

Validación de modelos de evolución de la línea de costa en playas del litoral valenciano, España

Trabajo realizado por:

Estefanía Girado Franco

Dirigido:

Mauricio González Rodríguez Camilo Jaramillo Cardona

Titulación:

Máster Universitario en Costas y Puertos

Santander, septiembre de 2024

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis asesores Mauricio González Rodríguez y Camilo Jaramillo Cardona, por su invaluable acompañamiento, orientación y disposición constante durante la elaboración de mi TFM. Ha sido una verdadera fortuna trabajar con profesionales de tan alto rigor académico y, aún más, con personas que destacan por su excepcional calidad humana.

Agradezco al Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHCantabria), al Grupo de Cartografía Geoambiental y de Teledetección (CGAT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), al Sistema de Observación y Predicción Costera de las Islas Baleares, y al 5º Programa de Observación de la Tierra (EOEP-5) de la Agencia Espacial Europea, por proporcionar generosamente los conjuntos de datos utilizados en esta investigación.

Asimismo, deseo manifestar mi profundo agradecimiento a la Fundación Carolina por concederme la beca BICENTENARIO para la realización del Máster Universitario en Costas y Puertos en la Universidad de Cantabria durante la convocatoria 2023-2024. He tenido la oportunidad de liberarme, aunque sea en parte, de las restricciones del conocimiento previo y de explorar, aunque sea de manera parcial, el vasto océano de posibilidades que se extiende ante mí.

Finalmente, agradezco a mis padres, cuya presencia trasciende la distancia y se convierte en el hilo invisible que sostiene mi espíritu. Su amor y apoyo incondicional han sido el eco constante que me acompaña, recordándome que, aunque separados por la distancia, siempre estamos juntos.

RESUMEN

Este estudio se centró en la evaluación del desempeño de los Modelos de Evolución de la Línea de Costa Basados en el Equilibrio, conocidos en inglés Equilibrium-Based Shoreline Evolution Models (EBSEMs), como específicamente el modelo YA09, que simula la traslación de la línea de costa (movimiento cross-shore), y el modelo JA21, que modela la rotación de la línea de costa (movimiento longshore). La evaluación se realizó en tres playas: Levante y Poniente en Benidorm, y la Playa de Moncofa en Castellón. El objetivo principal fue analizar las limitaciones de estos modelos y mejorar su aplicabilidad en la gestión costera. Para ello, se llevó a cabo una comparación exhaustiva entre los resultados modelados y series temporales extensas de línea de costa derivadas de imágenes satelitales, con el fin de evaluar cómo cada modelo responde a la dinámica de la línea de costa y las interacciones con el oleaje. Se abordaron tres objetivos específicos: encontrar el ajuste óptimo de los modelos, analizar las incertidumbres asociadas, y discutir las limitaciones de los modelos e identificar enfoques de modelado para mejorar su aplicabilidad futura.

El estudio siguió una metodología estructurada que incluyó la recopilación y procesamiento de los datos de entrada, la aplicación de los modelos, y la evaluación de su rendimiento mediante diversas métricas estadísticas como el RMSE, MSS y NS, entre otras. En primer lugar, se obtuvieron datos del oleaje a partir del modelo *Global Ocean Waves (GOW)*, así como series temporales de la posición de la línea de costa derivadas de imágenes satelitales Landsat y Sentinel para cada una de las playas estudiadas. Estos datos fueron procesados para extraer la posición media y la orientación de la línea de costa, que sirvieron como variables de entrada para los modelos se realizó utilizando la herramienta *Shoreline Evolution Tools (IH-SET)*, una interfaz especializada que permite configurar los parámetros de entrada de manera flexible, ajustando los modelos para encontrar la mejor concordancia con las observaciones reales.

Como parte del análisis y discusión, se llevaron a cabo diversos ajustes para evaluar el rendimiento de los modelos bajo distintas condiciones. Se eliminaron los periodos que contenían variaciones no naturales y se aplicaron medias móviles semestrales y anuales para suavizar las fluctuaciones en los datos. Además, se evaluó el desempeño de los modelos durante los periodos en los que la resolución de los datos satelitales era más alta, con el fin de obtener predicciones más precisas y representativas de la dinámica costera observada.

Los resultados revelaron variaciones significativas en el desempeño de los modelos dependiendo de la playa y del tratamiento de los datos utilizados. En la Playa de Levante, el modelo YA09 tendió a sobreestimar la respuesta de la línea de costa, mientras que el modelo JA21 mostró un mejor ajuste, aunque con limitaciones para captar con precisión la dinámica costera. En la Playa de Poniente, el rendimiento del modelo YA09 fue deficiente, especialmente después de la regeneración de arena realizada en 1991, cuando se aportaron 710.847 m³ de arena a lo largo de 1.305 metros. Por su parte, el modelo JA21 logró reflejar razonablemente la rotación de la línea de costa, aunque no logró captar completamente las variaciones ocurridas tras la intervención. En la Playa de Moncofa, el modelo YA09 mostró un rendimiento moderado, mientras que el modelo JA21 presentó una buena correlación entre las predicciones y las observaciones.

Se identificaron varias limitaciones en los modelos. Las intervenciones antropogénicas, como la regeneración de arena, afectaron considerablemente la precisión de las simulaciones. Asimismo, la variación en la resolución de las imágenes satelitales impactó en la calidad de las predicciones, y la influencia de *la Posidonia oceánica* no fue adecuadamente incorporada, lo que limitó la capacidad de los modelos para reproducir fielmente las condiciones reales. Para futuros estudios, se recomienda la implementación de mecanismos de ajuste dinámico que permitan simular eventos de regeneración de manera más realista y mejorar la integración de factores clave, como la vegetación marina, para aumentar la precisión de las simulaciones.

ABSTRACT

This study focused on evaluating the performance of Equilibrium-Based Shoreline Evolution Models (EBSEMs), specifically the YA09 model, which simulates cross-shore shoreline translation, and the JA21 model, which models longshore shoreline rotation. The evaluation was conducted on three beaches: Levante and Poniente in Benidorm, and Moncofa Beach in Castellón. The main objective was to analyze the limitations of these models and improve their applicability to coastal management. To achieve this, a comprehensive comparison was made between the modelled results and extensive time series of shoreline data derived from satellite images, in order to evaluate how each model responds to shoreline dynamics and interactions with wave conditions. Three specific objectives were addressed: to find the optimal fit of the models, analyze the associated uncertainties, and discuss the limitations of the models, identifying modeling approaches to enhance their future applicability.

The study followed a structured methodology that included the collection and processing of input data, the application of the models, and the evaluation of their performance using various statistical metrics such as RMSE, MSS, and NS, among others. First, wave data were obtained from the Global Ocean Waves (GOW) model, as well as time series of shoreline positions derived from Landsat and Sentinel satellite images for each of the beaches studied. These data were processed to extract the mean position and orientation of the shoreline, which were then used as input variables for the YA09 (cross-shore) and JA21 (longshore) models. The models were implemented using the Shoreline Evolution Tools (IH-SET), a specialized interface that allows flexible configuration of input parameters, adjusting the models to find the best fit with real-world observations.

As part of the analysis and discussion, various adjustments were made to evaluate the models performance under different conditions. Periods with unnatural variations were removed, and moving averages (both semi-annual and annual) were applied to smooth the data. Additionally, the models performance was assessed during periods when the resolution of the satellite data was higher, to obtain more accurate and representative predictions of the observed coastal dynamics. The results revealed significant variations in model performance depending on the beach and the data processing methods used. On Levante Beach, the YA09 model tended to overestimate the shoreline response, while the JA21 model showed a better fit but had limitations in capturing the precise coastal dynamics. On Poniente Beach, the performance of the YA09 model was poor, especially after the sand replenishment project carried out in 1991, during which 710.847 m³ of sand were added along 1.305 meters of shoreline. In contrast, the JA21 model reasonably reflected the shoreline's rotation, although it did not fully capture the variations following the intervention. On Moncofa Beach, the YA09 model showed moderate performance, while the JA21 model presented a good correlation between predictions and observations.

Several limitations were identified in the models. Anthropogenic interventions, such as sand replenishment, significantly affected the accuracy of the simulations. Additionally, variations in the resolution of satellite images impacted the quality of the predictions, and the influence of *Posidonia oceanica* was not adequately incorporated, which limited the models ability to accurately reproduce real-world conditions. For future studies, it is recommended to implement dynamic adjustment mechanisms to simulate replenishment events more realistically and to improve the integration of key factors, such as marine vegetation, to enhance the accuracy of the simulations.

ÍNDICE

AGRAD	ECIMIENTOS	2
RESUM	EN	3
ABSTRA	ACT	5
ÍNDICE	DE FIGURAS	9
LISTAD	O DE SIMBOLOS Y ABREVIACIONES	4
1. INTE	RODUCCIÓN	6
1.1.	Antecedentes	6
1.2.	Planteamiento del problema	7
1.3.	Justificación	7
1.4.	Objetivos	8
1.4.1	1. General	8
1.4.2	2. Específicos	8
2. MET	ODOLOGÍA	20
2.1.	Generalidades2	20
2.2.	Fuente de datos2	21
2.2.1	1. Playas de Poniente y Levante en Benidorm2	21
2.2.2	2. Playa de Moncofa2	21
2.3.	Procesamiento de los datos2	22
2.3.1	1. Variabilidad de la línea de costa2	22
2.3.2	2. Posición media de la línea de costa2	23
2.3.3	3. Orientación media de la línea de costa2	23
2.4.	Implementación de los modelos2	24
2.4.1	1. Modelos de evolución de la línea de costa en equilibro2	25
2.4.2	2. Modelo de traslación: YA092	26
2.4.3	3. Modelo de rotación: JA212	27
2.5.	Análisis del rendimiento de los modelos	30
3. DES	CRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	33
3.1.	Playas de Levante y Poniente de Benidorm	33
3.1.1	1. Localización	33
3.1.2	2. Clima marítimo	34
3.1.3	3. Series de líneas de costa	36

3.	2.	Pla	ya de Moncofa	38
	3.2.	1.	Localización	38
	3.2.	2.	Clima marítimo	39
	3.2.	3.	Series de líneas de costa	40
4.	RE	SUL	TADOS	42
4.	1.	YA(09	42
4.	2.	JA2	21	45
5.	DIS	CUS	SIONES	48
5. Pl	1. aya	Res de	sultados de los modelos excluyendo variaciones no naturales en Poniente	la 48
5.	2.	Res	sultados del modelo YA09 considerando medias móviles	51
	5.2.	1.	Playa de Levante	51
	5.2.	2.	Playa de Poniente	53
5.	3.	Res	sultados de YA09 con datos de alta resolución	54
	5.3.	1.	Playa de Levante	55
	5.3.	2.	Playa de Poniente	56
5.	4.	Ince	ertidumbres y limitaciones del modelo	58
6.	FU	ΓUR	AS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	64
7.	REI	FER	ENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología general utilizada en este estudio.

Figura 2. Movimientos de variabilidad de la línea de costa. (a-b) Movimiento de rotación, donde: (a) Modelo simplificado de rotación de playa con olas oblicuas que llegan a una playa, generando transporte de sedimentos a lo largo de la costa que provoca acumulación en la zona descendente y erosión en la zona ascendente; (b) Un cambio en la dirección oblicua de las olas que causa acumulación en la zona ascendente y erosión en la zona descendente. (c) Movimiento de traslación, donde las olas entrantes perpendiculares a la línea de costa generan transporte de sedimentos perpendicular a la misma. Fuente: Abdulsalam, (2024).

Figura 3. Pasos de procesamiento de datos para obtener posición y orientación de la línea de costa: (a) Se establece una línea base a la cual se referencia todas las posiciones de la línea de costa; (b) Se definen perfiles perpendiculares a intervalos iguales a lo largo de las líneas de costa para obtener datos de cada posición de la línea de costa en relación con la línea base; (c) Se establece un dominio para asegurar una longitud homogénea en todas las líneas de costa; y (d) Se normaliza la posición de la línea de costa. Fuente: Abdulsalam, (2024).

 Figura 14. Resultados del modelo YA09 en la Playa de Levante utilizando el conjunto completo de datos, con los siguientes ajustes: (a) Serie temporal sin suavizar (a) serie temporal suavizada con una media móvil semestral y (b) serie temporal suavizada con una media móvil anual. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

Figura 15. Resultados del modelo YA09 en la Playa de Poniente utilizando el conjunto completo de datos, con los siguientes ajustes: (a) Serie temporal sin suavizar (a) serie temporal suavizada con una media móvil semestral y (b) serie temporal suavizada con una media móvil anual. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para las zonas de estudio seleccionadas. Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R^2), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C+, C-), parámetros empíricos (a, b) y grado máximo de variabilidad de la línea de costa (Δ m). 45

Tabla 2. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo JA21 para las zonas de estudio seleccionadas. Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R^2), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C+, C-), parámetros empíricos (a, b) y variabilidad máxima de la orientación de la línea de costa (αm).

Tabla 6. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para la Playa de Levante, utilizando datos satelitales de Sentinel posteriores a 2015: sin suavizar, suavizados con una media móvil semestral (MMS) y con una media móvil anual (MMA). Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de

LISTADO DE SIMBOLOS Y ABREVIACIONES

α_{seq}	Drientación de la línea de costa en equilibrio asintótico	
a, b	Parámetros de calibración	
ρ	Coeficiente de correlación de Pearson	
α _s	Drientación de la línea de costa	
$\overline{\alpha_s(t)}$	Promedio temporal de la orientación de la línea de costa	
α _m	/ariabilidad máxima de la orientación de la línea de costa	
$\overline{x}, \overline{0}$	Promedio de valores observados	
<i>y</i>	Promedio de valores predichos	
<i>D</i> ₅₀	Tamaño medio del grano	
x_i, O_i	/alores observados	
x_i, P_i	/alores predichos	
θ	Dirección de la ola	
CGAT	Grupo de Cartografía Geo-Ambiental y Teledetección	
E	Energía del oleaje	
EBSEM	Modelo de Evolución de la Línea de Costa Basado en el Equi	librio
ENE	Este-noreste	
EOEP-5	5th Earth Observation Envelope Program	
ESE	Este-sureste	
EWDF	Función de Dirección de la Ola en Equilibrio	
GOW	Dlas Oceánicas Globales	
Hs	Altura de ola significante	
IHCantabria	nstituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria	
JA21	Jaramillo et al., (2021a)	

L-	- Rotación antihoraria de la línea de costa
L+	 Rotación horaria de la línea de costa
Тр	- Período de la ola
MSS	- Puntuación de Habilidad de Mielke
Ν	- Número de observaciones
NS	- Coeficiente de Nash-Sutcliffe
Р	- Potencia del oleaje
RMSE	- Error Cuadrático Medio
RP	- Coeficiente de Determinación
SCE-UA	- Método de evolución compleja barajada - Shuffled Complex Evolution Method
UPV	- Universidad Politécnica de Valencia
Х	- Parámetro de la Playa
YA09	- Yates et al., (2009)

1. INTRODUCCIÓN

Esta sección presenta los antecedentes, el problema de investigación y la justificación del presente estudio. Se sitúa el tema en su contexto teórico y práctico, se describe el desafío a abordar y cómo los resultados contribuirán a mejorar la comprensión del problema. Finalmente, se define el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo.

1.1. Antecedentes

Las playas proveen servicios comerciales, recreativos y ecológicos, jugando un papel fundamental para el desarrollo de actividades productivas y de ocio, y son cruciales en la defensa contra la erosión y los fenómenos meteorológicos extremos. La gestión costera se encuentra estrechamente vinculada con los procesos de variabilidad de la línea de costa, la cual se ha considerado un indicador confiable para describir el cambio general de las playas en diferentes escalas espaciotemporales (Biausque et al., 2016; Smith & Bryan, 2007). Los cambios en la línea de costa reflejan la dinámica del entorno costero, influenciado por factores naturales como el oleaje, las corrientes, las variaciones en el nivel del mar y el viento, así como por la creciente presión antrópica derivada de las actividades humanas que allí tienen lugar (Larson & Kraus, 1995).

Para entender y predecir estos cambios, se han desarrollado diversos modelos morfodinámicos, que requieren de calibración y validación precisa para garantizar resultados aplicables a la gestión costera. Entre estos modelos se encuentran los 3D (p. ej. de Vriend et al., 1993), multi-lineales (p. ej. Hanson and Larson, 1990), uni-lineales (p. ej. Hanson and Kraus, 1991; Pelnard-Considère, 1957), tendentes al equilibrio e híbridos (Antolínez et al., 2019; Robinet et al., 2018; Vitousek et al., 2017). Los modelos tendentes al equilibrio, también conocidos como modelos EBSEM (*Equilibrium-Based Shoreline Evolution Models*), se basan en el equilibrio entre las fuerzas destructivas y constructivas para predecir cambios morfológicos a medio y largo plazo; además de ser apreciados por su simplicidad y eficiencia computacional (Jaramillo et al., 2021b).

Los EBSEM se clasifican según el tipo de transporte de sedimentos que consideran: 1) transporte transversal a la costa (*cross-shore*) o 2) transporte longitudinal a la costa (*longshore*). Los modelos transversales o de traslación son numerosos y bien documentados en la literatura (p. ej. Kriebel & Dean, 2003.; Miller & Dean, 2004; Yates et al., 2009; Davidson et al., 2013; Castelle et al., 2014; Jara et al., 2015; Jaramillo et al., 2020).

En contraste, los modelos longitudinales o de rotación, como los de Turki et al., (2013a) y Jaramillo et al., (2021a), son menos comunes, pero asimismo cruciales, especialmente en playas encajadas donde este tipo de transporte tiene un impacto significativo. Además, existen modelos como el IH-MOOSE, propuesto por Jaramillo et al., (2021b), que representa un avance al integrar las componentes del transporte transversal y la rotación, proporcionando una evaluación más completa de la dinámica costera.

1.2. Planteamiento del problema

La gestión costera enfrenta desafíos significativos debido a la complejidad y variabilidad de los factores que afectan la línea de costa. Aunque existen diversos modelos diseñados para predecir la evolución costera, su aplicación ha sido predominantemente limitada a estudios de caso específicos. Esta limitación ha generado una brecha en la validación y generalización de estos modelos, especialmente en playas que han experimentado intervenciones antrópicas.

Por ejemplo, en la bahía de Collaroy-Narrabeen, Australia, un modelo de rotación basado en el equilibrio ha demostrado ser eficaz para predecir la erosiónacreción y la variabilidad en la orientación de la playa en un entorno natural (Jaramillo et al., 2021a). Sin embargo, los autores sugieren que es fundamental validar este modelo en sitios con características de playa y condiciones de oleaje diversas para evaluar su aplicabilidad en una gama más amplia de contextos ambientales.

De manera similar, el modelo desarrollado por Davidson et al. (2013) ha demostrado un buen desempeño en la explicación de aproximadamente el 60% de la variabilidad en la traslación de la línea de costa en playas como Narrabeen. Aunque presenta limitaciones, como la falta de consideración de gradientes de transporte de sedimentos a lo largo de la costa, el aumento del nivel del mar y el impacto de las tormentas, este modelo sigue siendo una práctica estándar para muchas autoridades costeras debido a su capacidad para predecir la variabilidad en costas expuestas. Los autores también han sugerido la necesidad de investigar la aplicabilidad del modelo en diferentes condiciones ambientales para explorar completamente la relación entre los parámetros del modelo y las variables ambientales medibles.

1.3. Justificación

La presente investigación se justifica en la necesidad de evaluar el desempeño de los modelos de evolución costera en diversos ambientes, lo que permitirá entender su eficacia y adaptabilidad a distintas condiciones morfodinámicas. En particular, se seleccionaron las playas de Levante y Poniente en Benidorm, y la Playa de Moncofa en Castellón. Las dos primeras cuentan con una extensa serie temporal de datos satelitales (1984 - 2022), proporcionados por la Universidad Politécnica de Valencia, lo que facilita un análisis detallado de la evolución de la línea de costa en el tiempo. En contraste, la Playa de Moncofa, aunque dispone de menos datos temporales (2017 - 2020), presenta condiciones morfodinámicas

diferentes, lo que ofrece un valioso contrapunto para evaluar la robustez de los modelos en escenarios distintos.

El uso de datos satelitales de alta resolución espaciotemporal ha abierto nuevas oportunidades para realizar estudios costeros en diferentes escalas temporales, permitiendo un monitoreo más preciso de los cambios en la línea de costa (Luijendijk et al., 2018; Mentaschi et al., 2018; Vos et al., 2019). A medida que nuevos satélites se incorporan a las redes de observación, estos desempeñan un papel cada vez más relevante en la modelación y calibración de la evolución costera (Vitousek et al., 2017; Splinter et al., 2013).

En este contexto, la presente investigación analizará y comparará los modelos de Yates et al. (2009) para el movimiento de traslación y el de Jaramillo et al. (2021a) para la rotación de la costa, integrando datos satelitales para una evaluación precisa bajo diferentes condiciones ambientales.

Además, este estudio se enmarca en la colaboración establecida con el Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), a través del proyecto Shoreline Evolution Tools (IH-SET), que forma parte del programa ThinkInAzul, financiado por el MCIN/Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de Cantabria.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Evaluar el desempeño de los modelos EBSEM, YA09 y JA21 en las playas de Levante y Poniente en Benidorm, y en la Playa de Moncofa en Castellón, con el objetivo de identificar sus limitaciones y optimizar su aplicabilidad en la gestión costera.

1.4.2. Específicos

- Determinar el ajuste óptimo de los modelos en las playas de estudio, mediante la ejecución con diferentes parámetros de entrada y la cuantificación de su desempeño utilizando diferentes métricas estadísticas.
- Analizar las incertidumbres asociadas a la variabilidad natural de las zonas de estudio, las intervenciones antropogénicas y las fuentes de datos empleadas, mediante:
 - La comparación del desempeño de los modelos con y sin la inclusión de variaciones no naturales en las series temporales.
 - El análisis del rendimiento de los modelos al suavizar los datos de entrada utilizando medias móviles.

- La evaluación de los resultados de los modelos bajo diferentes resoluciones espaciales de los datos satelitales.
- 3. Discutir las limitaciones de los modelos en el contexto de las playas estudiadas, identificando posibles enfoques de modelado que puedan mejorar su aplicabilidad y escalabilidad en entornos costeros diversos.

2. METODOLOGÍA

Esta sección proporciona una explicación detallada de la metodología general utilizada en este estudio (Figura 1). Se cubren aspectos clave, incluyendo la recopilación y el procesamiento de datos, la descripción de los modelos utilizados junto con las suposiciones e hipótesis subyacentes, y la evaluación de su rendimiento.

2.1. Generalidades

La metodología general recogida en la Figura 1 consiste en: 1) Recopilación de los datos necesarios en las áreas de estudio que se utilizarán como inputs en los modelos, incluyendo datos sobre el oleaje y series temporales de las posiciones de la línea de costa, cuya fuente se detalla en la subsección 2.2; 2) Procesamiento de los datos de la línea de costa para calcular la serie temporal de la posición media de la costa o el ancho medio de la playa seca, así como la serie temporal de la orientación de la costa (subsección 2.3); 3) Aplicación de los modelos de traslación o *cross-shore* y de rotación o *longshore* (subsección 2.4); 4) Finalmente, los modelos generan una estimación de la línea de costa, la cual se evalúa según la metodología de evaluación de desempeño descrita en la subsección 2.5.



Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología general utilizada en este estudio.

2.2. Fuente de datos

A continuación, se describe el origen de los datos utilizados, especificando su resolución espacial y temporal. Los datos incluyen las series temporales de la posición de la línea de costa y las variables clave del oleaje, fundamentales para caracterizar el clima marítimo. Estos datos también se utilizaron como forzamiento para los modelos que se detallarán en la sección 2.4.

2.2.1. Playas de Poniente y Levante en Benidorm

Para el análisis de la variabilidad de la línea de costa en las playas de Poniente y Levante en Benidorm, se utilizó una serie temporal proporcionada por el Grupo de Cartografía Geoambiental y Teledetección (CGAT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Esta serie de datos fue obtenida a partir de imágenes satelitales de Landsat y Sentinel, procesadas para determinar las posiciones de la línea de costa desde 1984 hasta 2022.

Los datos de oleaje para estas playas fueron obtenidos del modelo de reanálisis Global Ocean Waves, GOW, perteneciente a las bases de datos meteoceánicas IH-Data desarrollado por IHCantabria. Los resultados se extrajeron de un punto en alta mar ubicado en las coordenadas 38.417º de latitud y -0.167º de longitud, a una profundidad aproximada de 82 metros. El análisis abarca un período de datos recopilados entre 1979 y 2022, proporcionando información horaria detallada sobre el estado del mar, incluyendo parámetros clave como la altura significante de las olas, el período de pico y la dirección promedio de las olas.

2.2.2. Playa de Moncofa

Para la Playa de Moncofa, el estudio empleó una serie temporal de la línea de costa obtenida a través del Proyecto de Erosión Costera, financiado por la sección de Ciencia para la Sociedad del 5º Programa de Observación de la Tierra (EOEP-5) de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Gomes da Silva et al., 2024). Los datos incluyen la línea de agua (línea de interfaz agua-arena) de la costa de Castellón, derivada de imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2, que fueron corregidas considerando el mareógrafo más cercano de Puertos del Estado y la pendiente de la playa en la zona para obtener una serie temporal precisa. Este conjunto de datos cubre el período de abril de 2017 a enero de 2020.

Los datos del clima de olas, que abarcan desde 1979 hasta 2020, también se obtuvieron del modelo GOW del IHCantabria, correspondientes a un punto en alta mar situado en las coordenadas 39.7° de latitud y -0.0833° de longitud, a una profundidad de aproximadamente 30 metros.

2.3. Procesamiento de los datos

La variabilidad de la línea de costa se refiere a los cambios en su posición y forma a lo largo del tiempo. Esta variabilidad puede analizarse a través de tres movimientos clave: traslación (o movimiento *cross-shore*), respiración de la playa y rotación de la playa (o *movimiento longshore*) (Jaramillo et al., 2021a). El contexto de este estudio se enfoca en dos de estos movimientos: la traslación y la rotación.

Por tanto, en la subsección 2.3.1 se proporciona una descripción breve de estos movimientos. Posteriormente, en las subsecciones 2.3.2 y 2.3.3 se detalla el procesamiento de los datos para obtener dos series temporales fundamentales para el estudio de estos movimientos: la posición y la orientación medias de la línea de costa. Estas series temporales, junto con los datos de oleaje, se utilizarán como entradas para los modelos de evolución de la línea de costa seleccionados.

2.3.1. Variabilidad de la línea de costa

La variabilidad de la línea de costa abarca los cambios en su posición y forma a lo largo del tiempo, desde variaciones a corto plazo debido a eventos de tormenta hasta cambios a medio y largo plazo a lo largo de décadas (Bryan et al., 2013; Harley et al., 2011). Esta variabilidad se evalúa para caracterizar los cambios en las playas en diferentes escalas espacio-temporales (Jaramillo et al., 2021a). Para simplificar el análisis, se identifican tres movimientos clave: migración transversal o traslación, respiración de la playa y rotación de la playa (Jaramillo et al., 2021a). En el presente estudio, nos centraremos en la traslación y la rotación.

La traslación (Figura 2a), se refiere al desplazamiento de sedimentos perpendicular a la línea de costa y los cambios en la posición de la misma (Davidson et al., 2013; Jaramillo et al., 2021a; Palalane et al., 2016; Robinet et al., 2018; Yates et al., 2009). Este movimiento está influenciado por factores como la energía de las olas, las corrientes, el transporte de sedimentos y la morfología costera. Se ha observado que el transporte de sedimentos transversal es principalmente impulsado por las corrientes de retorno, que equilibran el transporte de agua hacia la costa causado por la no linealidad de las olas y el rompimiento de estas (Zhang et al., 2020).

La rotación de la playa (Figura 2b), se caracteriza por el movimiento hacia tierra o mar de un extremo de la playa, con un patrón inverso en el otro extremo (Jaramillo et al., 2021a; Klein et al., 2002; Thomas et al., 2010; Turki et al., 2013a). Este fenómeno puede ser resultado de alteraciones en el transporte de sedimentos a lo largo de la costa debido a cambios significativos en la dirección de las olas. La rotación de la playa generalmente ocurre en playas encajadas con un clima de olaje bidireccional y se manifiesta en patrones recurrentes de erosión y acumulación en los extremos opuestos de la playa (Harley et al., 2011; Thomas et al., 2010). Este movimiento puede variar en función de la dirección de las olas, el transporte de sedimentos y las condiciones atmosféricas, con patrones documentados que van desde rotaciones horarias hasta antihorarias (Castelle et al., 2020; Thomas et al., 2010).



Figura 2. Movimientos de variabilidad de la línea de costa. (a-b) Movimiento de rotación, donde: (a) Modelo simplificado de rotación de playa con olas oblicuas que llegan a una playa, generando transporte de sedimentos a lo largo de la costa que provoca acumulación en la zona descendente y erosión en la zona ascendente; (b) Un cambio en la dirección oblicua de las olas que causa acumulación en la zona ascendente y erosión en la zona descendente. (c) Movimiento de traslación, donde las olas entrantes perpendiculares a la línea de costa generan transporte de sedimentos perpendicular a la misma. Fuente: Abdulsalam, (2024).

2.3.2. Posición media de la línea de costa

Para determinar la posición media de la línea de costa, se establece una línea de referencia paralela a la tendencia general de la línea de costa (Figura 3a). A partir de esta línea de referencia, se definen perfiles perpendiculares con un espaciado constante y una longitud que abarca todas las posiciones de la línea de costa medidas (Figura 3b).

Primero, se establece un dominio de estudio asegurando que todas las líneas de costa tengan la misma longitud (Figura 3c). Luego, se determina la intersección de cada línea de costa con los perfiles definidos y se calcula la distancia desde el punto de inicio del perfil hasta cada punto de intersección. Finalmente, se promedia estas distancias para cada fecha, generando así una serie temporal que muestra cómo ha cambiado la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo.

2.3.3. Orientación media de la línea de costa

Para calcular la orientación media de la línea de costa, se ajusta una línea recta a cada medición previamente normalizada. Este proceso implica promediar la anchura de la playa seca a lo largo del tiempo y restar este valor a cada dato medido (Figura 3d). El ajuste convierte la línea de costa en una línea recta en el espacio de coordenadas. La orientación de la línea de costa se determina como el ángulo entre la línea perpendicular al ajuste de regresión lineal y el norte geográfico (Figura 3). Este procedimiento se repite para cada fecha de medición, generando así una serie temporal de orientaciones (Jaramillo et al., 2021a).



Figura 3. Pasos de procesamiento de datos para obtener posición y orientación de la línea de costa: (a) Se establece una línea base a la cual se referencia todas las posiciones de la línea de costa; (b) Se definen perfiles perpendiculares a intervalos iguales a lo largo de las líneas de costa para obtener datos de cada posición de la línea de costa en relación con la línea base; (c) Se establece un dominio para asegurar una longitud homogénea en todas las líneas de costa; y (d) Se normaliza la posición de la línea de costa. Fuente: Abdulsalam, (2024).

2.4. Implementación de los modelos

Los modelos que se analizarán y compararán en este trabajo son los propuestos por Yates et al. (2009) para el movimiento de traslación de la costa y por Jaramillo et al. (2021a) para el movimiento de rotación. La metodología general para su implementación implica tres pasos clave adaptados a las características de cada modelo: 1) Determinar la energía del oleaje incidente (E) en el caso del modelo de traslación (YA09) o la potencia (P) para el modelo de rotación (JA21), 2) Definir la función de equilibrio, utilizando la Equilibrium Energy Function (EEF) para YA09 y la Equilibrium Wave Direction Function (EWDF) para JA21, y 3) Calibrar y validar los modelos en función de sus parámetros específicos, ajustando el desempeño de los modelos a las condiciones observadas de las playas estudiadas.

Ambos modelos emplean un algoritmo de optimización global SCE-UA (Shuffled Complex Evolution Method), una técnica robusta desarrollada en la Universidad de Arizona. Este método ha demostrado una alta eficacia en la calibración de modelos hidrológicos y se aplica extensamente en diversos campos. Su efectividad y eficiencia en la optimización dependen en gran medida de la selección adecuada de sus parámetros (Duan et al., 1992, 1993, 1994). En este estudio, se ha seleccionado el SCE-UA como método de calibración debido a su

probada robustez y efectividad. Sin embargo, cabe mencionar que los modelos pueden recurrir a otros métodos de calibración en función de las necesidades y los objetivos específicos del estudio.

Adicionalmente, los modelos seleccionados para el análisis *cross-shore* y *longshore* en este estudio han sido ejecutados utilizando el software *Shoreline Evolution Tools* (IH-SET), una herramienta en desarrollo por el Grupo de Ingeniería y Gestión de la Costa de IHCantabria, en el marco del Plan Complementario de Ciencias Marinas. IH-SET permite la implementación precisa de modelos de evolución costera, facilitando la simulación y análisis de la dinámica de las playas bajo diversas condiciones. La flexibilidad de esta herramienta es clave, ya que admite diferentes métodos de calibración, lo que aumenta su aplicabilidad en una amplia gama de estudios costeros.

El proceso de calibración comienza con la generación de una población de posibles conjuntos de parámetros, que se dividen en subgrupos más pequeños llamados complejos. Dentro de cada complejo, se realiza una búsqueda tipo *simplex* para evaluar el rendimiento del modelo utilizando métricas como el coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS) o el error cuadrático medio (RMSE), en función de diferentes combinaciones de parámetros.

El conjunto de parámetros con peor rendimiento en cada complejo es reemplazado por uno nuevo, generado a partir de los demás conjuntos, con el objetivo de encontrar soluciones más eficientes. Para evitar que los complejos se queden atrapados en soluciones poco óptimas, se intercambia información entre ellos de manera periódica. Este proceso iterativo continúa hasta que el algoritmo converge, lo que ocurre al cumplir un criterio de detención, como alcanzar un número máximo de iteraciones o lograr un nivel deseado de mejora en la función objetivo (Duan et al., 1993).

A continuación, se describen las generalidades de los modelos EBSEM, así como las ecuaciones de los modelos seleccionados para este estudio.

2.4.1. Modelos de evolución de la línea de costa en equilibro

Los modelos de evolución de la línea de costa en equilibrio (EBSEM) permiten estimar la variabilidad natural de diferentes parámetros de la playa. Estos modelos analizan cómo la playa responde a tormentas, variaciones estacionales y cambios interanuales en las condiciones del oleaje entrante. Conceptualmente, los EBSEM se fundamentan en el equilibrio entre las fuerzas destructivas y constructivas que influyen en la playa. Por lo tanto, estos modelos se definen mediante la siguiente ecuación diferencial (Jaramillo et al., 2021a):

$$\frac{dX(t)}{dt} = K(t) \cdot \Delta X(t) \tag{1}$$

Donde *X* representa el parámetro de la playa que varía con respecto al tiempo, dX(t)/dt, en función del producto entre un forzamiento que varía rápidamente, K(t), y el desequilibrio evolutivo en el tiempo, $\Delta X(t)$. Este desequilibrio se define como la diferencia entre las condiciones actuales y un equilibrio teórico $\Delta X(t) = X - X_{eq}$.

El parámetro *K*, es una tasa que depende de las propiedades morfológicas de la playa, como el tamaño medio del grano, D_{50} , la profundidad de cierre, h^* , y la longitud de la playa, *l*, así como de las condiciones predominantes del oleaje, como la potencia de las olas, *P*, o la energía de las olas, *E*. Las características morfológicas suelen estar encapsuladas en parámetros de calibración, por ejemplo, para el transporte transversal, suele utilizarse un parámetro libre para representar la tasa de acumulación y otro para la erosión (Davidson et al., 2013; Jara et al., 2015; Yates et al., 2009). Además, el modelo se basa en una serie temporal de líneas de costa como referencia, y sus forzamientos son registros de predicciones retrospectivas y pronósticos del oleaje y el nivel del mar.

2.4.2. Modelo de traslación: YA09

El modelo YA09, desarrollado por Yates et al. (2009), se fundamenta en una ecuación cinética de primer orden que establece una relación lineal entre la posición de equilibrio de la línea de costa y la energía del oleaje incidente. Este modelo fue calibrado y validado con éxito al replicar la variación transversal de la costa en diferentes secciones de la playa Torrey Pines, ubicada en el sur de California, EE. UU.

$$\frac{dS(t)}{dt} = C^{\pm} E^{1/2} \cdot \Delta E(S)$$
⁽²⁾

Donde dS(t)/dt representa la tasa de cambio de la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo, $E^{1/2}$ actúa como un factor de ponderación energética que previene cambios no realistas, y el forzamiento del oleaje se parametriza de la siguiente manera:

$$E = Hs^2 \tag{3}$$

Las constantes C^{\pm} son factores de proporcionalidad: C^{+} se asocia con la acreción cuando $\Delta E < 0$, y C^{-} con la erosión cuando $\Delta E > 0$. Aquí, ΔE representa el desequilibrio energético entre la energía incidente E y la energía de equilibrio $E_{eq}(S)$.

$$\Delta E(S) = E - E_{eq}(S) \tag{4}$$

Yates et al. (2009) establecieron una relación lineal y biunívoca entre la energía del oleaje y la posición de equilibrio de la línea de costa generada por esa energía, expresada de la siguiente manera:

$$E_{eq}(S) = aS + b \tag{5}$$

Donde *a* y *b* son parámetros de calibración del modelo.

Al asumir que la energía permanece constante en un estado de mar e integrarla en la ecuación inicial, desarrollaron un modelo en el cual la posición de la línea de costa se aproxima exponencialmente al equilibrio, tal como lo han sugerido estudios anteriores (p. ej. Larson & Kraus, 1995; Swart, 1974).

$$\alpha_s(\Delta t) = (\alpha_{S_0} - \alpha_{S_{ea}})e^{-aC^{\pm}E^{1/2}\Delta t} + \alpha_{S_{ea}}$$
(6)

Donde α_{S_0} representa la posición inicial de la línea de costa en el instante $t = t_0$, a partir de la cual se determina la posición de la línea de costa al inicio del siguiente estado de mar, α_{S_1} , en el instante $t_i = t_0 + \Delta t$. Para calcular la evolución en el estado de mar posterior, se utiliza como posición inicial la posición final del estado anterior, y así sucesivamente, aplicando el modelo a medio plazo. Así, el modelo se configura como una sucesión de *N* estados de mar, caracterizados por sus respectivas alturas de ola en rotura $H_{b,i}$, con i = 1, 2, ... N, asumiendo la hipótesis de oleaje estacionario durante cada estado de mar en la serie Δt .

En resumen, la formulación del modelo incluye cuatro parámetros de calibración: a, b, C^+ y C^- . La tasa de avance y retroceso de la costa está controlada por C^{\pm} , mientras que los parámetros a y b definen la condición de equilibrio (EFF) y se calculan a partir de las mediciones disponibles consideradas para la calibración.

Es importante señalar que, aunque el modelo ha sido aplicado a otras playas con diferentes características de tamaño de grano y energía del oleaje incidente, aún no se han establecido relaciones claras entre estos parámetros y las propiedades físicas de la playa. Yates et al. (2011) analizaron la posición de la línea de costa durante un periodo de cuatro años en Ocean Beach, San Francisco, California, y concluyeron que los coeficientes del modelo YA09 parecían depender, al menos en parte, del tamaño del grano del sedimento.

En sitios donde se observa una ganancia o pérdida neta de sedimentos, es posible utilizar la modificación del modelo YA09 propuesta por Jaramillo et al. (2020). Esta modificación introduce una variación temporal en la relación de energía de equilibrio en función de los cambios en el volumen de sedimento, permitiendo una mejor adaptación a las condiciones locales.

2.4.3. Modelo de rotación: JA21

El proceso de rotación se produce cuando un extremo de la playa avanza mientras el otro se erosiona, y viceversa. Este fenómeno ha sido ampliamente investigado por numerosos autores, que han encontrado una fuerte relación entre la orientación de la línea de costa y el clima de olas entrantes. En este caso, se ha elegido el modelo JA21 por ser el más reciente documentado en la literatura.

El modelo de rotación JA21, desarrollado por Jaramillo et al., (2021a), está basado en el equilibrio y asume que la rotación de la playa es inducida por la potencia y dirección del oleaje entrante. Se basa en la siguiente ecuación cinética:

$$\frac{d\alpha_s(t)}{dt} = L^{\pm} P \Delta \alpha_s(\theta) \tag{7}$$

Donde $\alpha_s(t)$ representa la orientación de la línea costera (°) en el tiempo "t", y L^{\pm} son las constantes de proporcionalidad $(m^{-2}h^{-2})$, L^+ se refiere a la rotación de la línea costera en sentido horario y L^- a la rotación en sentido anti horario. Como evidencia la Ec. 8, la potencia de las olas incidentes, $P(m^2s)$, se define como el factor de ponderación del modelo resultante del producto del cuadrado de la altura significativa de las olas, H_s^2 , y el período pico, T_p .

$$P = Hs^2 \cdot Tp \tag{8}$$

Donde $\alpha_s(\theta)$ representa el desequilibrio en la orientación de la línea de costa (Ec.9).

$$\Delta \alpha_s(\theta) = \alpha_s - \alpha_{S_{eq}} \tag{9}$$

La orientación de la línea de costa en equilibrio asintótico, $\alpha_{S_{eq}}$, es considerada como una relación lineal entre la dirección de las olas incidentes y la orientación en equilibrio de la línea de costa (Ec. 10). Es importante destacar que, al evaluar un caso teórico de playa, se puede anticipar que, $\alpha_{S_{eq}} \cong \theta$ si la línea de costa es perfectamente recta y la dirección de las olas incidentes, θ , es uniforme a lo largo de toda la longitud de la playa. Sin embargo, si se supone que las condiciones de las olas fuera del perfil activo de la playa son el forzamiento del modelo, existe una relación proporcional entre $\alpha_{S_{eq}} y \theta$ (Ec. 10).

$$\alpha_{S_{eq}} = \frac{\theta - b}{a} \tag{10}$$

Donde a(-) y $b(^{\circ})$ son parámetros empíricos.

La orientación de la línea de costa en equilibrio se ha definido como la función de dirección de las olas en equilibrio (EWDF) para una dirección de ola dada. Esta función determina el mejor ajuste entre las mediciones, diferenciando las posiciones que rotarán en sentido horario de aquellas que rotarán en sentido antihorario. Dado que el acercamiento al equilibrio en este caso es exponencial, la solución a las ecuaciones (7) a (10) tiene la siguiente forma:

$$\alpha_{s}(t) = (\alpha_{S_{0}} - \alpha_{S_{eq}})e^{-L^{\pm}Pt} + \alpha_{S_{eq}}$$
(11)

En resumen, la formulación del modelo incluye cuatro parámetros de calibración: a, b, L^+ y L^- . La tasa de rotación de la línea de costa (ya sea en sentido horario o antihorario) está controlada por L^{\pm} , mientras que los parámetros a y b definen la condición de equilibrio (EWDF) y se calculan a partir de las encuestas disponibles consideradas para la calibración.

En el panel izquierdo de la Figura 4 se esquematizan las principales variables utilizadas en el modelo: la orientación de la línea de costa y la potencia y dirección correspondientes de las olas entrantes. Mientras tanto, en el panel derecho de la Figura 4 se ilustra un ejemplo de cómo se realiza el cálculo de la rotación de la línea de costa.



Figura 4. a) Esquema general de las variables principales del modelo: la orientación de la línea de costa, α_s , definida como el ángulo entre la línea perpendicular al ajuste de regresión lineal de la línea de costa filtrada y el norte geográfico; la potencia del oleaje entrante, *P*; y la dirección del oleaje incidente, θ_1 . b) Esquema que muestra la rotación de la playa: en este caso, la posición inicial de la línea de costa (representada por la línea negra sólida) está determinada por la potencia del oleaje incidente, *P*₁, y su dirección, θ_1 . Posteriormente, la playa rota en sentido antihorario en respuesta a una nueva potencia de oleaje, *P*₂, y una nueva dirección de oleaje, θ_2 . Como resultado, la orientación de la línea de costa cambia de α_{s_1} a α_{s_2} . Fuente: Jaramillo et al., (2021a).

Entre las aproximaciones más importantes del modelo está la suposición de un único punto de oleaje como fuerza impulsora. Este punto de oleaje se utiliza para caracterizar tanto la potencia como la dirección de las olas incidentes que afectan a toda la playa. Por lo tanto, el modelo propuesto asume que el oleaje es homogéneo a lo largo de la playa, y para asignar un valor único de oleaje a toda la extensión de la playa, se selecciona un punto representativo fuera del perfil de la playa activa. Además de la orientación de la costa, el modelo no considera explícitamente otras características físicas de la playa, como el tamaño medio del grano o la longitud del perfil activo de la playa. Sin embargo, los parámetros del modelo $(a, b, L^+ \ y \ L^-)$, que determinan la condición de equilibrio y la velocidad del modelo, están intrínsecamente relacionados con los parámetros morfológicos de la playa. Aparte de esto, el modelo no incluye explícitamente ningún parámetro adicional relacionado con el rango de mareas.

2.5. Análisis del rendimiento de los modelos

Para evaluar el rendimiento de los modelos se examinan varias métricas: el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), el coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), el *Mielke Skill Score* (MSS) y el coeficiente de determinación R² (RP). Se consideró el conjunto completo de datos de observación durante el período de monitoreo designado para cada caso de estudio.

El RMSE mide las diferencias entre los datos medidos y los valores predichos por el modelo. En general, un RMSE más bajo indica una mayor precisión en las predicciones del modelo en comparación con las mediciones (Ec. 12).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{predicho} - x_{medido})^2}{n}}$$
(12)

Donde n es el número total de muestras.

El coeficiente de correlación de Pearson (ρ) mide la relación lineal entre el modelo y los datos medidos (Ec. 13). Puede variar entre -1 y 1. Los valores de (ρ) se pueden clasificar de la siguiente manera: "correlación lineal positiva perfecta" ($\rho = 1.0$), "correlación lineal positiva fuerte" ($1.0 > \rho \ge 0.8$), "correlación lineal positiva moderada" ($0.8 > \rho \ge 0.4$), "correlación lineal positiva débil" ($0.4 > \rho \ge 0$), "sin correlación" ($\rho = 0$), "correlación lineal negativa débil" ($0.0 > \rho \ge -0.40$), "correlación lineal negativa moderada" ($-0.4 > \rho \ge -0.8$), "correlación lineal negativa fuerte" ($-0.8 > \rho \ge -1.0$) y "correlación lineal negativa perfecta" ($\rho = -1.0$).

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$
(13)

Donde x_i , \bar{x} , y_i y \bar{y} , representan los valores observados, la media de los valores observados, los valores predichos y la media de los valores predichos, respectivamente.

El coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS) es un indicador normalizado que mide la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos (Ec. 14). Puede variar entre $-\infty$ a 1. Un valor de NS igual a 1 indica una correspondencia perfecta entre el modelo y los datos observados. Un valor de NS igual a 0 sugiere que el resultado del modelo es equivalente a la media de los valores observados, y un valor menor a 0 indica que la media de los valores observados es un mejor predictor que el modelo (Moriasi et al., 1983; Nash & Sutcliffe, 1970).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_I)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2}$$
(14)

Donde n, O_i , P_I y \overline{O} representan el número de observaciones, los valores observados, los valores predichos y la media de los valores observados, respectivamente.

El coeficiente de determinación, R² o RP, es una medida estadística que indica qué tan bien se ajustan las predicciones de un modelo a los datos observados. Es utilizado para evaluar la calidad de un modelo de regresión, mostrando qué proporción de la variación en la variable dependiente puede ser explicada por las variables independientes. Un valor de R² cercano a 1 representa un ajuste perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el modelo no explica la variación de los datos (Ec.15).

$$RP = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y}_i)^2}$$
(15)

Donde y_i es el valor observado, \hat{y}_i es el valor predicho por el modelo y \overline{y}_i es la media de los valores observados.

El *Mielke Skill Score* (MSS), también conocido como la puntuación de habilidad del error absoluto medio, es otra métrica utilizada para comparar el rendimiento de un modelo de pronóstico con un modelo de referencia o base (Ec. 16). Este índice muestra qué tan bien o mal se desempeña un modelo en comparación con el modelo de referencia. Un MSS de 1 indica un pronóstico perfecto, un valor de cero sugiere que el pronóstico no es mejor que el modelo de referencia, y un valor negativo indica que el pronóstico es peor que el modelo de referencia.

$$MSS = \frac{\sum_{i=1}^{n} |F_i - O_i|}{\sum_{i=1}^{n} |C_i - O_i|}$$
(16)

Donde F_i representa el valor pronosticado por el modelo que se está evaluando, O_i representa los valores observados, y C_i representa el valor pronosticado por el modelo de referencia.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta sección se presentan las generalidades de las localidades estudiadas, incluyendo una descripción de las principales características geomorfológicas de las playas seleccionadas. Además, se proporciona información sobre el clima marítimo local, con un enfoque en los principales parámetros del oleaje, tales como la altura significativa, el período y la dirección predominante del oleaje.

3.1. Playas de Levante y Poniente de Benidorm

3.1.1. Localización

Las playas de Poniente y Levante se encuentran en la ciudad de Benidorm, en la provincia de Alicante, dentro de la Comunidad Valenciana, en la costa sureste de España. Ambas playas se caracterizan por un régimen de mareas micromareal, con una marea astronómica máxima de apenas 0.3 metros y un tamaño de grano medio de 0.30 mm, lo que las hace típicas de las costas mediterráneas donde las mareas son mínimas y la energía de las olas es moderada (Aragonés et al., 2015).

Están enclavadas en un sistema litoral cerrado que conforma una ensenada bien definida, protegida naturalmente por diversas formaciones geológicas, como cabos y montañas. La Playa de Poniente, la más extensa con una longitud de 3008 metros, se encuentra al oeste del centro urbano de Benidorm y se extiende desde el puerto hasta la zona de La Cala. Esta playa, orientada al sur, disfruta de aguas relativamente tranquilas debido a la protección que le brindan la Isla de Benidorm y el Cabo Gamell, que atenúan la energía del oleaje proveniente del sureste y este.

Por otro lado, la Playa de Levante, que se extiende a lo largo de 2261 metros al este del casco urbano, está flanqueada por el macizo de la Sierra Helada. A pesar de su orientación similar al sur, recibe una mayor influencia del oleaje, especialmente de las olas que provienen del este y sureste. Sin embargo, la protección natural proporcionada por la Sierra Helada y otras formaciones geográficas mitiga en parte el impacto directo de las olas, reduciendo su energía antes de que lleguen a la costa (Aragonés et al., 2015; Toledo et al., 2023).

La *Posidonia oceánica* es una fanerógama marina fundamental para la protección de las costas mediterráneas españolas, cuya presencia ha sido confirmada en las playas de Poniente y Levante en Benidorm (Medina et al., 2001). Este valioso ecosistema desempeña una función esencial en la dinámica costera, ya que sus densas praderas no solo refuerzan el lecho arenoso, sino que también incrementan la rugosidad del fondo marino, facilitando así la disipación de la energía de las olas (Gacia et al., 1999). Se ha documentado que las praderas de *Posidonia* son capaces de absorber entre el 30% y el 40% de la energía total del oleaje, lo que contribuye significativamente a la reducción de la erosión costera (Boudouresque y Meinesz, 1982).



Figura 5. Mapa de localización de Playa de Poniente y Playa de Levante. El panel superior izquierdo muestra la ubicación de los sitios de estudio en España. El panel inferior izquierdo presenta un zoom intermedio que resalta la ubicación del punto de extracción de los datos de oleaje. El panel derecho muestra una imagen satelital de las dos playas, destacando la ubicación de la zona donde se realizó la regeneración de arena en la Playa de Poniente, así como ejemplos de líneas de costa derivadas de satélite marcadas en rojo.

3.1.2. Clima marítimo

La Figura 6 presenta un resumen del análisis estadístico del clima marítimo en tres componentes principales. En la Figura 6a se muestra una rosa que ilustra las direcciones predominantes del oleaje a lo largo del año. La Figura 6b contiene un diagrama de dispersión que analiza la relación entre la altura significante de la ola (Hs) y el período de pico (Tp). Por último, la Figura 6c incluye un diagrama de cajas que describe la variabilidad mensual de la altura significante de la ola.

En la rosa de oleaje (Figura 6a), se observa que aproximadamente el 24% del oleaje proviene del Este-Sureste (ESE), con alturas cercanas a los 3 metros. Asimismo, el 21% de las olas provienen del Este, el 15% del Sur, y alrededor del 12% del Este-Noreste (ENE). Esta distribución responde a la orientación sur de las playas y a la protección natural proporcionada por la Isla de Benidorm, el Cabo Gamell, y el macizo de la Sierra Helada. En particular, la isla reduce el oleaje en la Playa de Levante en un 10%, mientras que la Sierra Helada disminuye el impacto del oleaje en esta playa en un 50% en comparación con la Playa de Poniente. Estos factores geográficos protegen ambas playas del oleaje procedente del Este, mitigando el impacto de las tormentas, lo cual las diferencia de otras áreas del litoral español. Durante el verano, las olas provienen

principalmente del ESE, mientras que en invierno se orientan hacia el Sur, Sureste, Este y ENE (Amores et al., 2020; Aragonés et al., 2015; Toledo et al., 2023).

En la fuente de datos GOW, las alturas de ola (Hs) varían desde 0.07 hasta 3.25 metros en condiciones extremas, mientras que los períodos pico (Tp) oscilan entre 1.5 y 11.63 segundos. El diagrama de dispersión (Figura 6b) revela que las alturas de ola más frecuentes se encuentran en el rango de 0.4 a 0.7 metros, con períodos pico de entre 5 y 7 segundos. Estas características son típicas de un entorno marítimo cerrado como el mar Mediterráneo, donde predomina el mar de viento sobre el mar de fondo

Finalmente, el diagrama de cajas (Figura 6c) muestra una clara estacionalidad en el oleaje, destacando que los meses más energéticos se concentran entre octubre y abril, cuando se registran las mayores alturas y períodos de ola. En contraste, los meses de mayo a septiembre presentan condiciones climáticas más favorables, con oleaje de menor intensidad.



Figura 6. Características del oleaje en un punto cerca de la Playa de Poniente y la Playa de Levante. (a) Rosa de oleaje de Hs para todos los meses, (b) Diagrama de dispersión de Hs-Tp, y (c) Boxplot de Hs y Tp.

3.1.3. Series de líneas de costa

En la subsección 2.3.2 se detalló la metodología para derivar, a partir de los datos satelitales, la serie temporal de la posición de la línea de costa medida desde una línea de referencia para cada una de las playas. Esta serie temporal se representa gráficamente en la Figura 7, que muestra los cambios en la línea de costa durante el período de estudio (1984 - 2022). El panel superior de la figura corresponde a la Playa de Levante y el panel inferior a la Playa de Poniente. En ambas figuras, el eje X representa el tiempo, y el eje Y muestra la posición a lo largo de la playa, con la parte superior de la figura indicando las posiciones occidentales (W) y la parte inferior las orientales (E). La escala de colores indica la posición de la línea de costa en metros, con tonos anaranjados y rojos representando las posiciones más avanzadas (mayor ancho de playa) y tonos verdes y azules las posiciones más retrocedidas (menor ancho de playa). A continuación se describe la dinámica general de las playas:

- La Playa de Levante revela una pronunciada forma aconchada (Figura 7a), donde las posiciones más avanzadas se encuentran en los extremos de la playa, con máximos de 240 metros, mientras que la zona central exhibe las posiciones más retrocedidas, con valores alrededor de 80 metros. A lo largo del período de estudio, los cambios han sido mínimos, especialmente en la zona central y este, donde el ancho de la playa se ha mantenido estable con un mínimo de 50 metros. Esto coincide con los hallazgos de Aragonés (2015), quien documenta una pérdida de solo 4 metros de ancho de playa en el centro y este de la Playa de Levante entre 1956 y 2021, y una pérdida más significativa de 12 metros en el extremo oeste durante el período de 1992 al 2007.
- La Playa de Poniente presenta un patrón diferente (Figura 7b). Las posiciones más avanzadas se encuentran en el extremo oeste, con máximos de hasta 550 metros. En contraste, las posiciones más retrocedidas se sitúan en el extremo este, con valores alrededor de 370 metros, antes de la importante regeneración de arena en 1991. Este retroceso significativo en la zona este, resultado de procesos erosivos, motivó la intervención realizada en 1991, que incluyó la construcción de un espigón y la aportación de 710.847 m³ de arena a lo largo de 1305 metros (MOPT, 1991). Esta actuación resultó en un incremento de aproximadamente 70 metros en el ancho de la playa, como se evidencia en la figura 7b.

No obstante, tras la regeneración, se produjo un notable retroceso en la mitad oriental de la playa, con una pérdida promedio de 30 metros entre 1992 y 2007. En contraste, las zonas central y occidental mostraron una estabilidad relativa, con algunas áreas experimentando acreciones de hasta 20 metros durante el mismo período.

Además, el aporte de arena realizado en 1991 impactó negativamente en la pradera de *Posidonia oceánica*, que retrocedió más de 100 metros y descendió entre 3 y 5 metros en profundidad. Esta pérdida de vegetación submarina afectó la capacidad de estabilización natural de la playa, contribuyendo a una mayor pendiente del perfil costero. Como resultado, la playa perdió más de 20 metros de ancho en los dos años siguientes a la regeneración, con un patrón de regresión que continuó, aunque en menor medida (Aragonés et al., 2015).

Entre 2007 y 2021, las tasas de erosión se suavizaron considerablemente, con pérdidas que no superaron los 10 metros. Este cambio en la dinámica costera se debe a una disminución en la frecuencia de oleajes provenientes del este, lo que redujo la erosión y la inclinación de la playa (Toledo et al., 2022).

En resumen, la Playa de Levante mantiene una forma en planta de equilibrio estático con avance en los extremos y estabilidad en la zona central. En contraste, la Playa de Poniente ha experimentado una tendencia erosiva histórica, exacerbada por la intervención de 1991 y la falta de aportes sedimentarios. Aunque los ritmos de erosión se moderaron entre 2007 y 2021, la playa permanece cerca de su límite funcional (Toledo et al., 2022).



Figura 7. Series de tiempo de la posición de la línea de costa en metros para: a) Playa de Levante y b) Playa de Poniente.

3.2. Playa de Moncofa

3.2.1. Localización

La Playa de Moncofa está situada en la costa mediterránea de la Comunidad Valenciana, entre los puertos de Castellón y Sagunto (Figura 8). Este tramo costero, en la provincia de Castellón, se caracteriza por su entorno urbano y sus playas artificiales, las cuales están segmentadas por espigones que protegen la línea de costa. Orientada hacia el sureste, la playa se extiende a lo largo de 330 metros y está situada en una región con régimen micromareal, lo que implica mínimas variaciones en el nivel del mar. El sedimento de la playa varía desde arena fina hasta guijarros, lo que refleja la diversidad de materiales depositados en esta zona costera (Gomes da Silva et al., 2024; Rodríguez-Santalla et al., 2021).



Figura 8. Mapa de localización de la Playa de Moncofa. El panel superior izquierdo muestra la ubicación del sitio de estudio en el mapa de España. El panel inferior izquierdo ofrece un acercamiento intermedio que resalta el punto de extracción de los datos de oleaje. El panel derecho presenta una imagen satelital de la playa, con ejemplos de líneas de costa derivadas de satélite, indicadas en rojo.

3.2.2. Clima marítimo

La Figura 9 presenta un resumen del análisis estadístico del clima marítimo en tres componentes principales. En la Figura 9a se muestra una rosa que ilustra las direcciones predominantes del oleaje a lo largo del año. La Figura 9b contiene un diagrama de dispersión que analiza la relación entre la altura significante de la ola (Hs) y el período de pico (Tp). Por último, la Figura 9c incluye un diagrama de cajas que describe la variabilidad mensual de la altura significante de la ola.

La rosa de oleaje direccional, muestra que las tormentas predominantes se originan del Este-Noreste (ENE), con alturas significativas de ola que alcanzan cerca de 4 m aproximadamente el 25% del tiempo (Figura 9). A continuación, se encuentran las olas provenientes del Este y del Sureste, que representan alrededor del 20% del tiempo (Figura 9a). Durante el verano, las olas predominantes provienen del Sureste, mientras que en invierno, la dirección principal es del ENE, evidenciando un patrón estacional claro. La configuración costera y el régimen bimodal de olas en la región provocan una rotación estacional de la línea de costa (Figura 9c), un fenómeno similar al observado en otras playas de la costa mediterránea española (Castelle et al., 2020; Ojeda & Guillén, 2008). Las alturas significativas de ola (Hs) y los períodos de ola (Tp) varían entre 0.03 y 4.0 m y entre 0.5 y 11.5 s, respectivamente.

El diagrama de dispersión (Figura 9b) revela que las alturas de ola (Hs) comprendidas entre 0.2 y 0.3 metros, junto con períodos pico (Tp) entre 5 y 5.5 segundos, son las más frecuentes.

En la fuente de datos GOW, las alturas de ola (Hs) varían desde 0.01 hasta 3.98 metros en condiciones extremas, mientras que los períodos pico (Tp) oscilan entre 1.5 y 12.5 segundos. El diagrama de dispersión (Figura 9b) revela que las alturas de ola (Hs) comprendidas entre 0.2 y 0.3 metros, junto con períodos pico (Tp) entre 5 y 5.5 segundos, son las más frecuentes. Estas características son típicas de un entorno marítimo cerrado como el mar Mediterráneo, donde predomina el mar de viento sobre el mar de fondo

Finalmente, el diagrama de cajas (Figura 9c) muestra una clara estacionalidad en el oleaje, destacando que los meses más energéticos se concentran entre octubre y abril, cuando se registran las mayores alturas y períodos de ola. En contraste, los meses de mayo a septiembre presentan condiciones climáticas más favorables, con oleaje de menor intensidad.



Figura 9. Características del oleaje en un punto cerca de la Playa de Moncofa. (a) Rosa de oleaje de Hs para todos los meses, (b) Diagrama de dispersión de Hs-Tp, y (c) Boxplot de Hs y Tp.

3.2.3. Series de líneas de costa

La Figura 10 ilustra la evolución temporal de la posición de la línea de costa durante el período de estudio (2017-2020). En esta figura, el eje X representa el tiempo, mientras que el eje Y muestra la posición a lo largo de la playa, con la parte superior indicando las posiciones al norte y la parte inferior al sur. La escala de colores refleja la posición de la línea de costa en metros, donde los tonos anaranjados y rojos representan las posiciones más avanzadas (mayor ancho de playa), y los tonos verdes y azules, las posiciones más retrocedidas (menor ancho de playa).

Durante el periodo de estudio, se observan tanto avances como retrocesos en diferentes áreas de la playa. Aunque no se distingue un patrón claro o

consistente a lo largo del tiempo, estos datos son representativos de la variabilidad natural de la línea de costa.



Figura 10. Series de tiempo de la posición de la línea de costa para la playa de Moncofa.

4. RESULTADOS

Esta sección analiza el desempeño de los EBSEM YA09 y JA21. Se presentan los resultados de cada modelo utilizando la serie temporal completa de los datos de observación disponibles (Sección 4.1 y 4.2).

4.1. YA09

En la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos con el modelo YA09 para la Playa de Levante (Figura 11a), la Playa de Poniente (Figura 11b) y la Playa de Moncofa (Figura 11c). Cada apartado de la figura está compuesto por un panel superior que muestra la energía de las olas incidentes y un panel inferior que representa las predicciones del modelo, donde la línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados. Además, cada panel incluye un recuadro con las métricas estadísticas (RMSE, ρ , RP, MSS y NS) derivadas de la comparación entre las observaciones y el modelo, junto con sus parámetros de calibración (C⁺, C⁻, a y b).





Figura 11. Serie temporal de la energía el oleaje incidente (panel superior) y resultados del modelo YA09 utilizando el conjunto completo de datos (panel inferior) para: (a) Playa de Levante, (b) Playa de Poniente, (c) Playa de Moncofa. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

A partir de la Figura 11, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En los gráficos resultado presentados en la Figura 11 se puede apreciar cómo la respuesta de la costa a las variaciones del oleaje se manifiesta en los resultados en las tres playas. Se puede observar un patrón consistente: durante los periodos de oleaje intenso, como en las tormentas, la línea de costa experimenta procesos significativos de erosión, mientras que en los periodos de calma, cuando la energía del oleaje disminuye, la playa tiende a recuperarse mediante procesos de acreción. Este comportamiento, evidente en los tres sitios de estudio, subraya la influencia determinante del oleaje en la dinámica costera que refleja el modelo.
- En la <u>Playa de Levante</u> (Figura 11a), se analizaron 38 años de datos desde 1984 hasta 2022. En este caso, los resultados del modelo muestran una respuesta excesivamente rápida, lo que lleva a una sobrestimación de la velocidad de cambio de la línea de costa real. Mientras que las mediciones reales indican posiciones mínimas alrededor de los 100 metros, el modelo predice retrocesos cerca de los 95 metros. Esto se refleja en los parámetros estadísticos, con un RMSE de 4.61 m, un p de 0.22, un RP de 0.05, un MSS de 0.09 y un NS de 0.05, lo que indica una correlación baja entre los datos simulados y los observados. Las discrepancias sugieren que el modelo no logra captar adecuadamente la relación entre el forzamiento y la respuesta de la costa, probablemente debido a la complejidad del entorno costero y la resolución insuficiente de los datos. Las causas de esta falta de precisión se discutirán en detalle en la Sección 5.4.
- Para la <u>Playa de Poniente</u> (Figura 11b), también se analizaron 38 años de datos desde 1984 hasta 2022. Aquí, el modelo YA09 no logra capturar con precisión la evolución de la línea de costa, especialmente después de la gran

regeneración efectuada en 1991. Antes de 1991, la playa mostraba fluctuaciones de alrededor de 10 metros; después de la regeneración, se estableció un nuevo equilibrio con fluctuaciones en torno a una posición media de 120 metros aproximadamente. Cabe señalar que el modelo YA09 asume una relación lineal para definir la condición de equilibrio, lo cual resulta constante durante toda la simulación. Sin embargo, como se concluyó en el estudio de Jaramillo et al. (2020), donde se presentó una variación al modelo YA09, la relación de equilibrio debe evolucionar en el tiempo cuando ocurren cambios significativos en el volumen de sedimentos, ya sea por ganancia o pérdida neta. Los resultados actuales muestran un RMSE de 14.61 m, un p de 0.28, un RP de 0.08, un MSS de 0.24 y un NS de -1.31, lo que indica un desempeño insuficiente del modelo en esta playa. Para mejorar la precisión, sería necesario ajustar la relación de equilibrio para reflejar la variación natural antes y después de la regeneración, así como durante el proceso de relleno.

En la <u>Playa de Moncofa (Figura 11c)</u>, se analizaron 3 años de datos, desde 2017 hasta 2020. En esta playa, los cambios en la posición de la línea de costa son especialmente notables, manifestándose a lo largo de días, semanas e incluso meses, debido a la influencia de eventos de tormenta y variaciones estacionales. El modelo presentó un rendimiento moderado, con un RMSE de 3.75 m, un p de 0.42, un RP de 0.18, un MSS de 0.32 y un NS de 0.18. Aunque estos resultados son mejores en comparación con las otras playas, la correlación entre las mediciones y las simulaciones sigue siendo relativamente baja. Este desempeño intermedio podría ser atribuible a la naturaleza específica de los procesos sedimentarios y dinámicas de esta playa, que el modelo captura parcialmente. Sin embargo, estos resultados también sugieren la necesidad de incorporar datos adicionales para mejorar la representación de la evolución costera en Moncofa y aumentar la precisión del modelo.

La Tabla 1 resume las estadísticas cuantitativas, los parámetros de calibración y el grado máximo de variabilidad de la línea de costa obtenidos en todos los sitios de estudio. El grado máximo de variabilidad de la línea de costa se refiere a la diferencia máxima entre las posiciones más avanzadas y más retrocedidas de la línea de costa a lo largo del tiempo. Este valor se denota como Δ_m .

Tabla 1. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para las zonas de estudio seleccionadas. Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C+, C-), parámetros empíricos (a, b) y grado máximo de variabilidad de la línea de costa (Δ_m).

	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	$C^{-}(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)	$\Delta_{\mathbf{m}}(\mathbf{m})$
Playa de Levante	4.61	0.22	0.05	0.09	0.05	6.07×10^{-2}	5.98×10^{-1}	0.46	55.12	~40
Playa de Poniente	14.61	0.28	0.08	0.24	-1.31	1.04×10^{-2}	7.77×10^{-2}	0.02	4.13	~60
Playa de Moncofa	3.75	0.42	0.18	0.32	0.18	1.26×10^{-3}	3.57×10^{-2}	0.63	30.49	~25

4.2.JA21

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos con el modelo JA21 para la Playa de Levante (Figura 12a), la Playa de Poniente (Figura 12b) y la Playa de Moncofa (Figura 12c). Cada apartado de la figura está compuesto por un panel superior que muestra la potencia del oleaje incidente y un panel inferior en el que la línea roja representa las predicciones del modelo, mientras que los círculos grises corresponden a los datos observados. Además, cada panel incluye un recuadro que presenta las métricas estadísticas (RMSE, ρ , RP, MSS y NS) derivadas de la comparación entre las observaciones y el modelo, junto con sus parámetros de calibración (L⁺, L⁻, a y b).





Figura 12. Serie temporal de la potencia del oleaje incidente (panel superior) y resultados del modelo JA21 utilizando el conjunto completo de datos (panel inferior) para: (a) Playa de Levante, (b) Playa de Poniente, (c) Playa de Moncofa. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

A partir de la Figura 12, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

En la <u>Playa de Levante</u> (Figura 12a), los resultados mostraron que el modelo logró reproducir parcialmente la variabilidad de la orientación de la línea de costa en comparación con las mediciones. Aunque entre 2005 y 2010 las predicciones del modelo superaron los valores observados, el modelo logró mantener la tendencia de rotación. Además, se observa una gran dispersión en las mediciones antes de 2015, cuando se utilizaban datos de Landsat, mientras que después de 2015, con el uso de datos de Sentinel, el ajuste del modelo mejora significativamente. En cuanto al análisis cuantitativo, el RMSE de 0.19° es aceptable, aunque los valores de ρ de 0.34, RP de 0.11, MSS de 0.26 y NS de 0.08 indican una correlación débil entre el modelo y las observaciones. Cabe destacar que en Levante la orientación de la costa varía apenas 1 grado, lo que limita la capacidad del modelo para correlacionar los cambios en la direccionalidad y potencia del oleaje con la respuesta de la playa.

Adicionalmente, se evidencia que la dinámica de la playa está dominada por fluctuaciones a escala estacional e interanual. Estas variaciones reflejan la influencia de factores tanto climáticos como oceanográficos, que afectan la rotación de la línea de costa a lo largo del tiempo.

- En la <u>Playa de Poniente</u> (Figura 12b), el modelo reprodujo de manera razonable la variabilidad en la rotación de la línea de costa, aunque no logró replicar las variaciones en la orientación causadas por procesos no naturales, como el gran aporte de arena realizado en mayo de 1991. Aun así, el modelo intenta capturar los efectos de este aporte y la posterior difusión de sedimentos. Los resultados cuantitativos muestran un rendimiento satisfactorio, con un RMSE de 0.38°, ρ de 0.76, RP de 0.57, MSS de 0.75 y NS de 0.56. Es importante señalar que en Poniente la orientación de la costa varía en más de 3 grados, lo que facilita que el modelo correlacione mejor las

dinámicas de oleaje con la respuesta costera. Este caso se analiza con mayor detalle en la subsección 5.1. Igualmente se observan fluctuaciones dominadas por escalas estacionales e interanuales, similares a las encontradas en la Playa de Levante.

En la <u>Playa de Moncofa (Figura 12b)</u>, el modelo mostró un rendimiento sólido (Figura 12c), reproduciendo la variabilidad general en la rotación de la línea de costa. La significativa variación en la orientación de la playa, aproximadamente 13 grados, facilita al modelo correlacionar de manera más efectiva los cambios en la dirección y potencia del oleaje con la respuesta de la playa. A pesar de esto, el modelo muestra un RMSE relativamente alto de 1.35^o, lo cual refleja el grado de rotación considerable de la playa. Sin embargo, los valores de ρ (0.85), RP (0.72), MSS (0.84) y NS (0.72) indican un buen ajuste entre las predicciones del modelo y las observaciones.

La Tabla 2 ofrece un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas, los parámetros de calibración y el grado máximo de orientación de la línea de costa para todos los sitios de estudio. El grado máximo de orientación de la línea de costa se define como la diferencia entre la orientación más hacia el sentido de las agujas del reloj y la orientación más hacia el sentido contrario. Este valor se denota como α_m .

Tabla 2. Resumen de las estadísticas cuantitativas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo JA21 para las zonas de estudio seleccionadas. Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C+, C-), parámetros empíricos (a, b) y variabilidad máxima de la orientación de la línea de costa (α_m).

	RMSE (°)	ρ	RP	MSS	NS	L^+ (m ⁻² h ⁻²)	L^{-} $(m^{-2}h^{-2})$	а	b (°)	$\alpha_{\rm m}(^{\circ})$
Playa de Levante	0.19	0.34	0.11	0.26	0.08	7.32×10^{-7}	5.84×10^{-6}	-4.65	987.77	0.90
Playa de Poniente	0.38	0.76	0.57	0.75	0.56	3.28×10^{-7}	6.25×10^{-4}	6.43	-978.04	3.13
Playa de Moncofa	1.35	0.85	0.72	0.84	0.72	3.18×10^{-4}	9.10×10^{-4}	3.51	-340.01	12.34

5. DISCUSIONES

Esta sección examina el desempeño de los EBSEM YA09 y JA21, presentando sus resultados en distintos contextos: En primer lugar, se evalúa cómo es el desempeño de los modelos en períodos más cortos que excluyen variaciones no naturales (Sección 5.1). A continuación, se analizan los resultados al considerar medias móviles (Sección 5.2), y se examina el impacto de mejorar la resolución de los datos satelitales en el desempeño de los modelos (Sección 5.3). Finalmente, en la Sección 5.4, se presenta un resumen que recoge y discute las limitaciones identificadas en los modelos a lo largo del análisis.

5.1. Resultados de los modelos excluyendo variaciones no naturales en la Playa de Poniente

En la sección 4.1 se analizaron los resultados del modelo YA09, que mostró un desempeño insuficiente para la Playa de Poniente, principalmente debido a su incapacidad para reflejar adecuadamente los cambios ocasionados por la gran regeneración de arena en 1991. Por esta razón, en esta sección se evalúa el desempeño del modelo en un periodo de 30 años, excluyendo esas variaciones no naturales. Se considera, por tanto, únicamente el periodo posterior a la regeneración, con el objetivo de obtener un análisis más preciso del comportamiento de la playa después de este evento.

La Figura 13 muestra los resultados obtenidos para la Playa de Poniente utilizando el modelo YA09 (Figura 13a) y el modelo JA21 (Figura 13b). El modelo YA09 muestra un desempeño moderado (Figura 13a), con una mejora notable en el ajuste en comparación con los resultados obtenidos utilizando el periodo completo de medición (Figura 11b). Las estadísticas cuantitativas indican un RMSE de 3.37 m, un ρ de 0.47, un RP de 0.22, un MSS de 0.34 y un NS de 0.22.

En contraste, el modelo JA21 se ajusta de manera mucho más precisa a las mediciones, reproduciendo con éxito la recuperación de la playa tras la regeneración de arena, y manteniendo este ajuste hasta alcanzar el equilibrio en 2010 y posteriormente (Figura 13b). Las estadísticas cuantitativas reflejan un buen rendimiento, con un RMSE de 0.19°, un p de 0.94, un RP de 0.88, un MSS de 0.94 y un NS de 0.88. Estos resultados no solo son satisfactorios, sino que superan claramente los obtenidos al considerar toda la serie temporal, subrayando la superioridad del modelo en este escenario.



Figura 13. Resultados obtenidos para la Playa de Poniente tras la regeneración de arena, utilizando (a) el modelo YA09 y (b) el modelo JA21. La línea roja representa las predicciones del modelo, mientras que los círculos grises corresponden a los datos observados.

La presenta un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Poniente. Se incluyen tanto los resultados basados en el registro completo de datos (1984-2022) como los obtenidos a partir de 1992, excluyendo las variaciones no naturales generadas por la regeneración de 1991. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del modelo YA09, mientras que en la parte inferior se presentan los del modelo JA21.

Tabla 3 presenta un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Poniente. Se incluyen tanto los resultados basados en el registro completo de datos (1984-2022) como los obtenidos a partir de 1992, excluyendo las variaciones no naturales generadas por la regeneración de 1991. En la parte superior de la tabla se muestran los resultados del modelo YA09, mientras que en la parte inferior se presentan los del modelo JA21.

Tabla 3. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con los modelos YA09 y JA21 para la Playa de Poniente, utilizando el registro completo y la versión ajustada que excluye variaciones no naturales. Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C⁺, C⁻, L⁺ y L⁻) y parámetros empíricos (a, b).

YA09	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	$C^{-}(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)
1984 – 2022	14.61	0.28	0.08	0.24	-1.31	1.04×10^{-2}	7.77×10^{-2}	0.02	4.13
1992 – 2022	3.37	0.47	0.22	0.34	0.22	7.64×10^{-4}	1.96×10^{-3}	0.02	3.51

Estefanía Giraldo Franco

JA21	RMSE (°)	ρ	RP	MSS	NS	L^+ $(m^{-2}h^{-2})$	L^{-} $(m^{-2}h^{-2})$	а	b (°)
1984 – 2022	0.38	0.76	0.57	0.75	0.56	3.28×10^{-7}	6.25×10^{-4}	6.43	-978.04
1992 – 2022	14.61	0.28	0.08	0.24	-1.31	1.04×10^{-2}	7.77×10^{-2}	0.02	4.13

5.2. Resultados del modelo YA09 considerando medias móviles

Para probar la sensibilidad del modelo YA09 a las variaciones en la frecuencia de los datos, se ha incorporado el cálculo de medias móviles semestrales y anuales. Las medias móviles son una herramienta ampliamente utilizada en el análisis de series temporales para suavizar fluctuaciones y reducir el ruido de los datos. Esta técnica permite identificar las tendencias subyacentes a largo plazo al filtrar las variaciones a corto plazo que pueden enmascarar señales significativas.

En este análisis, se optó por aplicar medias móviles a las playas de Levante y Poniente debido a la disponibilidad de conjuntos de datos extensos. Para la Playa de Poniente, los análisis se enfocarán exclusivamente en el período posterior a la regeneración de 1991.

5.2.1. Playa de Levante

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos para la Playa de Levante utilizando la serie temporal completa (1984-2022) en tres escenarios: sin aplicar suavizado (Figura 14a), suavizada mediante una media móvil semestral (Figura 14b) y suavizada mediante una media móvil anual (Figura 14c).

La media móvil semestral mostró un mejor desempeño en comparación con la media móvil anual (Figura 14b), al capturar con mayor precisión las variaciones a corto plazo en la posición de la línea de costa. Al aplicar la media móvil semestral, el RMSE se redujo a 3.46 m, mientras que el coeficiente de correlación p aumentó a 0.46, acompañado de mejoras en el RP (0.21), el MSS (0.37) y el NS (0.20). Estos resultados indican una mayor precisión en el ajuste del modelo a los datos observados. En contraste, la media móvil anual produjo un aplanamiento excesivo de la curva (Figura 14c), con un RMSE de 3.49 m, un coeficiente de correlación para representar adecuadamente las fluctuaciones estacionales y otros cambios significativos.





Figura 14. Resultados del modelo YA09 en la Playa de Levante utilizando el conjunto completo de datos, con los siguientes ajustes: (a) Serie temporal sin suavizar (a) serie temporal suavizada con una media móvil semestral y (b) serie temporal suavizada con una media móvil anual. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

La Tabla 4 ofrece un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Levante con el modelo YA09, utilizando el registro completo de datos (1984-2022). Se presentan los resultados tanto para la serie temporal sin suavizado como para las series suavizadas mediante una Media Móvil Semestral (MMS) y una Media Móvil Anual (MMA).

Tabla 4. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para la
Playa de Levante, utilizando el registro completo de datos sin suavizar, suavizados con una Media Móvil
Semestral (MMS) y suavizados con una Media Móvil Anual (MMA). Se presentan: Error cuadrático medio
(RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (p), coeficiente de determinación (R²), Mielke skill score y
coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), constantes de proporcionalidad (C ⁺ , C ⁻) y parámetros empíricos (a, b).

	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	$C^{-}(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)
Serie temporal sin suavizar	4.61	0.22	0.05	0.09	0.05	6.07×10^{-2}	5.98×10^{-1}	0.46	55.12
Serie temporal suavizada con MMS	3.46	0.46	0.21	0.37	0.20	4.16×10^{-4}	1.31×10^{-3}	0.01	2.77
Serie temporal suavizada con MMA	3.49	0.04	0.00	0.00	0.00	4.50×10^{-1}	1.16×10^{-3}	2.00	236.08

5.2.2. Playa de Poniente

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos para la Playa de Poniente utilizando la serie temporal completa (1984 - 2022) en tres escenarios: sin aplicar suavizado (Figura 15a), suavizada mediante una media móvil semestral (Figura 15b) y suavizada mediante una media móvil anual (Figura 15c).

La aplicación de medias móviles mejoró el ajuste del modelo en comparación con el uso de los datos sin suavizar, donde el desempeño fue notablemente débil. En particular, la media móvil semestral (Figura 15b) logró reducir el error promedio a un RMSE de 3.32 m, con una correlación moderada de 0.51, un RP de 0.26, un MSS de 0.34 y un NS de 0.25. Aunque la media móvil anual también disminuyó el error a un RMSE de 2.90 m, su correlación fue ligeramente inferior, con un p 0.49, un RP de 0.24, un MSS de 0.33 y un NS de 0.23. A pesar de que ambas técnicas de suavización mejoraron el ajuste del modelo, la media móvil semestral mostró un rendimiento superior en comparación con la anual (Figura 15c), comportamiento similar al observado en la Playa de Levante. Sin embargo, el ajuste sigue siendo relativamente limitado, lo que indica que, si bien la suavización mejora la precisión, aún no captura completamente la complejidad de las dinámicas costeras.



Figura 15. Resultados del modelo YA09 en la Playa de Poniente utilizando el conjunto completo de datos, con los siguientes ajustes: (a) Serie temporal sin suavizar (a) serie temporal suavizada con una media móvil

semestral y (b) serie temporal suavizada con una media móvil anual. La línea roja indica los resultados simulados y los círculos grises corresponden a los datos observados.

La Tabla 5 ofrece un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Poniente con el modelo YA09, utilizando los datos del periodo 1992-2022, tras la regeneración de arena. Se presentan los resultados tanto para la serie temporal sin suavizado como para las series suavizadas mediante una Media Móvil Semestral (MMS) y una Media Móvil Anual (MMA).

Tabla 5. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para la Playa de Poniente, utilizando el registro completo de datos sin suavizar, suavizados con una Media Móvil Semestral (MMS) y suavizados con una Media Móvil Anual (MMA). Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C⁺, C⁻) y parámetros empíricos (a, b).

	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	C^{-} $(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)
Serie temporal sin suavizar	14.61	0.28	0.08	0.24	-1.31	1.04×10^{-2}	7.77×10^{-2}	0.02	4.13
Serie temporal suavizada con MMS	3.32	0.51	0.26	0.34	0.25	1.18×10^{-3}	5.45×10^{-3}	0.02	3.10
Serie temporal suavizada con MMA	2.90	0.49	0.24	0.33	0.23	1.16 × 10 ⁻³	4.62×10^{-3}	0.01	2.91

5.3. Resultados de YA09 con datos de alta resolución

Tal como se ha mencionado antes, los datos utilizados para el análisis de la línea de costa previo al 2015 se obtuvieron mediante el satélite Landsat, que proporcionaba una resolución espacial de unos 30 metros. A partir de 2015, el satélite Sentinel entró en operación, ofreciendo una resolución mejorada de 10 metros. Este cambio en la resolución de los datos representa una mejora significativa en la calidad y precisión de las imágenes satelitales disponibles para el análisis costero. En la sección anterior, se realizó un análisis que abarcó el período completo, utilizando datos con ambas resoluciones. Sin embargo, en esta subsección, se centra específicamente en el período posterior a 2015 para evaluar el desempeño del modelo con los datos de alta resolución proporcionados por Sentinel. El objetivo es examinar si la mayor resolución mejora la capacidad del modelo YA09 para capturar las dinámicas de la línea de costa y evaluar cómo responde a las condiciones mejoradas de los datos.

5.3.1. Playa de Levante

La Figura 16 presenta los resultados obtenidos para la Playa de Levante utilizando los datos satelitales de Sentinel desde 2015 hasta 2022, en tres escenarios: sin suavizado (Figura 16a), suavizados con una media móvil semestral (Figura 16b) y con una media móvil anual (Figura 16c).

El modelo YA09 mostró un mejor desempeño con los datos posteriores a 2015 en comparación con el análisis del período completo, presentado en la subsección 5.2.1. Esta mejora se refleja en una reducción del RMSE a 2.77 m y un aumento en el coeficiente de correlación (ρ) a 0.35. Además, se registró un RP de 0.12, un MSS de 0.21 y un NS de 0.12, lo que indica una mejora en las predicciones, aunque cualitativamente el ajuste sigue siendo limitado (Figura 16a).

En cuanto a la suavización de los datos mediante medias móviles, la aplicación de una media móvil semestral (Figura 16b) mejoró significativamente el ajuste del modelo en comparación con los datos sin suavizar. Se obtuvo un RMSE de 1.27 m, un ρ de 0.72, un RP de 0.52, un MSS de 0.69 y un NS de 0.52, lo que representa una mejora considerable en las predicciones frente a los datos brutos.

A diferencia de lo observado en la Sección 5.2, donde la media móvil anual no ofrecía mejoras significativas respecto a la semestral, en este caso, la media móvil anual (Figura 16c) proporcionó un ajuste superior. Los resultados mostraron un RMSE de 0.96 m, un p de 0.75, un RP de 0.56, un MSS de 0.72 y un NS de 0.56. Ambas técnicas de suavización mejoran los resultados en comparación con los datos originales, pero la media móvil anual ofrece un ajuste más preciso que la media móvil semestral. A pesar de estas mejoras, la calidad del ajuste sigue siendo insuficiente para capturar con precisión la dinámica costera.





Figura 16. Resultados del modelo YA09 en la Playa de Levante para el periodo medido por el satélite Sentinel, considerando: (a) Datos sin suavizar; (b) Datos suavizados con media móvil semestral; y (c) Datos suavizados con una media móvil anual. Los paneles (b) y (c) presentan un zoom en el eje Y, con un rango de 110 a 130 metros, lo que permite una visualización más detallada de la variabilidad de las mediciones y el desplazamiento del modelo.

La proporciona un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Levante con el modelo YA09, utilizando los datos medidos por el satélite Sentinel entre 2015 y 2022. Se incluyen los resultados tanto para la serie temporal sin aplicar suavizado como para las series suavizadas mediante una Media Móvil Semestral (MMS) y una Media Móvil Anual (MMA).

Tabla 6 proporciona un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Levante con el modelo YA09, utilizando los datos medidos por el satélite Sentinel entre 2015 y 2022. Se incluyen los resultados tanto para la serie temporal sin aplicar suavizado como para las series suavizadas mediante una Media Móvil Semestral (MMS) y una Media Móvil Anual (MMA).

Tabla 6. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para la Playa de Levante, utilizando datos satelitales de Sentinel posteriores a 2015: sin suavizar, suavizados con una media móvil semestral (MMS) y con una media móvil anual (MMA). Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C⁺, C⁻) y parámetros empíricos (a, b).

	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	$C^{-}(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)
Serie temporal sin suavizar	2.77	0.35	0.12	0.21	0.12	8.02×10^{-2}	5.99×10^{-1}	0.46	54.08
Serie temporal suavizada con MMS	1.27	0.72	0.52	0.69	0.52	5.41×10^{-4}	3.98×10^{-3}	0.19	23.73
Serie temporal suavizada con MMA	0.96	0.75	0.56	0.72	0.56	1.24×10^{-4}	6.80×10^{-3}	0.07	11.25

5.3.2. Playa de Poniente

La Figura 17 presenta los resultados obtenidos para la Playa de Poniente utilizando los datos satelitales de Sentinel desde 2015 hasta 2022, en tres

escenarios: sin suavizado (Figura 17a), suavizados con una media móvil semestral (Figura 17b) y con una media móvil anual (Figura 17c).

Al igual que en el análisis de la Playa de Levante, el ajuste del modelo mejora al considerar el período con la resolución mejorada de las imágenes satelitales (2015-2022). Los parámetros estadísticos obtenidos para este período son: un RMSE de 3.97 m, un coeficiente de correlación (ρ) de 0.45, un RP de 0.20, un MSS de 0.20 y un NS de 0.16 (Figura 17a).

Al aplicar la media móvil semestral (Figura 17b), se observa una mejora en la mayoría de los parámetros estadísticos en comparación con la media móvil anual, excepto en el RMSE. Los resultados para la media móvil semestral muestran un RMSE de 2.65 m, un ρ de 0.56, un RP de 0.31, un MSS de 0.56 y un NS de 0.12. En contraste, la media móvil anual (Figura 17c) presenta un RMSE de 2.12 m, un ρ de 0.50, un RP de 0.25, un MSS de 0.45 y un NS de 0.07. Aunque la media móvil anual reduce el RMSE, la media móvil semestral ofrece mejores resultados en la mayoría de los otros indicadores estadísticos.



Figura 17. Resultados del modelo YA09 en la playa de Poniente para el periodo medido por el satélite Sentinel, considerando: (a) Datos sin suavizar; (b) Datos suavizados con media móvil semestral; y (c) Datos suavizados con una media móvil anual.

La Tabla 7 proporciona un resumen detallado de las estadísticas cuantitativas y los parámetros de calibración obtenidos para la Playa de Poniente con el modelo

YA09, utilizando los datos medidos por el satélite Sentinel entre 2015 y 2022. Se incluyen los resultados tanto para la serie temporal sin aplicar suavizado como para las series suavizadas mediante una Media Móvil Semestral (MMS) y una Media Móvil Anual (MMA).

Tabla 7. Resumen de las estadísticas y parámetros de calibración obtenidos con el modelo YA09 para la Playa de Poniente, utilizando datos satelitales de Sentinel posteriores a 2015: sin suavizar, suavizados con una media móvil semestral (MMS) y con una media móvil anual (MMA). Se presentan: Error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (ρ), coeficiente de determinación (R²), *Mielke skill score* y coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS), constantes de proporcionalidad (C⁺, C⁻) y parámetros empíricos (a, b).

	RMSE (m)	ρ	RP	MSS	NS	C^+ $(m^{-2}s^{-1})$	C^{-} $(m^{-2}s^{-1})$	а	b (m)
Serie temporal sin suavizar	3.97	0.45	0.20	0.20	0.16	$8.99 imes 10^{-5}$	1.43×10^{-2}	1.12	139.08
Serie temporal suavizada con MMS	2.65	0.56	0.31	0.56	0.12	7.19×10^{-4}	4.73×10^{-3}	0.09	11.72
Serie temporal suavizada con MMA	2.12	0.50	0.25	0.45	0.07	1.52×10^{-3}	1.44×10^{-3}	0.00	0.96

5.4. Incertidumbres y limitaciones del modelo

El análisis de los resultados de los modelos YA09 y JA21 revela varias limitaciones significativas que afectan la precisión de las simulaciones. Estas limitaciones se pueden clasificar en al menos cuatro puntos críticos que impactan directamente la capacidad del modelo para reflejar la dinámica real de las playas estudiadas: las intervenciones antropogénicas en playas urbanas, la incertidumbre en la medición debido a la resolución de imágenes satelitales, la variabilidad en la orientación de la línea de costa en playas con características específicas y la influencia de elementos en el fondo marino, como la presencia de vegetación (p.ej. *Posidonia oceánica*), sistemas arrecifales, lajas rocosas, entre otros . A continuación, se detallan estas limitaciones:

Intervenciones antropogénicas

En playas urbanas como Levante y Poniente, las intervenciones frecuentes, como la redistribución de sedimentos y las adecuaciones en el ancho de la playa, afectan la dinámica costera de maneras que el modelo no incorpora. Por ejemplo, en la Playa de Poniente, el modelo no captura adecuadamente el desequilibrio causado por la regeneración de arena en mayo de 1991 (Toledo et al., 2023). Aunque el modelo reproduce la difusión de sedimentos y la rotación de la playa hasta alcanzar un nuevo equilibrio, no refleja completamente el impacto inicial de la regeneración. Esta capacidad de capturar la dinámica de difusión, aunque limitada en ciertos eventos específicos, indica que el modelo puede representar algunos aspectos de la dinámica costera de manera efectiva.

Incertidumbre en la medición

El desempeño predictivo del modelo se ve afectado por la resolución del dato de partida, como las imágenes satelitales utilizadas. Hasta 2015, se emplearon imágenes derivadas de las ediciones Landsat con una resolución de 30 metros, mientras que a partir de esa fecha se utilizan imágenes derivadas del satélite Sentinel con una resolución de 10 metros. Esta variación en la resolución contribuye a la incertidumbre en las mediciones, como se observa en la alta dispersión de los datos antes de 2015 (Acker et al., 2013; Payra et al., 2023).

Variabilidad en la orientación de la línea de costa

La variabilidad en la orientación de la línea de costa presenta desafíos significativos para los modelos en diferentes playas. En la Playa de Moncofa, por ejemplo, la alta variabilidad en la orientación de la línea de costa, con un ángulo de hasta 12.34°, se debe a su menor longitud y al tamaño del grano de sedimento (Turki et al., 2013b). Esta variabilidad extrema contrasta con la de playas más largas, que suelen responder a la rotación de nanera más lenta. En la Playa de Moncofa, los cambios en la orientación de la línea de costa son más notables a lo largo de días, semanas e incluso meses, debido a eventos de tormenta y variaciones estacionales. En contraste, la Playa de Poniente experimenta fluctuaciones en escalas de tiempo más prolongadas, desde estacionales hasta interanuales, lo que complica la adaptación del modelo a su dinámica costera prolongada.

Por otro lado, la Playa de Levante presenta un escenario diferente. El desempeño limitado del modelo JA21 en esta playa se relaciona con la orientación máxima de la línea de costa ($\alpha_m = 0.90^\circ$), que es inferior a un grado y genera un alto nivel de incertidumbre. Entre 2005 y 2010, el modelo mostró predicciones que excedieron las mediciones reales, un fenómeno atribuido a una disminución en la duración promedio de las tormentas durante ese período (Toledo et al., 2023). Este factor, no integrado en el modelo, contribuye a la dificultad de capturar las dinámicas costeras precisas. A pesar de estas limitaciones, el modelo JA21 logró capturar la tendencia general de rotación observada en la playa, pero la capacidad del modelo para reflejar con precisión las características específicas de la Playa de Levante sigue siendo limitada.

Influencia de elementos en el fondo marino

La presencia de *Posidonia oceánica* en las playas de Benidorm, como Levante y Poniente, introduce una complejidad adicional que los EBSEM existentes no logran capturar. La posidonia actúa como un filtro del oleaje, modificando la propagación de las olas, y su estacionalidad afecta la fricción ejercida sobre el oleaje en diferentes épocas del año. Este factor, que varía con el tiempo, no está considerado en los modelos empleados, los cuales asumen parámetros de

calibración constantes que infieren la morfología de la playa y ponderan la propagación del oleaje de manera constante (Abreu et al., 2020).

CONCLUSIONES

Este estudio evaluó el desempeño de los modelos EBSEM, YA09 y JA21 en las playas de Levante y Poniente en Benidorm, así como en la Playa de Moncofa en Castellón, con el objetivo de analizar sus limitaciones y mejorar su aplicabilidad en la gestión costera. Mediante la comparación entre los resultados modelados y las series temporales extensas obtenidas de fuentes satelitales, se obtuvieron conclusiones significativas sobre cómo cada modelo responde a la dinámica de la línea de costa y sus interacciones con el oleaje. A continuación, se presentan los principales hallazgos en función de los objetivos específicos del estudio:

- 1. En relación con el primer objetivo específico, que buscaba encontrar el ajuste óptimo de los modelos mediante diferentes parámetros y su cuantificación con métricas estadísticas, se concluye que:
 - En la Playa de Levante, el modelo YA09 sobreestimó la respuesta de la línea de costa, con un RMSE de 4.61 m y una correlación de Pearson (p) de 0.22, indicando una representación limitada de la evolución temporal. sobreestimación sugiere incapacidad Esta una para captar adecuadamente las variaciones reales debido a su estructura que asume condiciones de equilibrio estáticas. Por otro lado, el modelo JA21 mostró un RMSE más bajo de 0.19º y una correlación de 0.34. Aunque el ajuste de JA21 mejoró significativamente con los datos de Sentinel a partir de 2015, la correlación sigue siendo débil, y la orientación de la línea de costa varía apenas 1 grado, lo que limita la capacidad del modelo para capturar cambios precisos en la dinámica costera.
 - En la <u>Playa de Poniente</u>, el modelo YA09 mostró un desempeño deficiente, con un RMSE de 14.61 m y una correlación de Pearson (ρ) de 0.28, especialmente después de la regeneración de arena en 1991. Este modelo, que asume una relación lineal constante para la condición de equilibrio, no logró captar adecuadamente la evolución post-regeneración ni las fluctuaciones naturales de la línea de costa. En contraste, el modelo JA21 reprodujo razonablemente la rotación de la línea de costa, con un RMSE de 0.38° y una correlación de 0.76, aunque no reflejó completamente las variaciones provocadas por el aporte de arena de 1991. La mayor variabilidad en la orientación de la costa, que supera los 3 grados, facilitó una mejor correlación entre las dinámicas de oleaje y la respuesta
 - En la <u>Playa de Moncofa</u>, El modelo YA09 mostró un rendimiento moderado, con un RMSE de 3.75 m y una correlación de Pearson (ρ) de 0.42. Aunque superó las prestaciones observadas en las otras playas, la correlación entre las predicciones y las observaciones sigue siendo relativamente baja, reflejando la dificultad del modelo para capturar

adecuadamente las dinámicas rápidas y variables de la playa, influenciadas por eventos de tormenta y variaciones estacionales. Por otro lado, el modelo JA21 presentó un rendimiento sólido, con un RMSE de 1.35º y una correlación de 0.85, logrando una buena correlación entre las predicciones y las observaciones gracias a la significativa variación en la orientación de la playa, que facilita la relación entre los cambios en la dirección y potencia del oleaje con la respuesta costera.

- 2. En cuanto al segundo objetivo específico, relacionado con el análisis de las incertidumbres asociadas a las intervenciones no naturales y al origen de los datos de entrada a los modelos, se concluyó lo siguiente:
 - Las intervenciones humanas, como la regeneración de arena de 1991 en la Playa de Poniente, afectaron negativamente el desempeño del modelo YA09. Al excluir estos eventos, el ajuste del modelo mejoró, con un RMSE de 3.37 m y una correlación de Pearson (ρ) de 0.47, indicando una mejora en la representación de la evolución de la línea de costa posterior a la intervención. En contraste, el modelo JA21 mostró una notable superioridad en este contexto, con un RMSE de 0.19º y una correlación de 0.94, capturando con precisión la recuperación de la playa tras la regeneración y manteniendo un ajuste excelente. Estos resultados destacan la capacidad superior de JA21 para adaptarse a los cambios en la dinámica costera tras eventos significativos en comparación con YA09.
 - En la Playa de Levante, la aplicación de medias móviles mejoró notablemente el ajuste del modelo YA09 en comparación con el uso de datos sin suavizar. La media móvil semestral redujo el RMSE a 3.46 m y aumentó la correlación (ρ) a 0.46, mientras que la media móvil anual, a pesar de ofrecer un ajuste más preciso con un RMSE de 0.96 m y un ρ de 0.75. Por otro lado, en la Playa de Poniente, las medias móviles también mejoraron el ajuste del modelo, con la media móvil semestral logrando un RMSE de 3.32 m y una correlación de 0.51, superior a la media móvil anual que presentó un RMSE de 2.90 m y una correlación de 0.49.
 - El análisis de los datos de alta resolución de Sentinel (2015 2022) para los modelos YA09 en la Playa de Levante y la Playa de Poniente mostró mejoras significativas en comparación con los datos de Landsat previos a 2015. En la Playa de Levante, el uso de datos de alta resolución y la aplicación de una media móvil anual lograron reducir el RMSE a 0.96 m y mejorar la correlación (ρ) a 0.75, aunque el ajuste aún es limitado para capturar la dinámica costera. En la Playa de Poniente, los datos de Sentinel también mejoraron el desempeño del modelo, con un RMSE de 3.97 m y una correlación de 0.45 sin suavizado. La media móvil semestral mostró un RMSE de 2.65 m, superior a la media móvil anual, que presentó

un RMSE de 2.12 m, aunque con resultados inferiores en otros parámetros. Estos resultados indican que, mientras que los datos de alta resolución proporcionan un ajuste mejorado, la suavización y la elección de la técnica adecuada pueden influir en la precisión del modelo.

- 3. En relación con el tercer objetivo específico, que buscaba discutir las limitaciones de los modelos e identificar enfoques de modelado que puedan mejorar su aplicabilidad, los hallazgos fueron:
 - Intervenciones antropogénicas: Las intervenciones humanas, como la regeneración de arena en la Playa de Poniente en 1991, afectaron significativamente la precisión de los modelos. Aunque el modelo JA21 capturó parcialmente la difusión de los sedimentos y la rotación de la playa, no reflejó completamente el impacto inicial de la intervención. Para mejorar la capacidad de los modelos en futuros escenarios, es esencial incorporar mecanismos de ajuste dinámico que puedan simular eventos de regeneración de forma más realista.
 - Incertidumbre en la medición: La variación en la resolución de las imágenes satelitales utilizadas antes y después de 2015 fue un factor crucial. Los datos de menor resolución (Landsat) presentaron una mayor dispersión, lo que afectó la calidad de las simulaciones. Esto subraya la necesidad de contar con datos de alta resolución para obtener predicciones más precisas.
 - Influencia de elementos en el fondo marino: La Posidonia oceánica presente en las playas de Benidorm, que modifica la propagación de las olas y afecta la fricción del oleaje de manera estacional, no fue incorporada en los modelos. Esta omisión limita la capacidad de los modelos para representar la dinámica costera de forma precisa. Para mejorar la aplicabilidad futura, se recomienda integrar estos factores en los modelos, lo que permitirá una mayor representatividad en entornos costeros donde la vegetación marina juega un papel importante.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Utilizar los parámetros de mejor ajuste obtenidos en el presente estudio para los modelos YA09 y JA21 con el fin de predecir la evolución futura de la línea de costa en las playas de Levante y Poniente. Los resultados se compararán con los datos satelitales que seguirá proporcionando el Grupo de Cartografía Geoambiental y de Teledetección (CGAT) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), para validar el desempeño de los modelos en escenarios reales.
- Explorar el uso de otros EBSEM, como los propuestos por Davidson et al. (2013), Splinter et al. (2014) y Lim et al. (2022) para el transporte transversal de sedimentos, así como los modelos de rotación de línea de costa propuestos por Turki et al. (2013) y Blossier et al. (2017), aplicándolos a los casos de estudio analizados en este trabajo.
- Evaluar la aplicabilidad de los EBSEM en playas con diferentes características morfológicas, como playas de fango o de guijarros, para determinar su versatilidad y precisión en diferentes contextos morfodinámicos.

7. REFERENCIAS

- Abdulsalam, M. B. (2024). Forcasting of shoreline rotation variability at different beaches around the world.
- Abreu, T., Parreño-Mas, B., & Pinto-Faria, J. (2020). Coastal management risk analysis of an embayed beach in Majorca island. *SN Applied Sciences*, 2(9). <u>https://doi.org/10.1007/s42452-020-03325-6</u>
- Acker, J. G., Williams, R. P., Chiu, L. S., Ardanuy, P. E., Miller, S. W., Schueler,
 C. F., Vachon, P. W., & Manore, M. J. (2013). *Remote Sensing from Satellites*. <u>https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127509772</u>
- Amores, A., Marcos, M., Carrió, D. S., & Gómez-Pujol, L. (2020). Coastal impacts of Storm Gloria (January 2020) over the north-western Mediterranean. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20(7), 1955–1968. <u>https://doi.org/10.5194/nhess-20-1955-2020</u>
- Antolínez, J. A. A., Méndez, F. J., Anderson, D., Ruggiero, P., & Kaminsky, G. M. (2019). Predicting Climate-Driven Coastlines With a Simple and Efficient Multiscale Model. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124(6), 1596–1624. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JF004790</u>
- Aragonés, L., García-Barba, J., García-Bleda, E., López, I., & Serra, J. C. (2015). Beach nourishment impact on Posidonia oceanica: Case study of Poniente Beach (Benidorm, Spain). Ocean Engineering, 107, 1–12. <u>https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.005</u>
- Biausque, M., Senechal, N., Blossier, B., & Bryan, K. R. (2016). Seasonal Variations in Recovery Timescales of Shorelines on an Embayed Beach. Journal of Coastal Research, 75(sp1), 353–357. <u>https://doi.org/10.2112/SI75-071.1</u>
- Boudouresque, C. F., & Meinesz, A. (1991). Découverte de l'herbier de Posidonie. Parc National de Port-Cros Part Naturel Regional de la Corse GIS Posidonie.
- Bryan, K.R., Foster, R., MacDonald, I., 2013. Beach Rotation at Two Adjacent Headland-Enclosed Beaches. J Coast Res 165, 2095–2100. <u>https://doi.org/10.2112/si65-354.1</u>

- Castelle, B., Bujan, S., Marieu, V., & Ferreira, S. (2020). 16 years of topographic surveys of rip-channelled high-energy meso-macrotidal sandy beach. Scientific Data, 7(1), 410. <u>https://doi.org/10.1038/s41597-020-00750-5</u>
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Ferreira, S., Parisot, J.-P., Capo, S., Sénéchal, N., & Chouzenoux, T. (2014). Equilibrium shoreline modelling of a highenergy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Marine Geology*, 347, 85– 94. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003</u>
- Davidson, M. A., Splinter, K. D., & Turner, I. L. (2013). A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coastal Engineering*, 73, 191–202. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002</u>
- de Vriend, H. J., Zyserman, J., Nicholson, J., Roelvink, J. A., Péchon, P., & Southgate, H. N. (1993). Medium-term 2DH coastal area modelling. Coastal Engineering, 21(1), 193–224. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90050-I</u>
- Duan, Q., Gupta, V., & Sorooshian, S. (1993). A Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76, 501–521. <u>https://doi.org/10.1007/BF00939380</u>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Gobal Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. Water Resources Research - WATER RESOUR RES, 28, 1015–1031. <u>https://doi.org/10.1029/91WR02985</u>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3), 265–284. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4</u>
- Gacia, E., Granata, T. C., & Duarte, C. M. (1999). An approach to measurement of particle flux and sediment retention within seagrass (Posidonia oceanica) meadows. Aquatic Botany, 65(1–4), 255–268. <u>https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00044-3</u>
- Gomes da Silva, P., Jara, M. S., Medina, R., Beck, A. L., & Taji, M. A. (2024). On the use of satellite information to detect coastal change: Demonstration case on the coast of Spain. *Coastal Engineering*, 191. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104517</u>

- Hanson, H., Kraus, N.C., 1991. Numerical simulation of shoreline change at Lorain, Ohio. J Waterw Port Coast Ocean Eng 117, 1–18
- Hanson, H., & Larson, M. (1990). NUMERICAL MODELING OF LONGSHORE AND CROSS-SHORE SAND TRANSPORT. Journal of Coastal Research, 407–429. <u>http://www.jstor.org/stable/44868648</u>
- Harley, M. D., Turner, I.L., Short, A.D., Ranasinghe, R., 2011. A reevaluation of coastal embayment rotation: The dominance of cross-shore versus alongshore sediment transport processes, Collaroy-Narrabeen Beach, southeast Australia. J Geophys Res Earth Surf 116. <u>https://doi.org/10.1029/2011JF001989</u>
- Jara, M. S., González, M., & Medina, R. (2015). Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile. *Coastal Engineering*, *99*, 1–14. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.02.006</u>
- Jaramillo, C., González, M., Medina, R., & Turki, I. (2021a). An equilibrium-based shoreline rotation model. *Coastal Engineering*, 163. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103789</u>
- Jaramillo, C., Jara, M. S., González, M., & Medina, R. (2021b). A shoreline evolution model for embayed beaches based on cross-shore, planform and rotation equilibrium models. Coastal Engineering, 169. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103983</u>
- Jaramillo, C., Jara, M. S., González, M., & Medina, R. (2020). A shoreline evolution model considering the temporal variability of the beach profile sediment volume (sediment gain / loss). *Coastal Engineering*, 156. <u>https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103612</u>
- Klein, A., Benedet, L., Schumacher, D.H., 2002. Short-term beach rotation processes in distinct headland bay beach systems. J Coast Res 18, 442–458.
- Kriebel, D. L., & Dean, R. G. (n.d.). CHAPTER ONE HUNDRED EIGHT Beach and Dune Response to Severe Storms.
- Larson, M., & Kraus, N. C. (1995). Prediction of cross-shore sediment transport and temporal scales at different spatial. In *Marine Geology* (Vol. 126).

- Lim, C., Kim, T.-K., & Lee, J.-L. (2022). Evolution model of shoreline position on sandy, wave-dominated beaches. *Geomorphology*, *415*, 108409. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108409</u>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8(1). <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6</u>
- Medina, J. R., Tintoré, J., & Duarte, C. M. (2001). Las praderas de Posidonia oceanica y la regeneración de playas. Revista de OBRAS Publicas, 148(3409), 31–43.
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M. I., Pekel, J.-F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), 12876. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-</u> <u>w</u>
- Miller, J. K., & Dean, R. G. (2004). A simple new shoreline change model. Coastal Engineering, 51(7), 531–556. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006</u>
- MOPT, 1991. Proyecto de Liquidacion de Obras de Emergencia de La Playa de Poniente de Benidorm (Alicante). General Service of Coasts of the State, Madrid.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. In *Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Issue 3).
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282– 290. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6</u>
- Ojeda, E., & Guillén, J. (2008). Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. Marine Geology, 253(1), 51–62. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2008.03.010
- Palalane, J., Fredriksson, C., Marinho, B., Larson, M., Hanson, H., Coelho, C., 2016. Simulating cross-shore material exchange at decadal scale. Model application. Coastal Engineering 116, 26–41. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.05.007</u>

- Payra, S., Sharma, A., & Verma, S. (2023). *Application of remote sensing to study* forest fires (pp. 239–260). <u>https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99262-</u> <u>6.00015-8</u>
- Pelnard-Considère, R., 1957. Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. Journées de l'hydraulique 4, 289–298.
- Robinet, A., Idier, D., Castelle, B., & Marieu, V. (2018). A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: The LX-Shore model. Environmental Modelling and Software, 109, 1–16. <u>https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.010</u>
- Rodríguez-Santalla, I., Roca, M., Martínez-Clavel, B., Pablo, M., Moreno-Blasco, L., & Blázquez, A. M. (2021). Coastal changes between the harbours of Castellón and Sagunto (Spain) from the mid-twentieth century to present. Regional Studies in Marine Science, 46, 101905. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101905
- Smith, R. K., & Bryan, K. R. (2007). Monitoring Beach Face Volume with a Combination of Intermittent Profiling and Video Imagery. *Journal of Coastal Research*, 2007(234), 892–898. <u>https://doi.org/10.2112/04-0287.1</u>
- Splinter, K. D., Turner, I. L., & Davidson, M. A. (2013). How much data is enough? The importance of morphological sampling interval and duration for calibration of empirical shoreline models. *Coastal Engineering*, 77, 14–27. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.02.009</u>
- Swart, D. H. (1974). A Schematization of Onshore-Offshore Transport. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197538772
- Thomas, T., Phillips, M.R., Williams, A.T., 2010. Mesoscale evolution of a headland bay: Beach rotation processes. Geomorphology 123, 129–141. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.018
- Toledo, I., Pagán, J. I., López, I., & Aragonés, L. (2023). Causes of the different behaviour against erosion: Study case of the Benidorm Beaches (1956–2021). *Marine Georesources and Geotechnology*, *41*(6), 648–661. https://doi.org/10.1080/1064119X.2022.2084003
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., & Gonzalez, M. (2013a). An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Marine Geology*, *346*, 220–232. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.002</u>

- Turki, I., Medina, R., Gonzalez, M., & Coco, G. (2013b). Natural variability of shoreline position: Observations at three pocket beaches. *Marine Geology*, 338, 76–89. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2012.10.007</u>
- Vitousek, S., Barnard, P. L., & Limber, P. (2017). Can beaches survive climate change? In Journal of Geophysical Research: Earth Surface (Vol. 122, Issue 4, pp. 1060–1067). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1002/2017JF004308
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Limber, P., Erikson, L., & Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(4), 782–806. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016JF004065
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). Subannual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coastal Engineering, 150, 160–174. <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004</u>
- Yates, M. L., Guza, R. T., & O'Reilly, W. C. (2009). Equilibrium shoreline response: Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(9). <u>https://doi.org/10.1029/2009JC005359</u>
- Yates, M. L., Guza, R. T., O'Reilly, W. C., Hansen, J. E., & Barnard, P. L. (2011). Equilibrium shoreline response of a high wave energy beach. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C4). <u>https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010JC006681</u>
- Zhang, J., Larson, M., Ge, Z.P., 2020. Numerical model of beach profile evolution in the nearshore. J Coast Res 36, 506–520.