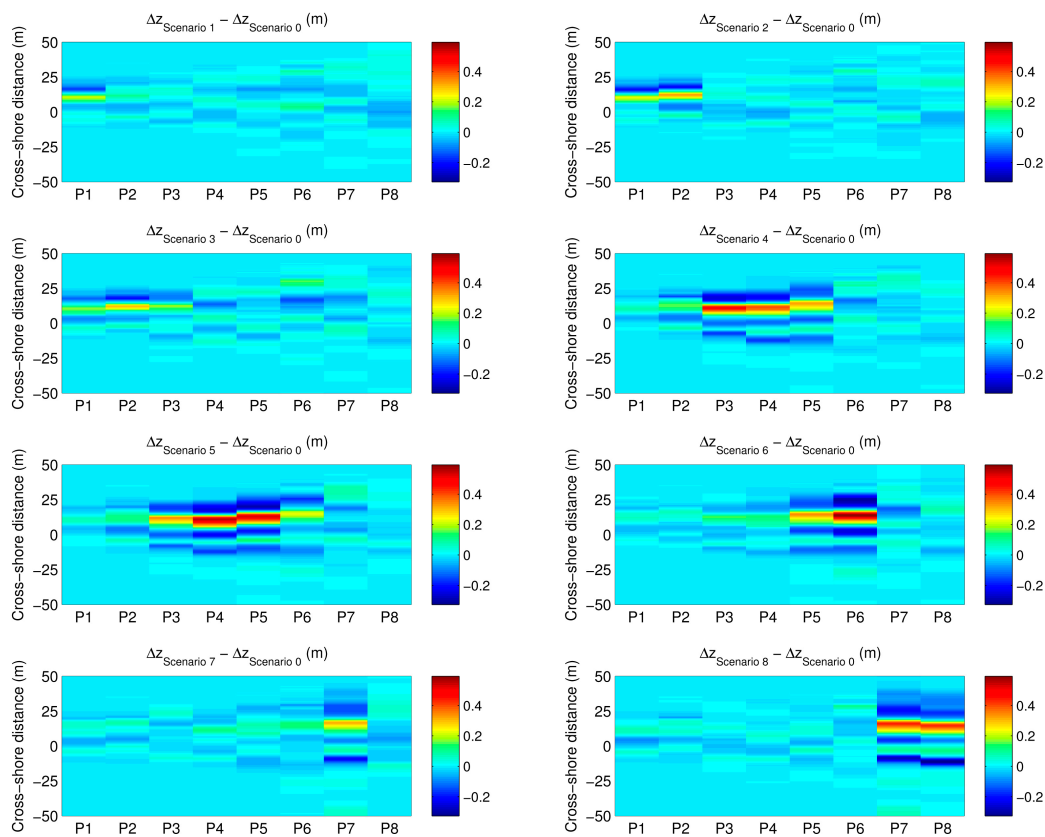


Figura 40: Diferencias en los cambios en el nivel del lecho marino para cada escenario comparado con el escenario 0 bajo condiciones de tormenta oriental en los perfiles P1 a P8. Los valores positivos (negativos) de la barra de color representan la reducción (aumento) de la erosión con respecto al escenario 0. Los valores positivos (negativos) de la distancia cruzada de la costa corresponden a la parte emergida (sumergida) de los perfiles de la playa.

6. Selección de la alternativa óptima

Aunque la influencia de las granjas de olas en la dinámica costera ha recibido una creciente atención durante los últimos años, no se han investigado los efectos de las granjas en las playas deltaicas dominadas por grava en función de sus ubicaciones costeras. Este trabajo fin de grado modela la respuesta tormentosa de la costa deltaica del Guadalfeo (Sur de España) para diferentes ubicaciones costeras de una granja de olas, mediante la aplicación conjunta de un modelo de propagación de olas (Delft3D-Wave) y un modelo morfodinámico (XBeach-G) calibrado para la zona de estudio.

Se procedió a la cuantificación de las implicaciones en la propagación de las olas, en la fase inicial y en la morfología de las playas para cada escenario de ubicación de la granja de olas y en comparación con la situación real (escenario 0).

La influencia de los diferentes escenarios de la localización de las granjas de olas en la propagación de éstas ha sido estudiada mediante la cuantificación de la altura significativa de ola en el lado sotavento de la granja (a 10 m de profundidad H_{10m}). Se obtuvieron los valores más bajos ponderados de H_{10m} a lo largo de toda la costa deltaica y en la sección más afectada por el retroceso de la costa (Playa Granada) con el escenario 5 ($H_{10m}=1,73m$ y $H_{10m}=1,72m$ respectivamente), seguido del escenario 4 ($H_{10m} = 1,74$ m y $H_{10m}=1,73$ m, respectivamente). Las reducciones ponderadas de H_{10m} para el escenario 5 en comparación con la situación real son iguales a 9.8% y 18.3% en toda la costa deltaica y en Playa Granada, respectivamente. (**Tabla 2**)

| | H _{10m} | | R _{2%} | | AV | |
|-------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Total | PG | Total | PG | Total | PG |
| Escenario 1 | 4,35 % | 0,29 % | 4,49 % | 0,96 % | 11,08 % | 8,95 % |
| Escenario 2 | 5,69 % | 2,96 % | 4,17 % | 1,83 % | 2,62 % | 4,44 % |
| Escenario 3 | 8,58 % | 10,96 % | 4,31 % | 5,43 % | 6,06 % | 5,64 % |
| Escenario 4 | 9,27 % | 16,99 % | 4,87 % | 8,56 % | 23,30 % | 44,53 % |
| Escenario 5 | 9,84 % | 18,31 % | 7,73 % | 10,57 % | 22,82 % | 44 % |
| Escenario 6 | 8,77 % | 11,94 % | 5,32 % | 8 % | 14,67 % | 19,15 % |
| Escenario 7 | 8,36 % | 4,87 % | 2,32 % | 3,26 % | 3,36 % | 14,83 % |
| Escenario 8 | 6,84 % | 0,74 | 3,03 % | 1,14 % | 5,09 % | 4,34 % |

Tabla 2: Porcentaje de reducción de la altura significativa de las olas a 10 m de profundidad de agua (H_{10m}), onda de ascenso (R_{2%}) y erosión de la playa (AV) para cada escenario con respecto al escenario 0. Los porcentajes de la distancia costera protegidos por cada escenario con respecto a la longitud de la costa (L).

En cuanto al run-up, los efectos de la localización de la granja de olas se cuantificaron por medio de los valores de superación del 2% del run-up (R_{2%}). Los valores más bajos ponderados de R_{2%} se obtuvieron de nuevo mediante el escenario 5 (R_{2%} = 1,09 m a lo largo de toda la costa deltaica y R_{2%} = 1,18 m en Playa Granada) seguido del escenario 4 (R_{2%} = 1,12 m y R_{2%} = 1,2 m , Respectivamente). En este caso, las disminuciones con respecto a la situación actual son iguales a 7,7% en la costa deltaica y 10,6% en Playa Granada para el escenario 5, y 4,9% en la costa deltaica y 8,6% en Playa Granada (para el escenario 4).

Para analizar el papel de la localización de la granja en la morfología de la playa, los cambios en el nivel del lecho marino inducida por la tormenta se calcularon en ocho perfiles de playa. Bajo las tormentas occidentales, la mayor protección se obtuvo por medio del escenario 4, con una disminución media de la erosión de las playas (en comparación con el escenario 0) del 14%

en toda la playa deltaica y del 32% en la Playa de Granada. Para el escenario 5 se obtuvieron las máximas reducciones de erosión en tormentas orientales, con diferencias medias respecto al escenario 0 iguales al 33% a lo largo de la costa deltaica y al 70,6% en Playa Granada. Considerando ambas tormentas, occidentales y orientales, las reducciones con el escenario 4 (escenario 5) fueron iguales al 23,3% (22,8%) en la costa deltaica y al 44,5% (44%) en Playa Granada.

De acuerdo con los resultados obtenidos por *López-Ruiz et al. (2016)*, el escenario 5 es el lugar con los mayores valores de potencia de las olas seguido del escenario 6. Esto, junto con el análisis de las variables hidrodinámicas y morfológicas presentado en este trabajo (*resumido en la Tabla 2*), nos permite concluir que la mejor ubicación en términos de rendimiento energético y protección costera es el escenario 5.

La metodología seguida en este trabajo, basada en la aplicación conjunta de la propagación de ondas calibradas y los modelos morfodinámicos, se puede extender factiblemente a otras costas del mundo para seleccionar la mejor ubicación de oleaje en términos de reducciones en la altura de las olas o la erosión de la playa. Esto es particularmente relevante en áreas deltaicas, sometidas a problemas de erosión cada vez mayores debido a las actividades humanas y especialmente vulnerables al aumento esperado del nivel del mar en los próximos años.

7. Presupuesto de la alternativa seleccionada

El sector no cuenta con la suficiente experiencia en campo como para poder estimar de forma precisa los costes correspondientes al funcionamiento operativo de un parque de olas comercial. Únicamente se conocen valores aproximados de parte del coste capital de algunos dispositivos, sin embargo, es posible establecer una aproximación del resto de cuantías a partir de la experiencia en instalaciones de gas o petróleo y en parques eólicos *offshore*. Diferentes entidades y personalidades han intentado establecer un orden de magnitud para coste capital y de operación y mantenimiento.

A continuación, se compara el valor total aproximado de la instalación de un único dispositivo WaveDragon frente a la instalación de una granja de olas con 11 dispositivos de la misma tipología.

| TOTAL INSTALACIÓN DE UN ÚNICO DISPOSITIVO WAVEDRAGON | |
|--|-------------|
| VIDA ÚTIL DISPOSITIVO | 25 AÑOS |
| METROS DE FRENTE DE OLAS | 150 m |
| % ENERGÍA EXTRAIDA DE OLA | 40 % |
| COSTES DE INVERSIÓN | |
| <i>Ingeniería Básica, Estudios Previos, Elaboración de Proyectos, Dirección y Coordinación</i> | 1.500.000 € |
| <i>Infraestructura</i> | 3.180.000 € |
| - Obra civil de instalaciones colocadas en la orilla del mar | |
| - Subestación | |
| - Conexión a tierra | |
| - Centro de control | |
| Instalación y Montaje Infraestructura Eléctrica | 1.500.000 |
| - Transporte por tierra | |
| - Transporte por mar | |

| | |
|---|---------------------|
| - Maquinaria | |
| Dispositivo de Conversión de Energía (Potencia 7MW) | 3.500.000 € |
| - Coste Obra Civil | |
| - Estructura Mecánica | |
| - Sistema de Extracción de Energía: generador, sistema eléctrico e hidráulico | |
| - Sistema de Amarre: Anclaje | |
| - Control Remoto | |
| - Conexión a Red | |
| Instalación y Montaje del Sistema de Conversión de Energía y del Sistema de Anclaje | 2.000.000 € |
| Costes de Inversión Adicional a la mitad de la Vida Útil de la Instalación (20% del Coste Inicial) | 3.650.000 € |
| | |
| Coste Anual Variable de Operación (15% de la Inversión Total) | 2.737.500 € |
| - Operación y Mantenimiento | |
| - Gastos Personales | |
| - Seguros y Cánones | |
| | |
| Coste de Desmantelamiento para las Operaciones de Reequipamiento (1% de la Inversión) | 182.500 € |
| | |
| TOTAL INVERSIÓN | 18.250.000 € |

| | |
|--|-------------------|
| TOTAL INSTALACIÓN GRANJA CON 11 DISPOSITIVOS WAVEDRAGON | |
| VIDA ÚTIL DISPOSITIVO | 25 AÑOS |
| | |
| METROS DE FRENTE DE OLAS | 150 m |
| | |
| % ENERGÍA EXTRAIDA DE OLA | 40% / dispositivo |
| | |
| COSTES DE INVERSIÓN | |

| | |
|---|----------------------|
| Ingeniería Básica, Estudios Previos, Elaboración de Proyectos, Dirección y Coordinación | 1.500.000 € |
| Infraestructura | 6.000.000 € |
| - Obra civil de instalaciones colocadas en la orilla del mar | |
| - Subestación | |
| - Conexión a tierra | |
| - Centro de control | |
| Instalación y Montaje Infraestructura Eléctrica | 2.000.000 |
| - Transporte por tierra | |
| - Transporte por mar | |
| - Maquinaria | |
| Dispositivo de Conversión de Energía (Potencia 7MW) | 38.000.000 € |
| - Coste Obra Civil | |
| - Estructura Mecánica | |
| - Sistema de Extracción de Energía: generador, sistema eléctrico e hidráulico | |
| - Sistema de Amarre: Anclaje | |
| - Control Remoto | |
| - Conexión a Red | |
| Instalación y Montaje del Sistema de Conversión de Energía y del Sistema de Anclaje | 22.000.000 € |
| Costes de Inversión Adicional a la mitad de la Vida Útil de la Instalación (20% del Coste Inicial) | 24.780.000 € |
| | |
| Coste Anual Variable de Operación (19% de la Inversión Total) | 22.540.000 € |
| - Operación y Mantenimiento | |
| - Gastos Personales | |
| - Seguros y Cánones | |
| | |
| Coste de Desmantelamiento para las Operaciones de Reequipamiento (1% de la Inversión) | 1.180.000 € |
| 6020000 | |
| TOTAL INVERSIÓN | 118.000.000 € |

Bibliografía

- Abanades, J., Greaves, D., Iglesias, G., 2014a. Coastal defence through wave farms. *Coastal Engineering* 91, 299-307.
- Abanades, J., Greaves, D., Iglesias, G., 2014b. Wave farm impact on the beach profile: A case study. *Coastal Engineering* 86, 36-44.
- Abanades, J., Greaves, D., Iglesias, G., 2015. Coastal defense using wave farms: The role of farm-to-coast distance. *Renewable Energy* 75, 572-582.
- Allen, J., Sampanis, K., Wan, J., Greaves, D., Miles, J., Iglesias, G., 2016. Laboratory Tests in the Development of WaveCat. *Sustainability* 8, 1339.
- Anthony, E.J., Marriner, N., Morhange, C., 2014. Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000 years: From progradation to destruction phase? *Earth-Science Reviews* 139, 336-361.
- Beels, C., Troch, P., De Visch, K., Kofoed, J.P., De Backer, G., 2010. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. *Renewable Energy* 35, 1644-1661.
- Bergillos, R.J., Masselink, G., McCall, R.T., Ortega-Sánchez, M., 2016b. Modelling overwash vulnerability along mixed sand-gravel coasts with Xbeach-G: Case study of Playa Granada, southern Spain, in: *Coastal Engineering Proceedings*, p. 13.
- Bergillos, R.J., Masselink, G., McCall, R.T., Ortega-Sánchez, M., 2017a. Coupling XBeach-G and longshore sediment transport to model storm response along a gravel-dominated coast under varying wave directions. *Coastal Engineering*, under review.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., 2017. Assessing and mitigating the landscape effects of river damming of the Guadalfeo River delta, southern Spain. *Landscape and Urban Planning* 165, 117-129.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2015a. Foreshore Evolution of a mixed sand and gravel beach: The case of Playa Granada (Southern Spain), in: *Proceedings of the 8th Coastal Sediments*, World Scientific.
- Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., Masselink, G., Losada, M.A., 2016c. Morpho-sedimentary Dynamics of a micro-tidal mixed sand and gravel beach, Playa Granada, Southern Spain. *Marine Geology* 379, 28-38.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., López-Ruiz, A., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2015b. Recent human-induced coastal changes on the Guadalfeo river deltaic system (Southern Spain), in: *Proceeding of the 36th IAHR-International Association for Hydro-Environment Engineering and Research World Congress*.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2016d. Impact of River regulación on a Mediterranean delta: Assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research* 52, 5132-5148.
- Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Ortega-Sánchez, M., 2017b. Advances in management tools for modeling artificial nourishments in mixed beaches. *Journal of Marine Systems* 172, 1-13.
- Carballo, R., Iglesias, G., 2013. Wave farm impact based on realistic wave-WEC interaction. *Energy* 51, 216-229.

- Clément, A., McCullen, P., Falcao, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammar-lund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., et al., 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 405-431.
- Commission, E., et al., 2007. A European Strategic Energy Technology Plan (Set-Plan): Towards a low carbon future. Brussels: Commission of the Euro-pean Communities.
- Deltares, 2014. XBeach-G GUI 1.0. User Manual. Delft, The Netherlands.
- Félix, A., Baquerizo, A., Santiago, J.M., Losada, M.A., 2012. Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management* 112, 252–266.
- Fernandez, H., Iglesias, G., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J., Taveira-Pinto, F., Sanchez, M., 2012. The new wave energy converter wavecat: Concept and laboratory tests. *Marine structures* 29, 58–70.
- González, M.O.A., Gonçalves, J.S., Vasconcelos, R.M., 2017. Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 142, 461–475.
- Guanche, R., De Andres, A., Simal, P., Vidal, C., Losada, I., 2014. Uncertainty analysis of wave energy farms financial indicators. *Renewable Energy* 68, 570–580.
- Holthuijsen, L., Booij, N., Ris, R., 1993. A spectral wave model for the coastal zone, in: *Ocean Wave Measurement and Analysis*, ASCE. pp. 630–641.
- Huenteler, J., Niebuhr, C., Schmidt, T.S., 2016. The effect of local and global learning on the cost of renewable energy in developing countries. *Journal of Cleaner Production* 128, 6–21.
- Iglesias, G., Carballo, R., 2014. Wave farm impact: The role of farm-to-coast distance. *Renewable Energy* 69, 375–385.
- Jalón, M.L., Baquerizo, A., Losada, M.A., 2016. Optimization at different time scales for the design and management of an oscillating water column system. *Energy* 95, 110–123.
- Jeftic, L., Keckes, S., Pernetta, J.C., 1996. Climate change and the Mediterranean: environmental and societal impacts of climatic change and sea level rise in the Mediterranean region. Volume 2. Edward Arnold, Hodder Headline, PLC.
- Kung, C.C., Zhang, L., Chang, M.S., 2017. Promotion policies for renewable energy and their effects in taiwan. *Journal of Cleaner Production* 142, 965– 975.
- Lesser, G.R., 2009. An approach to medium-term coastal morphological modeling. Ph.D. thesis. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering* 51, 883–915.
- Lin, L., Yu, H., 2012. Offshore wave energy generation devices: impacts on ocean bio-environment. *Acta Ecologica Sinica* 32, 117–122.
- López, I., Castro, A., Iglesias, G., 2015. Hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter by means of particle imaging velocimetry. *Energy* 83, 89–103.
- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Lira-Loarca, A., Ortega-Sánchez, M., 2017a. Forecasting and uncertainty assessment of the life cycle performance, operational capacity and design specifications of wave energy converter arrays. *Applied Energy*, under review.

- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Ortega-Sánchez, M., 2016. The importance of wave climate forecasting on the decision-making process for nearshore wave energy exploitation. *Applied Energy* 182, 191–203.
- López-Ruiz, A., Bergillos, R.J., Riquelme-Caballero, J.M., Ortega-Sánchez, M., 2017b. Towards an optimum design of wave energy converter arrays through an integrated approach of the life cycle performance and operational capacity. *Applied Energy*, under review.
- López-Ruiz, A., Solari, S., Ortega-Sánchez, M., Losada, M.A., 2015. A simple approximation for wave refraction—Application to the assessment of the nearshore wave directionality. *Ocean Modelling* 96, 324–333.
- Losada, M.A., Baquerizo, A., Ortega-Sánchez, M., Ávila, A., 2011. Coastal evolution, sea level, and assessment of intrinsic uncertainty. *Journal of Coastal Research*, 218–228.
- Margheritini, L., Vicinanza, D., Frigaard, P., 2009. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy* 34, 1371–1380.
- Masselink, G., McCall, R.T., Poate, T., Van Geer, P., 2014. Modelling storm response on gravel beaches using XBeach-G, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, Thomas Telford Ltd. pp. 173–191.
- Masselink, G., Russell, P., Blenkinsopp, C., Turner, I.L., 2010. Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach. *Marine Geology* 274, 50–68.
- Matias, A., Williams, J.J., Masselink, G., Ferreira, O., 2012. Overwash threshold for gravel barriers. *Coastal Engineering* 63, 48–61.
- McCall, R.T., 2015. Process-based modelling of storm impacts on gravel coasts. Ph.D. thesis. Plymouth University, UK.
- McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., 2015. Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G. *Coastal Engineering* 103, 52–66.
- McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M., Russell, P.E., 2014. Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G. *Coastal Engineering* 91, 231–250.
- Mendoza, E., Silva, R., Zanuttigh, B., Angelelli, E., Andersen, T.L., Martinelli, L., Nørgaard, J.Q.H., Ruol, P., 2014. Beach response to wave energy converter farms acting as coastal defence. *Coastal Engineering* 87, 97–111.
- Millar, D., Smith, H., Reeve, D., 2007. Modelling analysis of the sensitivity of shoreline change to a wave farm. *Ocean Engineering* 34, 884–901.
- Millares, A., Polo, M.J., Moñino, A., Herrero, J., Losada, M.A., 2014. Bedload dynamics and associated snowmelt influence in mountainous and semiarid alluvial rivers. *Geomorphology* 206, 330–342.
- Monk, K., Zou, Q., Conley, D., 2013. An approximate solution for the wave energy shadow in the lee of an array of overtopping type wave energy converters. *Coastal Engineering* 73, 115–132.
- Nicholls, R.J., Hoozemans, F.M.J., 1996. The Mediterranean: vulnerability to coastal implications of climate change. *Ocean & Coastal Management* 31, 105–132.
- Nie, P.y., Chen, Y.h., Yang, Y.c., Wang, X.H., 2016. Subsidies in carbon finance for promoting renewable energy development. *Journal of Cleaner Production* 139, 677–684.
- Ortega-Sánchez, M., Bergillos, R.J., López-Ruiz, A., Losada, M.A., 2017. *Morphodynamics of Mediterranean Mixed Sand and Gravel Coasts*. Springer.

- 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* 198, 209–223.
- Palha, A., Mendes, L., Fortes, C.J., Brito-Melo, A., Sarmiento, A., 2010. The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices. *Renewable Energy* 35, 62–77.
- Payo, A., Mukhopadhyay, A., Hazra, S., Ghosh, T., Ghosh, S., Brown, S., Nicholls, R.J., Bricheno, L., Wolf, J., Kay, S., La'azar, A.N., Haque, A., 2016. Projected changes in area of the sundarban mangrove forest in bangladesh due to slr by 2100. *Climatic Change* 139, 279–291.
- Poate, T., Masselink, G., Davidson, M., McCall, R.T., Russell, P., Turner, I., 2013. High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions. *Marine Geology* 342, 1–13.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., McCall, R., 2010. XBeach model description and manual. Delft University of Technology, User Manual, Delft, The Netherlands.
- Roelvink, D., Reniers, A.J.H.M., van Dongeren, A.P., van Thiel de Vries, J., McCall, R.T., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56, 1133–1152.
- Ruol, P., Zanuttigh, B., Martinelli, L., Kofoed, P., Frigaard, P., 2011. Near- shore floating wave energy converters: Applications for coastal protection. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 61.
- Rusu, E., Soares, C.G., 2013. Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the Portuguese nearshore. *Renewable Energy* 58, 34–49.
- Spencer, T., Schuerch, M., Nicholls, R.J., Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Reef, R., McFadden, L., Brown, S., 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: the DIVA Wetland Change Model. *Global and Planetary Change* 139, 15–30.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering* 53, 573–588.
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L., Nicholls, R.J., 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience* 2, 681–686.
- Syvitski, J.P.M., Saito, Y., 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change* 57, 261–282.
- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376–380.
- Veigas, M., López, M., Iglesias, G., 2014. Assessing the optimal location for a shoreline wave energy converter. *Applied Energy* 132, 404–411.
- Zanuttigh, B., Angelelli, E., 2013. Experimental investigation of floating wave energy converters for coastal protection purpose. *Coastal Engineering* 80, 148–159.
- AEA Energy & Environment. *Review and analysis of ocean energy systems development and supporting policies*. Publicación para la IEA, 2006.
- BEDARD, Roger. *Global Marine Renewable Energy conference. Sesión 1 Technology Characterization, Ocean Wave and Tidal Energy*. EPRI (Electric Power Research Institute), 2008.

BEYENE, Asfaw. y WILSON, James H. *Comparison of wave energy flux for northern, central, and southern coast of California based on long-term statistical wave data*. Department of Mechanical Engineering, San Diego State University. 2006.

BOUND, Richard, THORPE, Tom. *D. Financing and economics*. WaveNet report. 2003 BRYDENL, I. G. *The marine energy resource, constraints and opportunities*, Maritime.

Carbon Trust. *Capital, operating and maintenance costs*. Artículo disponible en www.thecarbontrust.co.uk.

Carbon Trust. *Future Marine Energy Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy*. Disponible en www.thecarbontrust.co.uk, 2006.

Centre for Renewable Energy Sources (CRES), *Wave energy Utilization in Europe, Current Status and Perspectives*. European Thematic Network on Wave Energy, 2002.

Centre for Renewable Energy Sources, *Ocean Energy Conversion in Europe*, en Coordinated Action on Ocean Energy, proyecto de la UE, Renewable Energy Technologies, 2006.

CLÉMENT, A., MCCULLEN, P., FALCÃO, A., FIORENTINO, A., GARDNER, F., Department of Business, Economic Development, and Tourism (Honolulu). *Feasibility of Developing Wave Power as a Renewable Energy Resource for Hawaii*, 2002

DUNNETT, David y WALLACE, James S. *Electricity generation from wave power in Canada*. Renewable energy, pag 1-17. 2008.

EDWARDS, Tom. *Wave and tidal power: Harnessing the energy of the sea*. The Scottish Parliament, 2004.

EMEC [European Marine Energy Centre]. *Performance assessment for wave energy conversion systems in open sea test facilities*. Disponible en www.emec.org.uk. 2005.

EVE [Ente Vasco de Energía]. *Biscay Marine Energy Platform (BIMEP). Infraestructura Singular de Investigación en Energías Marinas*, 2008.

FALCÃO, Antonio y PONTES, Teresa. *M4 Wave energy resource characterization*. Second International Seminar on Technologies for Electricity Production Based on Sea Waves and Tidal Currents, 2007.

FALNES, J. y HALS, J. *Wave energy and its utilisation: A contribution to the EU Leonardo pilot project 1860 Alter ECO*. NTNU Noregs teknisk-naturvitskaplege.

FALNES, Johannes. *Havbolgje-energi*. NTNU Noregs teknisk-naturvitskaplege FERNANDEZ DIEZ, Pedro. *I Energía de las olas*. Departamento de Ingeniería.

Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2005

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. *II Modificación de la Energía de las olas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2004.

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. *III Técnicas para aprovechar la energía de las olas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2004.

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. *IV Aplicaciones de los OWC's*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2004.

FOLLEY, Matt. *Assessment of the wave energy resource* Wave Energy Research Group, Queen's University Belfast. 2006.

FOLLEY, Matt. *Evaluación de recursos y potencialidades de la energía del oleaje* GIANNOTTI ASSOCIATES. *Wave Power Generation and Mitigation of Beach Erosion for Long Island. Final Report. preparado para Long Island Power Authority. 2004.*

GONZÁLEZ VÉLEZ, José Ma. *Financiación y gestión de proyectos de energías renovables. Energías Renovables y Estabilidad Normativa.* APPA [Asociación de Productores de Energías Renovables], 2007.

Greenpeace. *Renovables 2050 Un informe sobre el potencial de las energías renovables en la España peninsular.* 2005.

H.C., THORPE, T. *Wave energy in Europe: current status and perspectives.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 pag. 405-431, 2002.

HAGERMAN, George y BEDARD, Roger. *Guidelines for preliminary estimation of power production by offshore wave conversion devices.* E2I EPRI Specificataion, Electricity Innovation Institute.2003.

HAGERMAN, George. *Southern New England Wave Energy Resource Potential* Center for Energy and the Global Environment, 2001.

HAMILTON, Luc. *AWS MK II Deployment, monitoring and evaluation of a prototype advanced wave energy device,* AWS Ocean Energy Ltd, 2006.

HAMMARLUND, K., LEMONIS, G., LEWIS, T., NIELSEN, K.,
HEATH, Tom. *Realities of Wave Technology.* Disponible en: www.wavegen.co.uk. 2003

HEATH, Tom. *The Construction, Commissioning and Operation of the LIMPET Wave Energy Collector:* Disponible en: www.wavegen.co.uk. 2006

HENFRIDSSON, U., NEIMANE, V., STRAND, K., KAPPER, R., BERNHOFF, H., DANIELSSON, O., LEIJON, M., SUNDBERG, J., THORBURN, K., ERICSSON, E. Y.

BERGMAN, K. *Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak.* Renewable Energy, 2006.

I+D INGEMAR. *Estudio de las zonas potenciales de ubicación en base a un estudio de mercado en regiones atlántica.* Proyecto: Plan de desarrollo regional para el uso de la energía proveniente del oleaje Atlántico. 2007.

IBAÑEZ EREÑO, Pedro. *Energías de las olas: Situación y Futuro.* TECNALIA, IBAÑEZ EREÑO, Pedro. *Energías de las olas: Situación y Futuro. Simposio.*

Internacional: Energía y Sostenibilidad. Robotiker-TECNALIA, 2008.

IBAÑEZ EREÑO, Pedro. *PSE: Energía Marina.* Robotiker-TECNALIA, Jornada "Análisis de la Configuración y Desarrollo de los proyectos I+D energéticos. Proyectos singulares y estratégicos, 2005.

IBAÑEZ EREÑO, Pedro. *Tecnologías emergentes: Energía del mar.* Robotiker- TECNALIA, 2005.

IBAÑEZ EREÑO, Pedro. *Tecnologías emergentes: Energía del Mar.* Robotiker- Tecnalia, 2005.

IBERDROLA ENERGIAS REBNOVABLES, *Energía Offshore.* IBERENOVA Curso Ener.Renov. Parte1-2, 2005.

IEA [International Energy Agency]. *Ocean energy systems annex II Report 2003. Implementing Agreement on Ocean Energy Systems.* 2003.

- IEA-OES [Internacional Energy Agency - Ocean Energy Systems]. *Internacional energy agency implementing agreement on ocean energy systems, annual report 2007*.
- INRI [Independent Natural Resource, Inc.]. *World-wide Wave Market Research - Updated June 2007*. Disponible en: www.inri.us
- KIM NIELSEN, Ramboll, *Development of ocean energy in Denmark, en Canada & the World of Ocean Renewable Energy Symposium*, 2006.
- LEGAZ POIGNON, Roberto. *Energía Marina. Desarrollo de una planta de energía de las olas en el Cantábrico*. IBERDROLA ENERGÍAS RENOVABLES 2a Jornada Internacional sobre Energía Marina del Ente Vasco de la Energía (EVE), 2006.
- LEMONIS, George. *Ocean wave and tidal energy conversion*. Centre for Renewable Energy Sources, 2003.
- LIZANO R., Omar G. *Capítulo VIII: Ondas superficiales*. FS-0115 FUNDAMENTOS DE OCEANOGRAFIA, 2002.
- LOPEZ-MANZANARES F. Luis Ovidio, *Sistemas de generación undimotriz*. Jornadas Técnicas Wavenergy, 2007.
- MARQUÉS, Javier. *Actuaciones EVE en el campo de la energía marina. Proyecto "Mutriku"*. Jornada Internacional sobre Energía Marina. Ente Vasco de la Energía (EVE), 2005.
- MARQUÉS, Javier. *Open sea research and test facilities for wave energy converters (Basque Country, Northern Spain)*. EVE [Ente Vasco de Energía], 2008.
- MARTÍNEZ POMAR, Enrique. *Medio Ambiente; Normalización y Marco Regulatorio. VISIÓN DE LAS EMPRESAS PROMOTORAS*. 2a Jornada Internacional sobre Energía Marina. APPA [Asociación de Productores de Energías Renovables], 2007.
- MEYER, Niels I. Y NIELSEN, Kim. *The Danish Wave Energy Programme Second Year Status*. Danish Energy Agency. 2001.
- MINGO, Luis. *Environment; Normalisation and Regulatory Frame. PROMOTORY ENTERPRISES VISION*. APPA [Asociación de Productores de Energías Renovables], 2007.
- NEUMANN, F. BRITO-MELO, A. DIDIER, E. y SARMENTO, A. *Pico OWC Recovery Project: Recent Activities and Performance Data*. Wave Energy Centre, Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico y Technical University of Lisbon, 2007.
- ÖZGER, Mehmet. ALTUNKAYNAK, Abdusselam. SEN, Zekai. *Technical note: Stochastic wave energy calculation formulation*. Istanbul Technical University, Civil Engineering Faculty, Hydraulics Division, Maslak. Renewable Energy 29, 2004.
- PETRONCINI, S., PONTES, M.T., SCHILD, P., SJÖSTRÖM, B., SØRENSEN, PIPO Systems. *SPI-PSE MAR: APC – PISYS. Sistema trivolumétrico "PISYS" de PIPO Systems, S.L.* 2007.
- PREVISIC, M. BEDARD, R. HAGERMAN, G. *Offshore Wave Energy Conversion Devices*. E2I EPRI Assessment [Electricity Innovation Institute], 2004.
- ROSÉS GUIX, María. *L'onatge com a font d'energia en el Mediterrani Catalano-Balear*, Tesina UPC, ETSECCCPB, 2006.
- RUIZ MINGUELA, J. Pablo. *Aprovechamiento de la Energía de las Olas*. TECNALIA, 2a Jornada Internacional sobre Energía Marina, 2007.

- S.BHUYAN, Gouri. *Harnessing the Power of the Oceans* IEA OPEN Energy Technology Bulletin No. 52, 2008.
- SARMENTO, Antonio. *Wave and Tidal Technologies for Power Generation*, Wave Energy Center, 2008.
- Scottish Marine Renewables SEA. *Environmental Report Section B: Marine Renewables – Resource and Technology*. Scottish Executive, 2007.
- SORENSEN, Hans C., KJELD HANSEN, Lars Y HANSEN Rune. *Social, planning and environmental impact* . WaveNet, 2003.
- TECNALIA. *Oceantec: Desarrollo tecnológico de un sistema de aprovechamiento de la energía de las olas. Informe publicable*. EKINBERRI 2006 Fomento de la Innovación y de la Mejora de la Competitividad en Bizkaia, 2007.
- THORPE, Tom. *A Brief Overview of Wave & Tidal Energy*. 2003.
- THORPE, Tom. *A Brief Review of Wave Energy*. Publicado para UK Department of
- U.S. Department of the Interior. *Technology White Paper on Wave Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf*. Minerals Management Service Renewable Energy and Alternate Use Program, 2006.
- VERGARAY MUÑOZ, Jaime y BAESLER CORREA, Hugo. *Generación eléctrica mediante el oleaje marítimo costero*. V Seminario de ingeniería y operaciones portuarias, 2008.
- VIDAL PASCUAL, Cesar. CONAMA, Congreso Nacional de Medio Ambiente. Cumbre del desarrollo sostenible, 2008.
- VIDAL PASCUAL, César. *Evaluación del flujo de energía del oleaje: Aplicación a la costa del País Vasco*. UC (Universidad de Cantabria), 2006.
- VIDAL PASCUAL, Cesar. *Introducción a la energía del oleaje y posibilidades de la costa vasca*. UC (Universidad de Cantabria) y EVE (Ente vasco de Energía), 2008.
- VITERI, Xabier. *Instalación eléctrica de captación de la energía de las olas. Santoña (Cantabria)*. Iberdrola Energías Renovables, 2004.
- WALKER, Andy. KANDT, Alicen y HEIMILLER, Donna. *Wave power for U.S. coast guard fiert district lighthouses*. National Renewable Energy Lab. 2005 International Solar Energy Conference.
- WAVE DRAGON *Wave Dragon Submit Environmental Impact Assessment Statement and Offshore Consents*. Disponible en: www.wavedragon.net, 2007
- WAVE DRAGON, *Wave Dragon Wave Energy Converter Project Briefing Note #2*. Disponible en: www.wavedragon.net, 2006.
- Wave Energy Centre. *Refurbishment Project of wave Energy Power. Plant at Pico Islands. Azores*. Disponible en: www.pico-owc.net. 2006
- World Energy Council, *2007 Survey of Energy Resources* , pag. 550-564, 2007. Xornada sobre Enerxía que Vén do Mar, 2008.
- Ciemat [Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas], <http://www.energiarenovables.ciemat.es/>
- Carbon Trust, *Core themes of the MEC y Capital, operating and maintenance costs*. Artículos disponibles en: www.carbontrust.co.uk

KROGSTAD, Harald E. Y ARNTSEN, Øivind A. *Linear Wave Theory*. Norwegian University of Science and Technology. Disponible en: http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse, 2000.

PETER, Stefan Y LEHMANN, Harry. *Renewable Energy Outlook 2030. Energy Watch Group Global Renewable Energy Scenarios*. Energy Watch Group, 2008. Disponible en: www.isusi.de

Ministerio de economía, *REAL DECRETO 436/2004, de 12 de marzo*, BOE núm. 75. APPA [Asociación de Productores de Energías Renovables], *Revisión Régimen*

Económico Energías Renovables, Informe propuestas APPA. Noviembre 2006.

PREVISIC, Mirko. SIDDIQUI, Omar. y BEDARD, R. *Economic Assessment Methodology for Offshore Wave Power Plants*. EPRI Global E2I Guideline. 30 Noviembre 2004. Rev 4.