



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Respuesta de la playa de Muskiz al impacto de temporales. Eventos singulares vs clusters de temporales.

Treball realitzat per:

LUCAS HERRERO PONS

Dirigit per:

JOSE ANTONIO JIMENEZ QUINTANA

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, **Setembre de 2019**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUMEN

Se ha usado un modelo bidimensional de computación para la investigación del impacto de una secuencia de temporales en la evolución de la morfología de la playa de Muskiz, Golfo de Vizcaya. Se ha enfocado el estudio al análisis de las diferencias entre la respuesta de una playa recuperada (eventos aislados o *isolated*) y una playa que no ha tenido tiempo de recuperarse (secuencia de temporales o *clusters*).

En el invierno de 2013/2014 se registraron en el mar Cantábrico y a lo largo de la costa atlántica europea condiciones climatológicas únicas que, consecuentemente, modificaron drásticamente esta costa. La acumulación de numerosas grandes tormentas en un espacio de tiempo reducido lo convierten en el invierno más energético desde, al menos, 1948.

La disponibilidad de los datos climatológicos offshore, los niveles del mar reales y la batimetría pre y post tormenta de esta secuencia de eventos tan singular son la base del estudio numérico del trabajo, que permite la cuantificación de la vulnerabilidad de la playa a *clusters* extremos de temporales.

Para ello se han simulado los efectos de los temporales en la playa considerándolos primero como eventos aislados y luego como una secuencia de temporales. Los resultados se han analizado de forma cuantitativa y cualitativa, estudiando la evolución morfológica de la playa y la erosión o acreción sufrida tras cada temporal y en el conjunto de la secuencia, así como otros factores como son la disipación de energía por rotura de oleaje.

Se han observado diferencias significativas entre los resultados dependiendo de si el temporal impacta sobre una playa recuperada o no. El efecto del *cluster* provoca que los efectos globales sean mayores que en el caso de una serie de eventos aislados. En la secuencia existe cierta proporcionalidad entre la magnitud e intensidad del temporal y los efectos que causa, sin embargo, parece tener más peso la influencia del orden de llegada del temporal. En una secuencia de temporales, la energía que se disipa en la zona emergida y de entre mareas pasa a disiparse antes, en la zona sumergida que ha sufrido acreción.

Lo extraído en el estudio ayuda a conocer mejor la morfodinámica en general y la playa de Muskiz en concreto y lleva a pensar que se debe tener en cuenta el factor de las secuencias en el dimensionamiento de proyectos costeros y no solo el periodo de retorno.

ABSTRACT

A bidimensional computational model has been used for the investigation of the cluster effects on the Muskiz beach, Bay of Biscay. Analysis was approached by comparison of the effects of a storm among a recovered beach (isolated events) and a beach that has not had time to recover (clusters).

In the winter of 2013/2014, unique climatic conditions were recorded in the Cantabrian Sea and along the European Atlantic coast, that was consequently drastically modified. The accumulation of numerous large storms in a reduced space of time makes it the most energetic winter since at least 1948.

The availability of offshore weather data, sea levels registration and the pre and post-storm bathymetry of this unique sequence of events are the basis of the numerical study, which allows quantification of the vulnerability of the beach to extreme clusters.

To this end, the effects of storms on the beach have been simulated, considering them first as isolated events and then as a sequence of storms. The results have been analyzed quantitatively and qualitatively, studying the morphological evolution of the beach and the erosion or accretion suffered after each storm and in the whole sequence, as well as other factors such as the dissipation of energy due to wave breakage.

Significant differences between the results have been observed depending on whether the storm impacts as an isolated storm or as a part of a sequence. The effect of the cluster causes the overall effects to be greater than in the case of a series of isolated events. In the sequence there is a certain proportionality between the magnitude and intensity of the storm and the effects it causes, however, the influence of the order of arrival of the storm seems to have more weight. In a sequence of storms, the energy that dissipates in the backshore and foreshore happens to dissipate before, in the nearshore, that has suffered accretion.

What was extracted in the study helps to better understand morphodynamics in general and Muskiz's beach in particular and leads us to think that the sequence factor must be taken into account in the dimensioning of coastal projects and not just the return period.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1.	ESTADO DEL ARTE.....	6
2.	ÁREA DE ESTUDIO.....	6
3.	DATOS DISPONIBLES.....	8
3.1.	DATOS TOPOGRÁFICOS.....	8
3.2.	DATOS CLIMATOLÓGICOS.....	8
3.2.1.	OLEAJE Y VIENTO.....	8
3.2.2.	NIVEL DEL MAR.....	9
4.	METODOLOGÍA.....	9
4.1.	MODELOS.....	9
4.2.	SET UP DEL MODELO.....	11
4.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	12
4.3.1.	SELECCIÓN DE PARAMETROS PARA LA CALIBRACIÓN.....	12
4.3.1.	EVENTO CONSIDERADO PARA EL MODELO DE CALIBRACIÓN.....	13
4.3.2.	DATOS DE BATIMETRÍA UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN.....	13
4.3.3.	ENFOQUE DE LA CALIBRACIÓN.....	13
4.4.	SIMULACIÓN DE CONDICIONES SELECCIONADAS.....	14
4.4.1.	CONDICIONES SELECCIONADAS.....	14
4.4.2.	ENFOQUE DEL PROCESO COMPUTACIONAL.....	15
4.5.	DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	15
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
5.1.	RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.....	16
5.2.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES SELECCIONADAS.....	17
5.2.1.	ISOLATED.....	17
5.2.2.	CLUSTER.....	18
5.3.	DISCUSIÓN.....	18
6.	CONCLUSIONES.....	21
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	23

1. INTRODUCCIÓN

El litoral es la zona que se extiende entre los límites superior e inferior donde alcanza la acción del oleaje [10], es un sistema dinámico y en constante movimiento debido a la influencia directa del mar, que en ocasiones puede llegar a modificar el terreno drásticamente.

Define el lugar geográfico donde habita aproximadamente el 40% de la población mundial [1], en una superficie que no representa ni el 4% de la mundial, según la UNEP (2006). Tiene una gran importancia económica ya que es el lugar lógico para puertos marítimos y procesos industriales que requieran de un gran flujo de agua, como por ejemplo el enfriamiento; asimismo es un terreno atractivo para el uso residencial y turístico. Además, el proceso de interacción constante entre la hidrodinámica marina y la morfología costera es responsable del mantenimiento de ecosistemas y de su biodiversidad.

Todo ello hace del conocimiento de la zona costera, la previsión de su dinámica y su protección algo primordial. Aún más en el futuro, debido a los efectos previstos a causa del calentamiento global, que no solo hará subir el nivel del mar, sino que incrementará la intensidad de las tormentas y su frecuencia, como se vio en el invierno del año 2013 al 2014 en la costa Atlántica europea; y en todo el mundo durante los últimos años.

Las condiciones ambientales como son el oleaje, las corrientes y el viento son las dinámicas responsables de la definición batimétrica de una playa. A su vez, esta morfología de la playa hará que la respuesta a la energía de estas condiciones ambientales sea una u otra. De esta forma, la evolución de cierta playa viene definida por la constante interacción entre las condiciones ambientales y las formas tridimensionales de esta.

Según la morfodinámica se pueden distinguir diez estados de una playa, que dividen su evolución en etapas de acreción y erosión, así como los extremos de equilibrio: el reflejante (estado de máxima acreción) y el disipativo (de máxima erosión) (Wright and Short, 1984). [Figura 1]

Estos estados vienen definidos por la capacidad de la playa de disipar energía por rotura de oleaje, siendo las playas reflejantes las que menos energía disipan y las disipativas las que más (sistemas en los que el oleaje pierde la mayoría de su energía al romper en los primeros metros de aguas someras). Al llegar a la orilla, el oleaje tiene menos energía en playas en estado disipativo que reflectivo, por eso las primeras provocan acreción y las segundas erosión. [15]

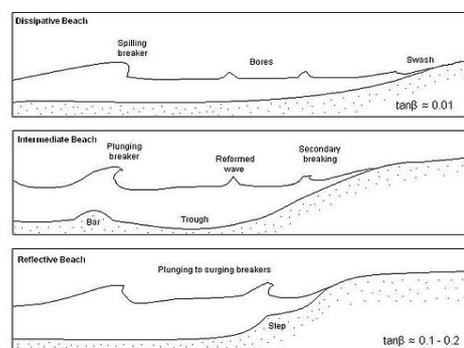


Figura 1. Representación de los estados morfodinámicos de las playas. De arriba abajo: disipativa, intermedia y reflectiva. (Fuente: <https://images.app.goo.gl/xujot1ghMjS4kmeB9>)

Tras un temporal, la morfología una playa suele cambiar, sin embargo, tras un tiempo de relativa calma, la playa se suele recuperar de los estragos. Si tras un temporal llega otro antes de transcurrir el conocido como periodo de recuperación (lo que se denomina *cluster* o secuencia de temporales), se ha comprobado que pueden generar un impacto mayor en el litoral que estas mismas tormentas aisladas. [15] Esto indica que, en ocasiones, el periodo de retorno no es el único baremo a tener en cuenta al dimensionar una infraestructura costera o a la hora de planear estrategias de gestión costera, sino que el factor secuencial de eventos con periodo de retorno más pequeño también debe considerarse.

Es por esto que este estudio evalúa el comportamiento concreto de la playa de Muskiz (Bizkaia) al impacto de secuencias de temporales mediante la simulación numérica de los procesos morfodinámicos junto con datos medidos en la zona. Los resultados obtenidos servirán para la interpretación de la evolución de la playa, así como de guía para la gestión de costas en la zona. Aunque el análisis se centre en una sola playa, las conclusiones se pueden transferir a otras de características similares alrededor del mundo.

1.1. ESTADO DEL ARTE

Callaghan et al. mostraron en 2008 el impacto de temporales concentrados en el tiempo con un enfoque probabilístico y, más tarde, en el 2012, Vousdoukas et al. estudiaron los procesos de erosión debidos a secuencias de temporales. [23]

Un estudio de Ferreira del 2005 revela que la incidencia en la costa noroeste de Portugal de una serie de tormentas de un periodo de retorno pequeño en un espacio de tiempo reducido provocó una erosión equivalente a la producida por una tormenta de periodo de retorno mucho mayor. [6] En la misma línea, en el 2014, Karunarathna et al. observaron que en la playa de Narrabeen, Australia, la acumulación de pequeños temporales en pequeños intervalos puede producir daños mucho mayores que una sola tormenta de dimensiones superiores. [14]

Sin embargo, los efectos de los clusters dependen también de la morfología de la playa (sobre todo los gradientes de inclinación del fondo) y de la dirección de la playa respecto a la del oleaje, como se demostró en la costa de Setfton, Reino Unido. [4]

2. ÁREA DE ESTUDIO

La playa de Muskiz (UTM 30N ETRS89 X:490547,053 Y: 4799540,968), conocida también como Playa de La Arena o Somorrostro, está situada en el golfo de Bizkaia, bañado por el Mar Cantábrico. Concretamente se encuentra junto al municipio de Muskiz, (España) y es la última playa de Euskadi en su límite oeste. [Figura 2]

Se trata de una playa semiurbana de arena oscura de unos 960 metros de longitud y una anchura que va de los 350 metros en bajamar a los 90 en pleamar. Queda delimitada al oeste por la Punta del Castillo y por la Punta de Lastra al este.[8]

El río Barbadun tiene su desembocadura en el extremo oeste de la playa, lo que, además de caracterizar su morfodinámica, la hace una playa rica en biodiversidad y un hábitat dinámico incluido en el espacio natural protegido Ría del Barbadun, designado Zona de Especial Conservación. [Figura 3]



Figura 2. Localización de la playa de Muskiz. (Fuente: Instituto cartográfico del País Vasco, 2018)



Figura 3. Fotografía aérea de la playa de Muskiz en bajamar. (Fuente: Gobierno Vasco. GeoEuskadi, 2018)

El perfil transversal de la playa se caracteriza, de mayor cota a menor, por una formación de dunas protegidas de la marea, un *foreshore* (zona entre mareas) de pendiente moderada y una terraza compuesta por la acumulación de sedimentos del río que forman pequeñas islas planas visibles solo en bajamar y, por último, un pronunciado escarpe en la zona de surf. La morfodinámica de la playa en cuestión es característica de las playas tipo intermedia con terraza en marea baja, según la clasificación de Wright y Short (1984). [Figura 4]

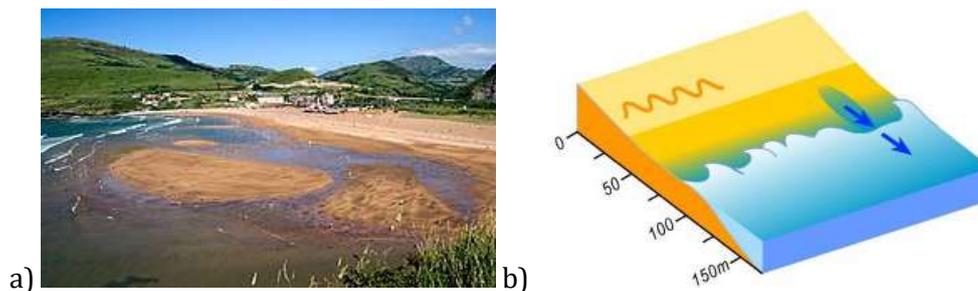


Figura 4. a) Fotografía de la playa de Muskiz desde la Punta del Castillo. Dónde se observan las islas planas en bajamar. (Fuente: Fotografía subida a <http://flickr.com/photos/kurtxio/2647568556/> Flickr) b) Representación del estado morfodinámico de playa intermedia con terraza en marea baja. (Fuente: <https://www.niwa.co.nz/coasts-and-oceans/nz-coast/learn-about-coastal-environments/beach-types/13-beach-types>)

El estudio granulométrico de la playa de La Arena [13] muestra que el contenido del suelo de la playa es prácticamente en su totalidad arena, aunque también se encuentran limos procedentes de la ría. La distribución de tamaños medios de granos es de $D_{15}=0.21\text{mm}$, $D_{50}=0.3\text{mm}$ y $D_{90}=0.51\text{mm}$ y el coeficiente de uniformidad ($C_u=d_{60}/d_{10}$) de 2.1, suelo uniforme.

La playa de Muskiz pertenece al litoral del Mar Cantábrico, un mar con gran capacidad erosiva. En la costa vasca, por su localización y orientación, impactan fuertes y frecuentes temporales del noroeste producidos por la combinación del anticiclón de las Azores y las bajas presiones en el mar del Norte y las islas británicas. [Figura 5]

El oleaje predominante es el mar de fondo del NO, siendo este el estado habitual del mar. En cuanto a las mareas, son de tipo semidiurno, presentando 2 bajamares y 2 pleamares cada día y de rango micromareal, de aproximadamente 1,65m en mareas muertas y 4m en mareas vivas (REDMAR, 2005). A pesar de la incidencia de las mareas en las corrientes, las más significativas se generan gracias a los fuertes vientos, a excepción de las zonas de desembocadura de estuario, como es el caso, dónde predominan las corrientes inducidas por la marea.

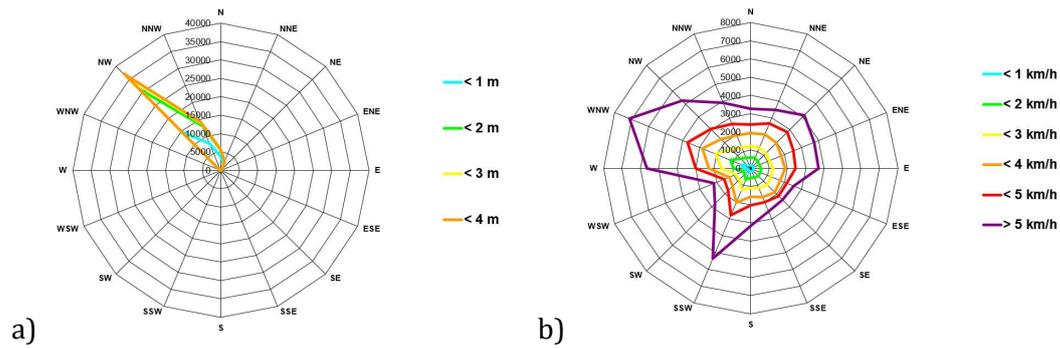


Figura 5. Caracterización del oleaje (a) y del viento (b) desde el 01/01/2009 hasta el 01/01/2015 en la costa bilbaína. (Fuente: propia.)

3. DATOS DISPONIBLES

3.1. DATOS TOPOGRÁFICOS

La topografía en la que se basa el estudio es el resultado de la combinación de dos campañas distintas: una del lecho marino y otra de la zona seca.

Los datos batimétricos utilizados son los extraídos por AZTI-Tecnalia en su levantamiento de la plataforma continental vasca para la elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos y que fechan de septiembre del 2013 y agosto de 2014. [9] Han sido realizados mediante sonda multihaz, una técnica acústica de alta precisión que se basa en la emisión de un pulso acústico y la recepción del eco proveniente del lecho marino. El equipo empleado es el modelo RESON-SeaBat 7125, que posee una frecuencia de operación de 400kHz y una resolución en profundidad de 6 mm. El levantamiento batimétrico de la parte sumergida del arenal se ha realizado mediante medición GPS (firma TRIMBLE, modelo R6) utilizando la técnica denominada RTK (Real Time Kinematic). El sistema de referencia utilizado en las mediciones ha sido UTM-ETRS89 para la planimetría y el CERO DEL PUERTO DE BILBAO para la altimetría.

En cuanto a la altimetría de la zona seca o emergida (en bajamar), se obtuvo mediante una Estación Total Trimble 5503 DR200 totalmente calibrada, con una precisión angular de 3" y precisión en distancia de 2mm ± 2 ppm.

3.2. DATOS CLIMATOLÓGICOS

3.2.1. OLEAJE Y VIENTO

Los valores de oleaje y viento en los que se basa el estudio provienen del conjunto de datos SIMAR de Puertos del Estado, dependiente del Ministerio de Fomento del Gobierno de España. Son valores simulados formados por series temporales de parámetros de oleaje y viento. Los datos de viento se obtienen mediante el modelo RCA3.5 con una resolución en la malla de 12' de latitud por 12' de longitud (aproximadamente 20 Km por 20 Km). Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WAM con una malla de espaciamiento variable con una resolución de 15' latitud x 15' longitud. La resolución espacial es variable y los datos tienen una cadencia de 1 horas y representan valores medios horarios. Los datos de viento se encuentran reducidos a 10 m de altura. Para más información se remite al lector al documento descriptivo de la página web de Puertos del Estado (http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT_8.pdf).

El punto de obtención de los datos tiene latitud 43.375, longitud -3.125 y profundidad indefinida (código SIMAR: 3153033). Aunque las recomendaciones de Puertos del Estado especifican que los datos de oleaje proporcionan condiciones en aguas abiertas y profundidades indefinidas, se considera que están suficiente cercanos a la costa por lo que no es necesario propagar el oleaje con SWAN.

3.2.2. NIVEL DEL MAR

El nivel del mar proviene de las series históricas de La Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), concretamente del Mareógrafo de Bilbao 3 (código:3114) ubicado en latitud 43.356 y longitud -3.04. Los valores del nivel del mar contienen información sobre la marea astronómica y sobre el residuo meteorológico (debido a la variación de presión y el arrastre del viento) correspondiente al cálculo del análisis armónico. La instalación es permanente y obtiene datos cada minuto, aunque las series históricas contienen un valor por cada 5 minutos.

4. METODOLOGÍA

Para comparar la respuesta de la playa frente a eventos aislados (*isolated events*) y secuencias de eventos (*clusters*) extremos se simulan, mediante un modelo bidimensional y de dos maneras distintas, los efectos de los temporales del invierno del 2013-2014 en la erosión/acreción de la playa de Muskiz.

Por un lado, partiendo de la batimetría inicial medida se han simulado las tormentas por separado y se ha analizado el efecto de estas individualmente, asumiendo que el resultado de todas las tormentas en conjunto es igual a la suma de todas ellas por separado.

Por el otro lado, se han simulado las mismas tormentas, pero partiendo de la batimetría resultante de la tormenta anterior, de esta forma se acumula el efecto de las tormentas hasta la última, que refleja el resultado del conjunto de tormentas sin dar tiempo a la recuperación de la playa entre temporales.

De estas simulaciones se extraen los datos de batimetría final tras cada evento, así como otros datos derivados como son el volumen de erosión/acreción y la energía disipada.

4.1. MODELOS

Para el desarrollo computacional de las simulaciones se ha utilizado el modelo XBeach (eXtreme Beach behavior, Kingsday version, Deltares, Delft, The Netherlands) para evaluar el impacto de temporales (en cuanto a erosión y a inundación).

A partir del espectro de energía del oleaje se puede proceder a la evaluación de los efectos de dicho oleaje en su incidencia en la costa con el modelo XBeach. Se trata de un modelo numérico 2D que evalúa la respuesta natural de la costa bajo condiciones de tormentas extremas o huracanes. Simula la propagación del oleaje, corrientes, transporte de sedimentos y cambios en la batimetría y estima los cambios morfológicos en la costa. [20]

La formulación del modelo para procesos de propagación de oleaje se basa en una versión de la ecuación de equilibrio de acción de la ola [Ecuación 1] y permite la reproducción de olas de infragravedad, que son olas de periodos altos, de entre 25s y 250s, y que al llegar a la costa dominan el movimiento de aguas y sedimentos. [20]

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

[Ecuación 1]

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}$$

[Ecuación 2]

Para la resolución de la ecuación de equilibrio de acción de la ola se tiene en cuenta la distribución direccional de la densidad de acción de olas cortas (A) [Ecuación 2] en escala de grupos de olas, representando el dominio de frecuencias con una frecuencia pico representativa, siendo θ , el ángulo de incidencia con respecto al eje x ; S_w , la densidad de energía del oleaje en cada sector direccional; s , la frecuencia intrínseca de la ola obtenida de la relación lineal de dispersión; D_w , la disipación de la energía debido a la rotura del oleaje; (c_x, c_y) , las velocidades de propagación de la acción del oleaje en los componentes x e y , y (c_θ) es la velocidad de propagación de la energía de la ola en el espacio, teniendo en cuenta la refracción por efecto del fondo y las corrientes.

Para estimar la elevación de la superficie y el flujo del agua en aguas someras se utiliza la formulación de la media Lagrangiana generalizada (GLM) de Andrews y McIntyre (1978) [Ecuación 3], que incluye el oleaje infragravitatorio y corrientes inducidas por oleaje no estacionario.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) \\ = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) \\ = + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \end{aligned}$$

[Ecuación 3]

La formulación de la Generalized Lagrangian Mean define las ecuaciones de equilibrio de momentos y continuidad en términos de velocidad Lagrangiana (u^L), que se define como la distancia que recorre una partícula de agua en un periodo de onda, dividido entre dicho periodo. El resto de componentes son los esfuerzos de corte en el fondo (τ_{bx}, τ_{by}), el nivel del mar (η), los esfuerzos inducidos por el oleaje (F_x, F_y), la viscosidad horizontal (ν_h) y el efecto Coriolis (f).

Por otro lado, para la determinación del transporte de sedimentos la formulación utilizada es la ecuación de advección-difusión de Galapatti y Vreugdenhil (1985) [Ecuación 4] junto con la formulación de concentración de equilibrio de, o bien Van Rijn (2007), o bien Soulsby (1997).

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC u^E}{\partial x} + \frac{\partial hC v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}$$

[Ecuación 4]

La ecuación de advección-difusión parte del campo de velocidades Eulerianas (u^E y v^E), la concentración de sedimento promediada con el fondo (C) que varía en la escala de tiempo del grupo de ondas, la concentración de equilibrio (C_{eq} , que vendrá dado por la formulación elegida: Van Rijn o Soulsby), la batimetría (h), el coeficiente de difusión de sedimentos (D_h) y una adaptación del tiempo (T_s) para representar el arrastre de sedimentos.

Para una descripción más detallada de la configuración y funcionamiento del modelo XBeach y las posibles formulaciones utilizadas, se remite al lector al artículo de Roelvink (2009) [20] y al manual oficial de XBeach [19].

4.2. SET UP DEL MODELO

Para implementar el modelo se define una malla curvilínea de tamaño de celda variable en el sentido transversal y longitudinal a la línea de costa. La malla mide en el sentido transversal 2,51km, con las celdas variando desde los 22m en la zona más profunda (cota -20m) a 1,2m en la zona de entre mareas. Por otro lado, en el sentido longitudinal mide 3,46km con tamaños de celda que van desde los 28m en los laterales a los 4,5m en la zona central.

La matriz se obtuvo mediante el módulo Delft3D-RGFGRID, imponiendo un máximo de 22 cambios de tamaño de celda consecutivos de aproximadamente el 5-10% para conseguir una malla suavizada sin perder la ortogonalidad. La matriz resultante es de 437 nodos en el sentido longitudinal y 718 en el transversal. [Figura 6]

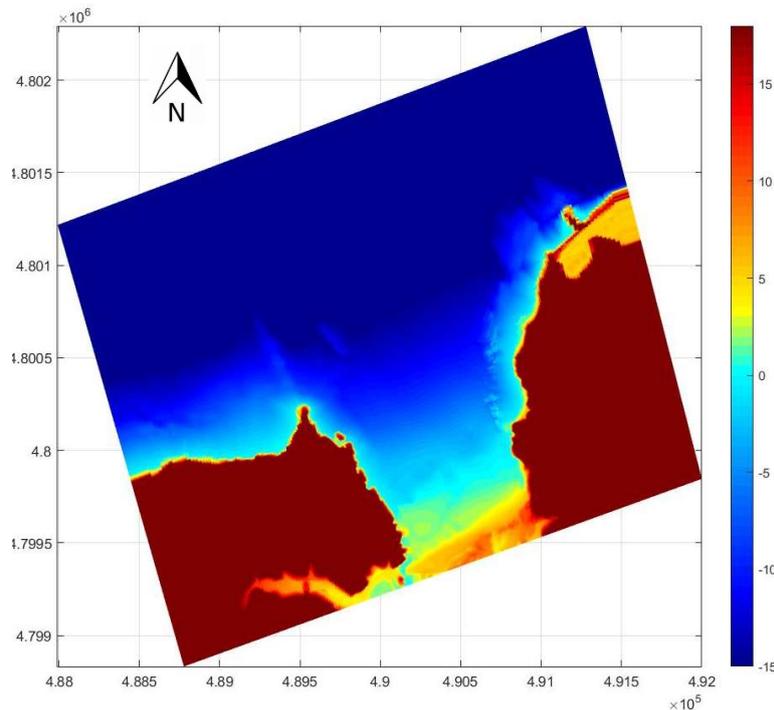


Figura 6. Malla anidada curvilínea utilizada para el modelo XBeach.

Las condiciones de contorno del modelo consisten en la caracterización del espectro de energía del oleaje en el punto de obtención de los datos (latitud 43.375, longitud -3.125) en intervalos de una hora. El espectro de energía se ha definido con los parámetros de altura significativa de oleaje, periodo de pico y dirección del oleaje. Los valores del nivel del mar se introducen directamente al sistema en intervalos de una hora y en metros. El tamaño de grano se define con un D_{50} de 0,3mm y un D_{90} de 0,51mm. Los procesos computacionales de XBeach se realizan con una resolución de 1 segundo.

4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

XBeach permite calibrar el modelo mediante numerosos parámetros para hacerlo más adecuado a la zona de estudio, por lo que podemos definir los parámetros que simulen mejor los efectos de la tormenta.

4.3.1. SELECCIÓN DE PARAMETROS PARA LA CALIBRACIÓN

Como estudiar todo el espectro de combinaciones de parámetros es inviable, se consideran inicialmente los que, analizando la morfología de la playa y según la literatura existente, resultan más significativos en la simulación de la evolución de la playa de Muskiz.

Los parámetros utilizados para la calibración y sus valores se presentan en la Tabla 1. La combinación de ellos resulta en un total de 32 configuraciones a simular en una primera fase (con el parámetro *sedcal* en su valor predeterminado). En la segunda fase se varía el valor del *sedcal* en cada uno de los sets seleccionados como más adecuados para el caso de estudio para ajustar la calibración.

Parámetros	Valor predeterminado	Valores estudiados
wetslp	0,3	0,3 0,4
turb	wave_averaged	none wave_averaged
form	vanthiel_vanrijn	soulsby_vanrijn vanthiel_vanrijn
facua	0,1	0,1 0,4
break	roelvink2	roelvink1 roelvink2
sedcal	1	0,1 0,2 0,5

Tabla 1. Parámetros utilizados y sus valores para la calibración del modelo XBeach. (Fuente: propia)

El parámetro *wetslp* define la pendiente crítica sumergida a partir de la cual se produce avalancha del material erosionado y que se puede deducir de las propiedades del suelo. Teniendo en cuenta que la distribución de tamaños medios de granos en la playa de La Arena muestra $D_{50}=0,3\text{mm}$ se seleccionan para el estudio $wetslp=0,4$ además del predeterminado $wetslp=0,3$. [3][4]

Activando el parámetro *turb* se indica al modelo que tenga en cuenta la influencia de la turbulencia de ondas pequeñas y afecta al modo de computar el equilibrio de concentración de sedimentos. [24] Aunque por defecto no está activado, la literatura existente recomienda evaluar la respuesta teniendo en cuenta la turbulencia de ondas pequeñas. [2]

Al definir el parámetro *form* se especifica qué formulación utilizar para el cálculo del coeficiente de equilibrio utilizado en la ecuación de advección-difusión [Ecuación 4]. Tanto la formulación de Van Rijn–Reniers–Van Thiel (2010) como la de Soulsby-van Rijn (1997) están ampliamente aceptadas, por lo que conviene estudiar ambas configuraciones. [24]

Facua es un parámetro que define la contribución de las olas asimétricas y oblicuas a la velocidad de advección en el transporte de sedimentos. Basándonos en las pendientes medias del perfil de la playa y según las recomendaciones de Oumeracy et al. (2015) se estudian los valores 0,1 y 0,4 para el parámetro *facua*. [5]

En cuanto al parámetro *break*, define si bien usar una de las formulaciones de Roelvink (1993) o la de Baldock et al. (1998) para el computo de la disipación de la energía del oleaje debido a la rotura. Dado que se supone que la rotura de ola será influyente en la playa de Muskiz, se estudian las dos formulaciones de Roelvink (las enfocadas al oleaje estacionario).

Finalmente, el *sedcal* es el factor de equilibrio de concentración de sedimentos para cada clase de sedimentos. En la primera fase de calibración no se aplica el factor, sino que es en la segunda fase, habiendo determinado el set de parámetros que mejor representan el comportamiento de la playa, cuándo se usa para escalar el volumen de transporte de sedimentos para ajustarlo aún más a la realidad.

4.3.1. EVENTO CONSIDERADO PARA EL MODELO DE CALIBRACIÓN

De entre todos los temporales registrados se ha seleccionado el periodo de 50 horas que abarca desde las 22:00h del 02 de marzo de 2014 hasta las 23:00h del 04 de marzo de 2014, representado en la Figura 7. Se ha escogido este temporal para el modelo de calibración por: su gran intensidad; su pertenencia al invierno del 2013-2014, uno de los inviernos más energéticos registrados en los últimos años en la costa atlántica europea [17] y foco del estudio; y por la disponibilidad de datos batimétricos *pre* y *post* tormenta.

Durante la tormenta se registraron olas predominantemente del WNW, de una altura media de $H_{s_{media}} = 4,3m$ y máxima de $H_{s_{máx.}} = 6,49m$, con un periodo de pico máximo de 18,14s.

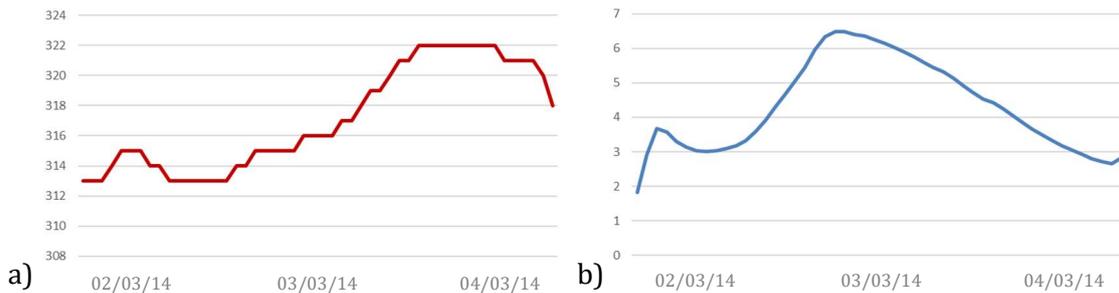


Figura 7. Representación de (a) dirección (grados) y (b) altura significativa (m) del temporal utilizado para la calibración.

4.3.2. DATOS DE BATIMETRÍA UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN

Los datos de batimetría previa y posterior a la tormenta para la calibración fechan de septiembre del 2013 y de agosto de 2014 respectivamente. Son los descritos en el apartado 3.1. de este trabajo.

4.3.3. ENFOQUE DE LA CALIBRACIÓN

Con el *set up* definido en el punto 4.2. se ha simulado mediante el modelo XBeach el evento considerado para la calibración, con las 32 configuraciones distintas de parámetros. Como resultado obtenemos una batimetría simulada post-tormenta para cada combinación de parámetros. Analizando los patrones erosión/acreción mediante perfiles transversales y planos topográficos se realiza una primera preselección de los valores de parámetros más adecuados y a continuación se varía la variable *sedcal* para ajustar la cantidad de volumen de material transportado.

4.4. SIMULACIÓN DE CONDICIONES SELECCIONADAS

Una vez calibrado el modelo para la zona de estudio, se puede proceder a la simulación de condiciones seleccionadas para el propósito del estudio: evaluar el efecto de la secuencia de las tormentas en la respuesta de una playa.

4.4.1. CONDICIONES SELECCIONADAS

Del invierno del 2013-2014 se han seleccionado todos aquellos temporales que sobrepasaron los 3 metros de altura, por ser estos los que más afectarán a la morfodinámica de la playa y además por la incapacidad del modelo XBeach de simular adecuadamente el impacto del oleaje de poca magnitud.

Se han agrupado en 5 conjuntos los temporales a lo largo de dicho invierno (desde finales de octubre 2013 hasta finales de marzo 2014) [Figura 8] y tras descartar las horas en las que el registro era menor a 3 metros, suman un total de 382 horas.

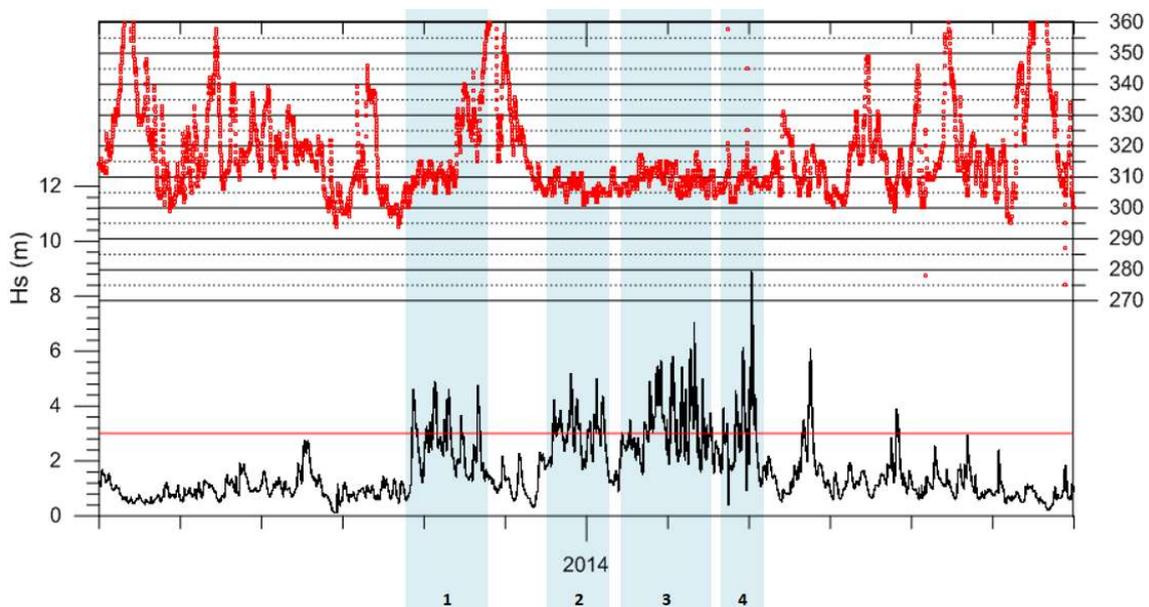


Figura 8. Representación del oleaje incidente en la costa bilbaína el invierno del 2013 al 2014 y de los 5 conjuntos de temporales seleccionados.

Se observan alturas significativas máximas que llegan a los 6,49m y periodos de pico medios que no disminuyen de los 12s [Tabla 3]. La orientación de los temporales es la típica del mar Cantábrico, de oesnoroeste a norte, siendo nornoroeste la dirección del oleaje más predominante. [Figura 5]

Temporal	Fechas	Duración	Hs media (m)	Hs máx. (m)	Tp medio (s)
1	22h 27/10/2013 - 3h 22/11/2013	107h	3,43	4,34	12,58
2	21h 19/12/2013 - 22h 04/01/2014	39h	3,45	3,90	14,65
3	16h 24/01/2014 - 17h 13/02/2014	201h	3,85	5,63	15,32
4	5h 21/02/2014 - 6h 05/03/2014	85h	4,20	6,49	14,89

Tabla 2. Caracterización de los temporales seleccionados para el estudio de eventos aislados VS clusters.

4.4.2. ENFOQUE DEL PROCESO COMPUTACIONAL

Por motivos de optimización del proceso, se han dividido las tormentas demasiado largas, por lo que la secuencia de temporales queda compuesta por 7 simulaciones.

El proceso se divide en dos fases: la primera, en la que partiendo de la misma batimetría inicial de septiembre de 2013 se computan las 7 simulaciones de los 4 temporales mencionados; y la segunda, dónde para el primer temporal de la secuencia se utiliza la batimetría inicial mencionada, pero para las siguientes se utiliza la batimetría resultante de la simulación de la tormenta anterior.

Utilizando el modelo XBeach se obtienen los datos de batimetría tras cada tormenta, así como valores de la evolución del nivel del mar, volumen de erosión o acreción y de disipación de energía.

4.5. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la calibración de los parámetros se compara la batimetría post tormenta simulada y la medida en el terreno. Dado que los datos batimétricos disponibles fechan de septiembre de 2013 y de agosto de 2014 y la tormenta abarca desde el 02/03/2014 hasta el 04/03/2014, realizar un análisis numérico de la batimetría final simulada y real no tiene sentido, pues solo se podrán parecer en sentido cualitativo y no cuantitativo.

Por eso se han descartado los análisis de precisión utilizados normalmente en estos casos (CVC, Brier Skill Score y RMSE) a favor de un análisis de los patrones de erosión/acreción y de la distribución del material.

Para ello se ha grafiado la batimetría final para estudiar los patrones de movimiento de sedimentos y compararlos con la realidad. Se han observado los perfiles de la playa y el plano de erosión de cada una de las 32 simulaciones, analizando las zonas de acreción y erosión y comparándolas con los datos medidos.

Tras la elección de los valores de los parámetros que hacen que los patrones de movimiento de sedimentos se asimilen más a los de la realidad se estudia el efecto del factor *sedcal* para ajustar los resultados numéricos lo máximo a la realidad.

En cuanto a los resultados de la simulación de condiciones seleccionadas, se lleva a cabo un estudio cualitativo y cuantitativo: se estudia la evolución morfológica de la playa tormenta a tormenta y el resultado global, analizando la cantidad de volumen de erosión/acreción y las zonas dónde ocurre. Otro parámetro representativo de los cambios en una playa es la cantidad de energía disipada, por lo que se estudia también la relación entre esta y la morfodinámica de la playa.

Para que el análisis sea más detallado y se puedan extraer conclusiones significativas se divide el área de estudio en tres zonas. Estas son: la zona emergida o *backshore*, aquella por encima del nivel del mar en pleamar en condiciones de calma (cotas superiores a 4m); la zona de entre mareas o *foreshore*, que hace referencia a la parte de la playa que está sumergida en pleamar pero que queda al descubierto en bajamar (situados entre la línea de cota de 4m y la de 0m); y por último, la *nearshore* o zona sumergida, sin llegar a considerarse aguas profundas (cotas negativas hasta los -10m). Por otro lado, se seleccionan los perfiles P1, P2 y P3 que se muestran en la figura 10 para el análisis de resultados por ser representativos de la playa y estar distribuidos a lo largo de esta.

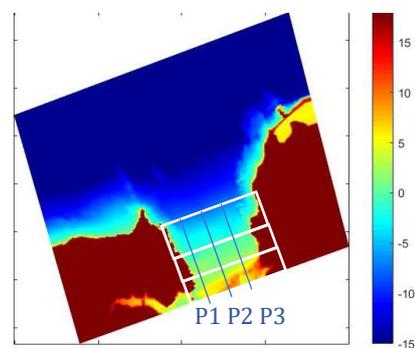


Figura 9. Zonificación del área de estudio y representación de los perfiles para el análisis de resultados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Se observa que las configuraciones de parámetros que mejor simulan el comportamiento real de la playa son aquellas que tienen en cuenta la influencia de la turbulencia de ondas pequeñas (*turb*: wave_averaged) y los que usan la formulación de Roelvink (*break*: roelvink1) para el computo de la disipación de la energía del oleaje debido a la rotura. Los resultados de la batimetría final de estas simulaciones se encuentran resumidos en el Anejo 1.

De entre estas 8, que quedan caracterizadas en la tabla 3, la simulación del set de parámetros 16 es la que más se acerca en el sentido cualitativo a la morfodinámica real de la playa de Muskiz, aunque sobrevalora la capacidad de transporte de sedimentos.

	wetslp	turb	form	facua	break	sedcal
S10	0,3	2	1	0,1	roelvink1	default
S12	0,3	2	1	0,4	roelvink1	default
S14	0,3	2	2	0,1	roelvink1	default
S16	0,3	2	2	0,4	roelvink1	default
S26	0,4	2	1	0,1	roelvink1	default
S28	0,4	2	1	0,4	roelvink1	default
S30	0,4	2	2	0,1	roelvink1	default
S32	0,4	2	2	0,4	roelvink1	default

Tabla 3. Configuraciones de parámetros seleccionadas en la primera fase de la calibración del modelo.

En la Figura 10 se puede observar como la simulación ha representado de manera satisfactoria los principales patrones de erosión identificados, a saber: la erosión en forma de barra triangular en los primeros metros de playa (en un azul más oscuro) en la parte inferior de las figuras, las zonas de acreción distribuidas como islas a lo largo y ancho de la zona de entre mareas de la playa y una ligera acreción en la zona de la salida del río Barbadun.

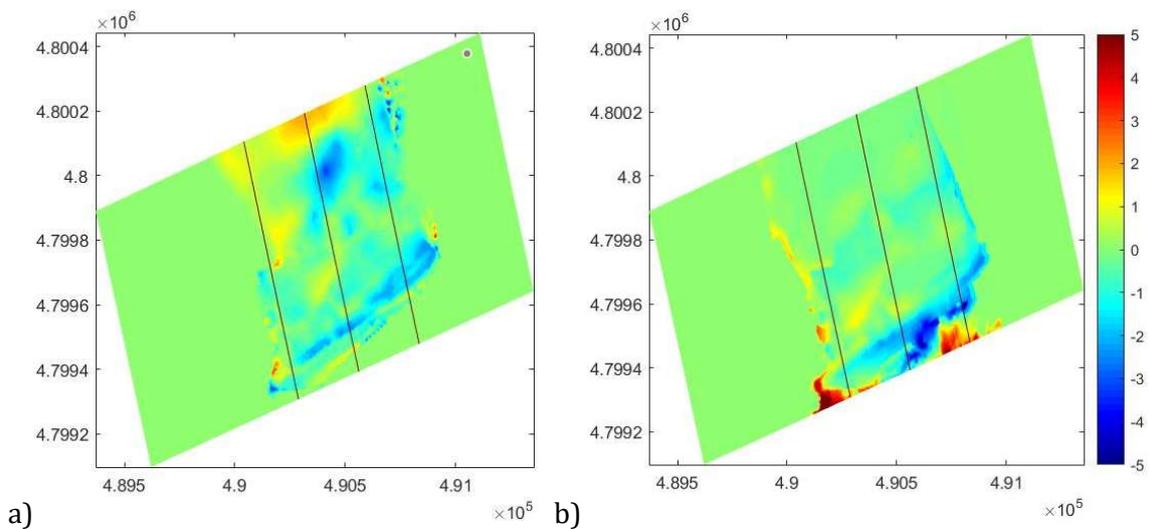


Figura 10. Comparación de la erosión del área de estudio como diferencia de cota final e inicial en cada nodo de la malla utilizada. (a) Representa la diferencia de cota medida mientras que (b) muestra la simulada con el set de parámetros S16.

Los resultados de la simulación muestran zonas de gran acreción en las cotas más altas (parte inferior de la figura 10), que no se observan en los datos medidos. Esto se debe a que los primeros hacen referencia a cotas justo tras el impacto del temporal, mientras que los datos batimétricos finales medidos fueron tomados tras un periodo de recuperación de la playa, durante el cual se suavizan los efectos de acreción del temporal.

En la figura se observa una leve erosión de la zona de entre mareas, que sí se consigue representar con la simulación. Sin embargo, esta erosión va acentuándose en la simulación en las cotas más altas (a partir de la cota ≈4m), a diferencia de la realidad.

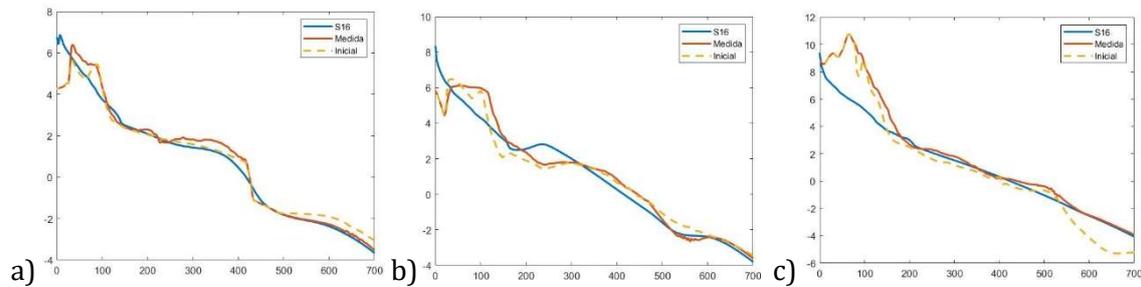


Figura 11. Representación de los perfiles 1, 2 y 3 (a, b y c respectivamente) con los datos iniciales medidos, finales medidos y finales simulados con la configuración de parámetros S16.

Al simular esta configuración de variables aplicando el factor de equilibrio de concentración de sedimentos (*sedcal*) para ajustar el volumen de transporte de material, resulta que un valor de 0,1 para el parámetro es el que representa con mayor precisión la variación de la batimetría. Por lo tanto, el *set up* de los parámetros para la simulación de las condiciones seleccionadas es el S16 con un *sedcal* de 0,1.

5.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES SELECCIONADAS

5.2.1. ISOLATED

Los resultados de las simulaciones de los temporales aislados, con el suficiente periodo de recuperación, se muestran en el Anejo 2. La figura 12 muestra los datos de erosión o acreción producida en cada caso.

En todos los temporales, la zona de entre mareas resulta ser la que más sedimentos recibe por metro cuadrado, seguido de la zona emergida, mientras que la parte de la playa sumergida sufre erosión.

De entre los cuatro temporales analizados, en iguales condiciones iniciales, el tercer temporal es el que más estragos causa en la playa. Le sigue el cuarto temporal que, sin embargo, no tiene grandes efectos en la zona emergida.

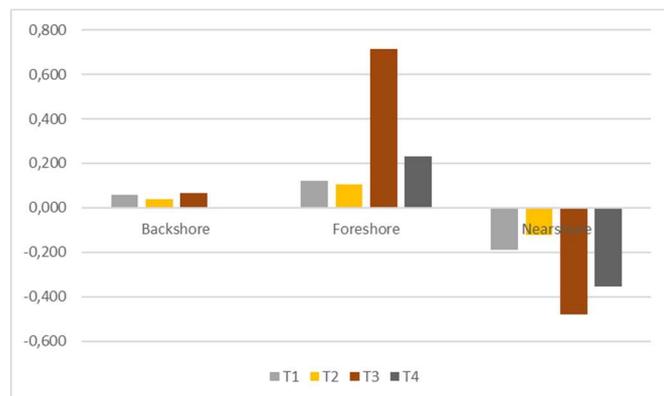


Figura 12. Gráfico de barras del volumen de erosión (m³/m²) en cada zona y durante cada temporal simulado como evento aislado.

En cuanto a la energía disipada por la playa, va decreciendo a medida que avanza por las zonas, de más profundas a menos, ya que el oleaje se va debilitando a medida que se acerca a la orilla. El temporal durante el cual se disipa más energía de media es el cuarto, seguido del primero.

5.2.2. CLUSTER

En el Anejo 3 se encuentran los resultados de la simulación del *cluster* de los temporales seleccionados. Nótese que los resultados del Temporal 1 no se incluyen, ya que, al partir de la misma batimetría inicial, son iguales a los resultados de la simulación del temporal como *isolated*, que se muestran en el Anejo 2.

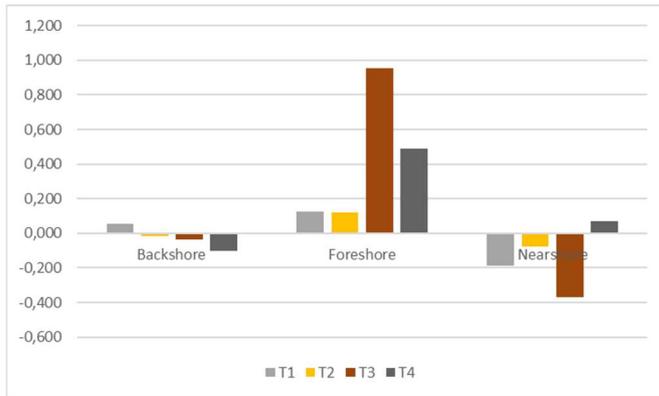


Figura 13. Gráfico de barras del volumen de erosión (m³/m²) en cada zona durante el cluster de temporales.

Los datos extraídos, y representados en la figura 13, muestran que la zona de entre mareas sufre acreción en los cuatro temporales, sin embargo, en la zona emergida y en la sumergida, los patrones de transporte de sedimentos varían según el evento. Las cotas más altas sufren erosión tras la acreción causada por el primer temporal. En cuanto a las sumergidas, los tres primeros temporales rebajan la altura de la zona, pero el cuarto produce acreción.

Se observa que no es posible identificar el evento que más altera la morfología de la playa de Muskiz, ya que depende de la zona analizada. Aun así, se puede decir que el tercer temporal es, con diferencia el que más acreción provoca en la zona de entre mareas y más erosión en la parte sumergida de la playa. En cambio, en la zona seca, es el cuarto temporal el que produce más erosión.

Si estudiamos la energía disipada por la playa en la rotura del oleaje para cada temporal se observa, como anteriormente, que en todos los casos es mayor en la zona sumergida, seguida de la zona entre mareas y por último la emergida. Se advierte que es el segundo temporal el que más disipación de energía causa, seguido del primero y por último, con valores similares, el tercero y cuarto.

5.3. DISCUSIÓN

De los resultados, se extrae, primero de todo, que la playa parte, en un inicio, de una batimetría ciertamente reflectiva. Los perfiles transversales muestran empinados escalones con valles que tras el impacto de cada temporal se suavizan. Esto ocurre en todos los casos, pero se observa con más claridad en el perfil número 1. En la figura 14 se muestra dicho perfil antes y después de impactar el temporal 3 sobre la batimetría inicial recuperada. El gráfico muestra como los dos escalones pierden material del borde, que acaba en el pie del escalón, con lo que se obtiene una pendiente más suave y uniforme a lo largo del perfil transversal de la playa. Además, las zonas de pendiente menos pronunciada se aplanan y se eliminan las pequeñas acumulaciones de sedimentos puntuales que pueda haber en ellas. Por ello se deduce que el perfil de la batimetría inicial es de carácter más reflectivo y que con el impacto de temporales este se vuelve más disipativo, tendiendo al equilibrio. Esta es la tendencia morfodinámica observada en la playa que se sigue en todos los casos, aunque con matices.

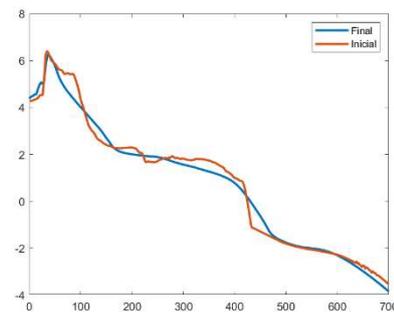


Figura 14. Perfil inicial medido y final simulado tras el impacto de Temporal 3 en la playa recuperada.

Se muestra en la figura 15 el perfil 1 simulado tras los temporales, aplicados como eventos aislados y como secuencias. No se muestra el primer temporal ya que no tiene utilidad para el análisis comparativo, pues los dos resultados son iguales. En el resto de temporales, se observan marcadas diferencias entre los perfiles dependiendo de si el temporal impacta sobre una playa recuperada o no.

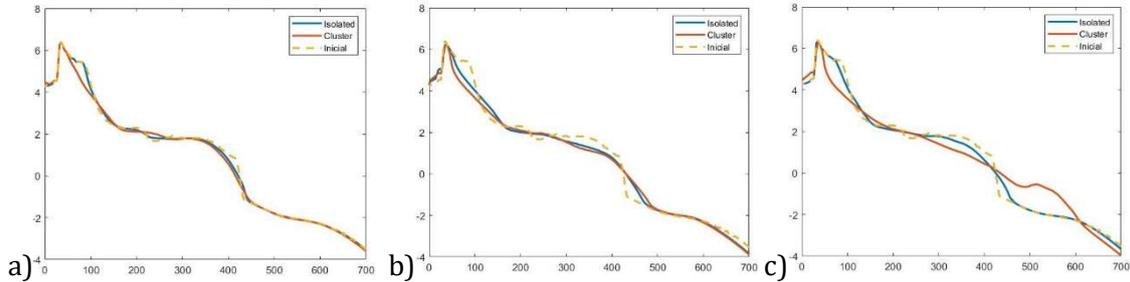


Figura 15. Comparación del perfil 1 resultante tras los temporales a) T2, b) T3 y c) T4.

Cuando se simulan los temporales de forma aislada se observa en todos los casos como el perfil de la playa se modifica de tal forma que se erosiona la zona emergida y la zona entre mareas de forma proporcional al temporal. Sin embargo, esta proporcionalidad parece recaer en la duración del evento y no tanto en la altura del oleaje, de esta forma, el tercer temporal produce más erosión que el cuarto, siendo el cuarto el de mayor altura de oleaje y el tercero el de más duración. Al dar tiempo de recuperación a la playa entre eventos, el resultado acumulado resulta mucho menos drástico que en el caso del *cluster*.

Para el estudio de los efectos del *cluster*, la figura 15 no refleja el efecto individual sino el acumulado, pues la batimetría inicial representada es la correspondiente al inicio del invierno y no de la simulación. Se observa como la tendencia morfodinámica mencionada se extiende en el tiempo y se van acumulando los efectos. Esto deviene en un perfil transversal final de pendiente uniforme y más leve que el inicial. Aun así, el escalón de la duna de la zona emergida gana verticalidad al no ser, los temporales, suficientes para erosionar la cresta de la duna, creando una escalón estrecho y vertical al inicio de la playa.

En la figura 16 se muestra la evolución de la playa frente a la secuencia de temporales y se puede apreciar el efecto individual de cada temporal. A diferencia del caso de los eventos aislados, con los resultados del *cluster* no se puede decir que se aprecie una proporcionalidad estricta entre el temporal y los efectos que causa. Aun siendo cierto que el tercer temporal contribuye más en general a aplanar el perfil (como ocurre cuando se simula de forma aislada), la severidad de sus efectos no se hace patente en todas las zonas de la playa. Si nos fijamos en la erosión producida por el primer temporal en la zona emergida, esta es tanto o más significativa que la producida por el temporal 3 (se observa con claridad en el perfil 1 y 3). De forma similar, el cuarto temporal produce mucha más acreción en la zona sumergida que el temporal 3 (se observa claramente en el perfil 2). De todo esto se extrae que la proporcionalidad observada en la playa recuperada (eventos aislados) no se cumple para los *clusters*, dónde parece prevalecer la influencia del orden en el que llegan los temporales. En otras palabras, al modificarse la batimetría inicial de la playa, esta resulta ser más disipativa o más reflectiva según los estragos de los eventos anteriores, lo que determina la severidad de los efectos de un temporal.

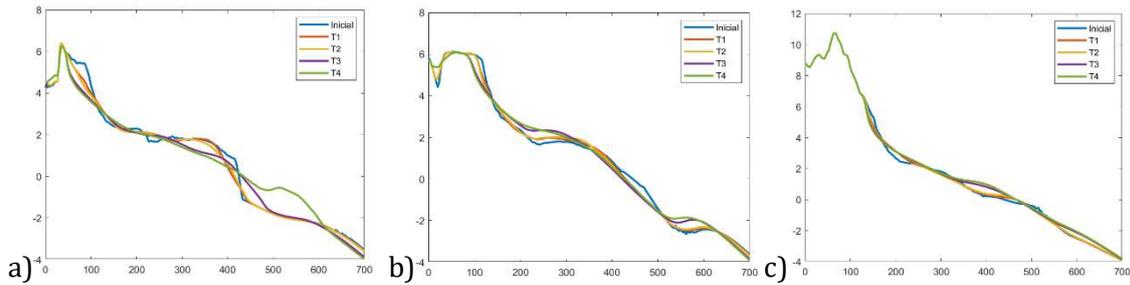


Figura 16. Evolución de los perfiles a) P1, b) P2 y c) P3 frente a la secuencia de temporales.

El estudio de los perfiles transversales ofrece un análisis cualitativo del comportamiento de la playa de La Arena frente a eventos aislado y secuencias. Se analizan ahora más a fondo los aspectos cuantitativos del estudio, a través del volumen de erosión/acreción y de la energía disipada.

El gráfico de barras de la figura 17 representa el volumen de erosión y acreción por metro cuadrado en cada una de las diferentes zonas y para cada uno de los temporales. Se comprueba numéricamente lo mencionado en el análisis cualitativo y es que se retratan las grandes diferencias entre los efectos de un temporal en una playa recuperada y una sin recuperar en cuanto a los patrones de transporte de sedimentos, el volumen de estos y su evolución a lo largo de los distintos temporales.

Esto queda especialmente patente en la zona emergida, donde se puede comprobar como el patrón de transporte de material es completamente distinto: mientras que cuando el temporal afecta a una playa recuperada esta sufre acreción, la secuencia de temporales a partir del segundo temporal pasa de provocar acreción a erosión. No solo eso, sino que además se observa la no-proporcionalidad de los efectos con los temporales, ya que dicha erosión va en aumento secuencial, siendo un temporal más erosivo que el justamente anterior. Aunque se espera que este aumento de la erosión vaya reduciéndose, ya que, como se ha dicho, esto se debe al cambio de la playa de un estado reflejante a disipativo y este proceso culmina en un estado de equilibrio.

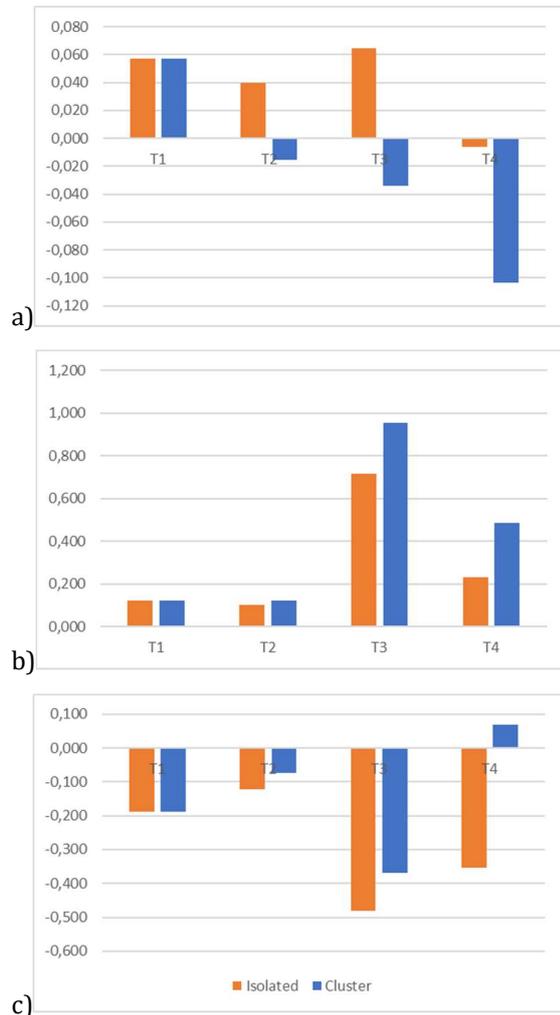


Figura 17. Comparación de la variación de volumen de material en cada una de las zonas a) backshore, b) foreshore y c) nearshore durante los cuatro temporales. En azul los temporales como eventos aislados y en azul el cluster.

En la zona de la playa entre la línea de pleamar y bajamar no existe diferencia en la morfodinámica de la playa en cuanto a patrones de transporte de sedimentos, pero sí la hay en cuanto a magnitud de los efectos. Se observa como el volumen de acreción por metro cuadrado es mayor en el caso de los eventos considerados como *cluster* y que, además, la diferencia porcentual va aumentando temporal a temporal (T2:118,00%, T3:133,53% y T4:209,94%).

Para acabar la discusión de resultados, se estudia la energía disipada por rotura de oleaje a lo largo de la secuencia de temporales. Lo interesante no es ver la cantidad total de energía que se disipa durante el *cluster* sino la distribución proporcional de esta a lo largo de las zonas de la playa [Figura 18].

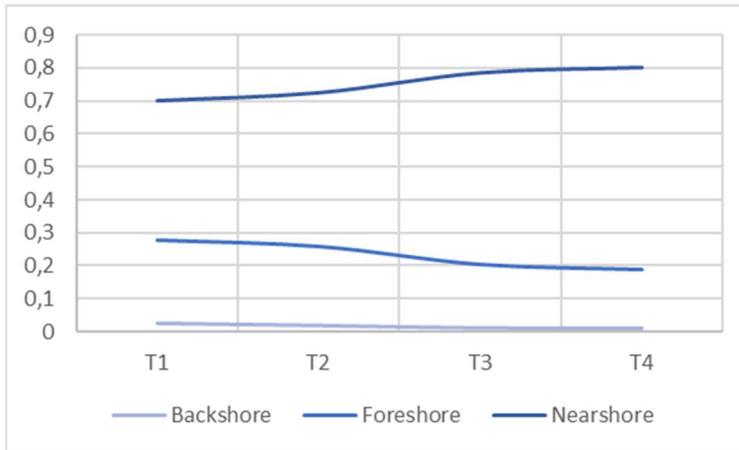


Figura 18. Evolución de la distribución porcentual de la disipación de energía por zonas de la playa a lo largo de la secuencia de temporales.

Lo que se observa es que a medida que la secuencia avanza la energía que se disipa en las cotas más altas (zona emergida y de entre mareas), pasa a hacerlo en las más bajas (zona sumergida). Esto se debe a la evolución del perfil de la playa, que al aplanarse hace que el oleaje rompa antes y pierda energía, acercándose a la orilla con menos energía.

6. CONCLUSIONES

Se han llevado a cabo simulaciones numéricas para estudiar el efecto de la secuencia o *cluster* en la playa de La Arena, Muskiz. Tras configurar y calibrar el modelo se han llevado a cabo simulaciones numéricas 2D de 4 eventos extremos que ocurrieron durante el invierno del 2013/2014. Estas se han procesado de dos formas: por un lado, se han asumido todos los temporales como aislados, existiendo un periodo adecuado de recuperación de la playa entre ellos; y por el otro, estos mismos temporales se han simulado de forma sucesiva sin dar cabida a dicho periodo de recuperación. Las siguientes conclusiones se extraen del estudio:

- El evento más extremo del invierno del 2013/2014 fue el T4 (21/02/2014 - 05/03/2014).
- En la calibración se observó que la turbulencia de ondas pequeñas es uno de los parámetros más influyentes en la morfodinámica de la playa.
- El modelo reproduce los patrones de erosión de la zona emergida, así como los de acreción en forma de islas en la zona de entre mareas y de la desembocadura del río Barbadun.

- La batimetría inicial utilizada en el estudio es característica de un estado de la playa ciertamente reflejante y que con la incidencia de los temporales evoluciona en sentido disipativo, suavizando y uniformizando el perfil de la playa.
- Se observan marcadas diferencias entre los resultados dependiendo de si el temporal impacta sobre una playa recuperada o no.
- El efecto del *cluster* provoca que los patrones de transporte de sedimentos se extiendan a lo largo de la secuencia, por lo que los efectos globales son mayores que en el caso de una serie de eventos aislados.
- Existe cierta proporcionalidad entre los efectos de un temporal en una playa recuperada y la magnitud de este, sin embargo, esta proporcionalidad parece recaer en la duración del evento y no tanto en la altura del oleaje.
- Con los resultados del *cluster* no se puede decir que se aprecie una proporcionalidad estricta entre el temporal y los efectos que causa, sino que parece prevalecer la influencia del orden de llegada del temporal.
- El dimensionamiento de infraestructuras costeras o estrategias de gestión del litoral no deberían tener solo en cuenta eventos de cierto periodo de retorno sino también las secuencias de eventos de menor periodo de retorno.
- En una secuencia de temporales, la energía que se disipa en la zona emergida y de entre mareas pasa a disiparse antes, en la zona sumergida que ha sufrido acreción.

Estas conclusiones y el resto de resultados extraídos en el trabajo aportan información relevante sobre el comportamiento de la playa de Muskiz frente a secuencias de temporales. Este conocimiento ayudará a una mejor comprensión de la evolución morfológica de la playa y será de utilidad en el caso de plantearse estrategias de gestión del litoral de Muskiz, así como en otras zonas de características generales dónde se pueda extrapolar lo extraído.

Sin embargo, este estudio no ha podido abarcar factores que podrían ser relevantes. Por eso se propone como posible vía de continuación un análisis de la influencia del nivel del mar en el momento álgido el temporal y un estudio de cómo llevar a la práctica el dimensionamiento no solo en base al periodo de retorno de un evento extremo sino también en base a la posibilidad de secuencias de eventos menores.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Burke, L., et al. (2001): *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Coastal Ecosystems*. World Resources Institute. Washington D.C. 77 pp

[2] Dissanayake, P., Brown, J., Wisse, P. y Karunarathna, K., 2015. *Comparison of storm cluster vs isolated event impacts on beach/dune morphodynamics*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 164, pág. 301-312, Elsevier, ISSN 0272-7714.

[3] Dissanayake, P., Brown, J., Wisse, P. y Karunarathna, K., 2015. *Effects of storm clustering on beach/dune evolution*, Marine Geology, Vol. 370, pág. 63-75, Elsevier, ISSN 0025-3227.

[4] Dissanayake, P., Brown, J., Wisse, P. y Karunarathna, K., 2014. *Modelling storm-induced beach/dune evolution: Sefton coast, Liverpool Bay, UK*, Marine Geology, Volume 357, pág. 225-242, ISSN 0025-3227.

[5] Elsayed, S. y Oumeraci, H., 2017. *Breaching of Coastal Barriers under Extreme Storm Surges and Implications for Groundwater Contamination: Improvement and Extension of the XBeach Model to Account for New Physical Processes*.

[6] Ferreira, O., 2005. *Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences*. J. Coast. Res. 42, 221e227. Special Issue. Gresswell, R.K., 1953. *Sandy Shores in South Lancashire*. Liverpool University Press, Liverpool.

[7] Galvin, C.J., 1968. *Breaker type classification on three laboratory beaches*. Journal of Geophysical Research, 73: 3651-3659.

[8] Gobierno de España, 2018. *Guía de Playas del Ministerio para la Transición Ecológica*. Gobierno de España, 2018.

[9] Galparsoro, I., Rodríguez, G., Borja, Á. y Muxika I., 2009. *Elaboración de mapas de hábitats y caracterización de fondos marinos de la plataforma continental vasca*. Informe inédito elaborado por AZTI-Tecnalia para el Dirección de Biodiversidad; Viceconsejería de Medio Ambiente; Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco, 74 pp.

[10] Guillén J., *GEOLOGÍA DE LA ZONA LITORAL*. Departament de ciències del mar. CSIC.

[11] Guisado Pintado, E., Málvarez García, G. y Navas Concha, F., 2010. *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 861-872. ISBN: 978-84-472-1294-1

[12] Hernández-Valdés, K. y Córdova-López, F., 2016. *Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe*. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 3. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

[13] Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I. y Sánchez-Arcilla, A., 2018. *Asistencia técnica para el seguimiento ambiental del proyecto de extracción de arenas en el sector norte de la Zona II de la APB (2016-2020) con especial vinculación al proyecto del espigón Central - Estado evolutivo de referencia de las playas en el entorno del Abra de Bilbao*.

[14] Karunarathna, H., Pender, D., Ranasinghe, R., Short, A.D. y Reeve, D.E., 2014. *The effects of storm clustering on beach profile variability*. Marine Geology. 348, 103e112.

[15] Lee, G., Nicholls, R. y Birkemeier W., 1998. *Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991*, Marine Geology, Volume 148, Issues 3-4, Pages 163-177, ISSN 0025-3227, [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00010-3).

[16] Losada I., Vidal C. et al. (2011). *Evaluación del potencial de la energía de las olas*. Estudio Técnico PER 2011-2020.

[17] Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suanez, S., Jackson, D. y Floc'h F., 2016. *Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe*, Geophys. Res. Lett., Vol. 43, pág. 2135-2143, doi:10.1002/2015GL067492.

[18] Masselink G., y Short A., 1993. *The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model*. Journal of Coastal Research, vol. 9, no. 3, pp. 785-800. JSTOR, www.jstor.org/stable/4298129.

[19] Roelvink, J.A., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel De Vries, J., Lescinski, J. y McCall, R., 2010. *XBeach Model Description and Manual*. Deltares, Delft, The Netherlands.

[20] Roelvink, J.A., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel De Vries, J., Lescinski, J., 2009. *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*, Coastal Engineering, Vol. 56, Issues 11-12, pág. 1133-1152, Elsevier, ISSN 0378-3839.

[21] Sanuy, M. y Jiménez, J.A., 2019. *Sensitivity of Storm-Induced Hazards in a Highly Curvilinear Coastline to Changing Storm Directions. The Tordera Delta Case (NW Mediterranean)*. Water, 11, 747.

[22] Splinter, K.D., Carley, J.T., Golshani, A. y Tomlinson, R., 2014. *A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion*, Coastal Engineering, Vol. 83, pág. 49-55, Elsevier, ISSN 0378-3839.

[23] Vousedoukas, M.I., Almeida, L.P. y Ferreira, O., 2012. *Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach*. Earth Surf. Process. Landf. 37, 583e593.

[24] Vousedoukas, M.I., Ferreira, Ó., Almeida, L.P. et al., 2012 *Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system*, Ocean Dynamics, Volumen 62, pág.1001-1015,ISSN 1616-7341, doi=10.1007/s10236-012-0544-6.