



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS *LONGSHORE* Y *CROSS-SHORE*

Trabajo realizado por:
Lucas de Freitas Pereira

Dirigido:
Mauricio González Rodríguez
Camilo Jaramillo Cardona

Titulación:
**Máster Universitario
en Costas y Puertos**

Santander, Septiembre de 2022

TRABAJO FIN DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

Durante el último año me propuse realizar el Máster en Costas y Puertos de la Universidad de Cantabria conociendo la notoriedad de la institución y de su personal. Realizar el máster fue un reto motivador y, principalmente, desafiante. Por más que la iniciativa haya partido de mí, no lo hubiera hecho de igual manera si no fuera por la ayuda de diversas personas.

En primer lugar, agradezco a mis tutores por toda la atención, paciencia y dedicación hacia mí. Desde el primer momento, Mauricio González y Camilo Jaramillo fueron muy solícitos hacia mi persona, proporcionándome siempre toda ayuda posible por sus inmedibles conocimientos y, para mi lo más importante, por creer en mi capacidad. Gracias a Mauricio por haberme concedido el honor de realizar prácticas en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria.

Agradezco a los profesores que me guiaron por esta jornada. La notoriedad dada al máster reluce en los profesionales que se empeñan por hacerlo funcionar. Las horas dedicadas a las clases y a los trabajos transforman la cabeza de uno, apasionan al estudiante del mundo de la ingeniería costera. Cada minuto invertido en este máster merece la pena. A mis compañeros por cruzar este laborioso año a mi lado. Compartir los conocimientos y visiones de mundo con personas de diferentes partes de España, y del mundo, enriquece el aprendizaje y hace más leve los momentos complicados del trayecto. Gracias por vuestro apoyo y respeto durante el máster.

Agradezco a personas que hicieron que este estudio fuera posible, facilitando los códigos con sus modelos implementados: al Grupo de Clima Marino y Cambio Climático de IHCantabria por el IH-LANS; al Grupo Coast and Ocean Collective de la Universidad de Auckland por la disponibilidad de la componente *cross-shore* del modelo CoSMoS-COAST; al Dr. José Antonio Álvarez Antolinez por facilitarnos los códigos del modelo COCOONED; a la Dra. Kristen Splinter por aportarnos el modelo *cross-shore* ShoreFor.

Por último, pero no menos importante, agradezco a dos personas que hicieron que hoy yo pueda estar realizando este sueño y que estuvieron a mi lado (aunque no físicamente) incondicionalmente aspirando solamente por mí felicidad. Gracias a Isabel Freitas, mi madre, por apoyarme en todos los desafíos y trayectorias de mi vida, por invertir en mi formación y no medir esfuerzos en ayudarme a ser feliz. Gracias Isabel Gijón Criado, mi compañera de vida, por estar a mi lado en cada momento, por creer en mi persona y darme razones para seguir y creer en mí mismo, por la paciencia que tuviste este año conmigo, por cuidarme en los momentos de dificultad, especialmente los que pasamos este año; no tengo palabras para expresar la gratitud que tengo por todo lo que haces, literalmente, me salvaste la vida. Muchas gracias.

RESUMEN

Uno de los desafíos de la ingeniería de costas actual es desarrollar herramientas que ayuden en el manejo y planificación de las zonas costeras. La posición de la línea de costa es una variable dinámica, sometida a diversos tipos de forzamiento, que permite cuantificar tasas de acreción y erosión relacionada a procesos de distintas escalas espacio-temporales (Jaramillo et al., 2020).

Actualmente, existen diversas propuestas de modelos de evolución de la posición de la línea de costa y, entre estas propuestas, modelos heurísticos simplificados que infieren procesos relacionados al transporte transversal de sedimentos, o *cross-shore*, y procesos relacionados con el transporte longitudinal de sedimentos, o *longshore*. Estas propuestas se destacan por las escalas espaciales y temporales que abarcan y por el esfuerzo computacional reducido que requieren. En los últimos 5 años, diversos grupos de investigación propusieron modelos que integran componentes *cross-shore* y *longshore*, conocidos como modelos híbridos (p. ej. Alvarez-Cuesta et al., 2021a; Antolínez et al., 2019; Robinet et al., 2018a; Vitousek et al., 2017a).

En este estudio se evalúan tres modelos híbridos de evolución de la posición de línea de costa distintos que han sido publicados en los últimos años, siendo éstos los modelos CoSMoS-COAST (Vitousek et al., 2017a), COCOONED (Antolínez et al., 2019) e IH-LANS (Alvarez-Cuesta et al., 2021a), además de una propuesta de modelo híbrido desarrollada en la presente investigación utilizando como componente *cross-shore* el modelo ShoreFor modificado (Splinter et al., 2014a).

La evaluación de los modelos se realiza mediante el caso de estudio del taller Shoreshop (Montaño et al., 2020), en el cual se comparó el desempeño de diversos modelos híbridos mediante la aplicación de estos a la playa de Tairúa en Nueva Zelanda. Los datos del taller están disponibles en la página web dispuesta en el manuscrito. Los autores disponen datos de series temporales de oleaje, nivel del mar y posición de la línea de costa.

Para realizar la evaluación de los modelos seleccionados en este estudio, se determinó una metodología en 3 etapas. Primero, realizar un análisis de sensibilidad de los modelos frente a variaciones de los parámetros de calibración de las componentes *longshore* y *cross-shore*. A continuación, se determinó una metodología de calibración homogénea y común a todos los

modelos – incluso a los que presentan técnicas de asimilación de datos. Por último, se realizó la aplicación de cada modelo, utilizando los parámetros calibrados, al caso de la playa de Tairúa.

Los resultados del análisis de sensibilidad demostraron el efecto de cada variable sobre el modelado de la línea de costa. Para el caso de estudio planteado, los modelos presentaron mayor sensibilidad a la componente *cross-shore*.

Para evaluar la calidad de los ajustes durante el proceso de calibración, se utilizaron como métrica el error cuadrático medio (*RMSE*) y el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r). El proceso de calibración resultó en ajustes de curvas con correlación moderada por los modelos CoSMoS-COAST, COCOONED e IH-LANS y correlación alta para el modelo ShoreFor adaptado. El menor error cuadrático medio fue presentado por el modelo IH-LANS ($RMSE = 3.88\text{ m}$).

A través del proceso de calibración fue posible aplicar los modelos al caso de estudio planteado. Se llevaron a cabo simulaciones para el período de enero de 1999 hasta diciembre de 2099. Los resultados obtenidos demostraron la capacidad de los modelos en reproducir el comportamiento medio de las observaciones. Se identificaron afecciones a los resultados al cambiar los datos del oleaje del período de reanálisis para el período de predicción. El modelo propuesto, ShoreFor adaptado, presentó períodos en que el comportamiento difería de los demás modelos, no obstante, el comportamiento medio se asemeja al de los demás.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se propone para futuras líneas de investigación:

- Implementar las técnicas de asimilación de datos a los modelos COCOONED y ShoreFor adaptado en modelo híbrido para optimizar el proceso de calibración.
- Aplicar los modelos a una zona costera dónde los efectos *longshore* sean más importantes y poder evaluar la habilidad de los modelos en reproducir dichos procesos.
- Evaluar la incorporación de otras propuestas de componentes *cross-shore* y *longshore*.
- Optimizar el desempeño de los modelos CoSMoS-COAST, COCOONED y ShoreFor adaptado para reducir el esfuerzo computacional y permitir procesos de calibración y simulación más eficientes.

- Explorar la aplicabilidad de los modelos híbridos simplificados en ambientes costeros diversos sometidas a morfodinámicas complejas.

ABSTRACT

One of the challenges of current coastal engineering is to develop tools that help in the management and planning of coastal zones. The shoreline position is a dynamic variable, subject to various types of forcing, which allows quantifying rates of accretion and erosion related to processes of different spatio-temporal scales (Jaramillo et al., 2020).

Nowadays, there are many proposals of shoreline evolution models and, among these proposals, simplified heuristic models that infer processes related to cross-shore and longshore sediment transport, stand out for the range of spatial and temporal scales they cover and for the reduced computational effort they require. In the last five years, many research groups have proposed models that couple cross-shore and longshore components, the so-called hybrid models (ex. Alvarez-Cuesta et al., 2021a; Antolínez et al., 2019; Robinet et al., 2018a; Vitousek et al., 2017a).

In this study, three different shoreline evolution hybrid models published in recent years are evaluated, being them CoSMoS-COAST (Vitousek et al., 2017a), COCOONED (Antolínez et al., 2019) and IH-LANS (Alvarez-Cuesta et al., 2021a). In addition, a new proposal of hybrid model is evaluated, by coupling the modified cross-shore model ShoreFor (Splinter et al., 2014a) in a hybrid model approach.

The evaluation of the models is carried out through the study case of the workshop Shoreshop (Montaño et al., 2020), in which the performance of various hybrid models were compared by applying them to the Tairúa beach in New Zealand. The data used in the workshop is available on the web page provided in the paper. The authors provide data on waves, sea level and shoreline position.

To conduct the evaluation of the selected models in the current study, a methodology was determined in three stages. First, perform a sensitivity analysis of the models against variations in the calibration parameters of the longshore and cross-shore components. Next, a homogeneous and common calibration methodology was determined for all the models – even those that present data assimilation techniques. Finally, the application of each model was carried out, using the calibrated parameters, to the case of Tairúa beach.

The results of the sensitivity analysis demonstrated the effect of each variable on the shoreline modelling. For the proposed case study, the models showed greater sensitivity to the cross-shore term.

To quantify the quality of the calibration process, the root mean square error (*RMSE*) and Pearson's correlation coefficient (ρ_r) were used as metrics. The calibration process resulted in curve fits with moderate correlation for CoSMoS-COAST, COCOONED and IH-LANS models and high correlation for the adapted ShoreFor model. The lowest root mean square error was presented by IH-LANS model (*RMSE* = 3.88 m).

Through the calibration process, it was possible to apply the models to the proposed study case. Simulations were conducted for the period from January 1999 to December 2099. The results obtained demonstrated the ability of the models to reproduce the average behavior of the shoreline data. Affects on the results were identified by changing the wave data from the hindcast period to the forecast period. The proposed model, adapted ShoreFor, presented periods in which the behavior differed from the other models; however, the average behavior is similar to that of the other models.

Considering the results obtained, it is proposed for future research lines:

- Implement data assimilation techniques to COCOONED and ShoreFor adapted into a hybrid model to optimize the calibration process.
- Apply the models to a coastal zone where the longshore effects are more important to be able to evaluate the ability of the models to reproduce these processes.
- Evaluate the coupling of different proposals for cross-shore and longshore components.
- Optimize the performance of CoSMoS-COAST, COCOONED and ShoreFor adapted into a hybrid model to reduce computational effort and enable more efficient calibration and simulation processes.
- Explore the applicability of simplified hybrid models in diverse coastal environments subject to complex morphodynamics.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ORGANIZACIÓN DEL ESTUDIO.....	2
2. MODELOS DE EVOLUCIÓN DE LÍNEA DE COSTA	4
2.1. MODELOS HÍBRIDOS	6
3. METODOLOGÍA	10
3.1. ECUACIÓN GENERAL DE LOS MODELOS.....	10
3.2. MODELO CoSMoS-COAST	13
3.3. MODELO COCOONED.....	16
3.4. MODELO IH-LANS.....	19
3.5. MODELO SHOREFOR INTEGRADO EN MODELO HÍBRIDO.....	20
3.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	23
3.7. CALIBRACIÓN.....	23
4. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	27
4.1. OLEAJE.....	28
4.2. NIVEL DEL MAR.....	33
4.3. MORFOLOGÍA DE LA LÍNEA DE COSTA	35
4.4. DOMINIO NUMÉRICO	37
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	40
5.1.1. <i>Modelo CoSMoS-COAST</i>	40
5.1.2. <i>Modelo COCOONED</i>	44
5.1.3. <i>Modelo IH-LANS</i>	48
5.1.4. <i>Modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido</i>	51
5.2. CALIBRACIÓN.....	54
5.2.1. <i>Modelo CoSMoS-COAST</i>	54
5.2.2. <i>Modelo COCOONED</i>	56
5.2.3. <i>Modelo IH-LANS</i>	58
5.2.4. <i>Modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido</i>	60
5.3. PREDICCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA 1999 - 2099	62
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	71
REFERENCIAS	74

1. Introducción

Las zonas costeras, desde los inicios de las civilizaciones conocidas, son ambientes que proporcionan el desarrollo humano, debido a los recursos naturales disponibles, al transporte marítimo, a factores culturales y recreativos (Neumann et al., 2015). En España, aproximadamente un 40% de la población reside actualmente en municipios costeros (“Análisis y Prospectiva-serie Pesca nº 5. Demografía de la población costera en España,” 2020), lo que enmarca la necesidad de conocer y predecir la evolución morfodinámica de estas zonas.

La posición de la línea de costa es una variable dinámica, sometida a distintos forzamientos y, a partir de ella, se cuantifican tasas de erosión y acreción relacionadas a procesos de diferentes escalas espacio-temporales (Jaramillo, 2020).

Conocer la evolución de la posición de la línea de costa es un de interés para los organismos tomadores de decisiones en el momento de planificar el uso y gestión de la costa, evaluar los impactos de acciones antropogénicas y del cambio climático, proteger poblaciones costeras, hábitats y patrimonio económico-cultural.

Predecir la evolución de la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo es uno de los desafíos actuales de la ingeniería de costas. En los últimos 5 años, se han desarrollado modelos de evolución de la posición de la línea de costa que incorporan procesos de transporte transversal o *cross-shore* y transporte longitudinal o *longshore* de sedimentos distintas escalas espacio-temporales, llamados de modelos híbridos (e.j. Alvarez-Cuesta et al., 2021a; Antolínez et al., 2019; Robinet et al., 2018; Vitousek et al., 2017). Estos modelos tienen como principales ventajas su tiempo computacional ($O(\text{minutos})$), la incorporación de múltiples escalas temporales (*horas – décadas*) y su estabilidad numérica.

A partir de todo lo anterior se identifica la necesidad de seguir desarrollando y mejorando este tipo de modelos, para lograr mejores predicciones de la posición de la línea de costa en escenarios futuros. En este estudio se evalúan algunas de las propuestas disponibles en la literatura y a su vez, se propone una nueva aproximación de modelo híbrido. Así entonces,

el estudio de los modelos híbridos resulta relevante para la esfera social, económica y ambiental en la que nos encontramos.

1.1. Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo principal el análisis de distintos modelos híbridos de evolución de posición de línea de costa disponibles en la literatura, mediante su aplicación al caso de estudio de Playa Tairúa, Nueva Zelanda. Además, se plantea como objetivos secundarios:

1. Realizar un análisis de sensibilidad de los modelos frente a los parámetros de calibración de los procesos *longshore* y *cross-shore*.
2. Calibrar los parámetros de las componentes *longshore* y *cross-shore* para cada modelo durante un periodo de entrenamiento homogéneo y común a todos, mediante la misma metodología.
3. Comparar las fortalezas, debilidades y capacidades de cada modelo aplicado.

1.2. Organización del estudio

Con la finalidad de organizar el trabajo realizado, el estudio se organiza en 7 capítulos, definidos de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción: en este capítulo se presenta una breve introducción al tema e importancia del presente estudio; planteamiento de los objetivos.

Capítulo 2. Modelos de evolución de línea de costa: breve reseña del estado del arte de los modelos de evolución de línea de costa, donde se define qué son los modelos híbridos y se dispone los modelos encontrados por el autor en la bibliografía.

Capítulo 0. Metodología: presentación de los modelos seleccionados para la realización del estudio; explicación de las formulaciones y particularidades de cada modelo; metodologías del análisis de sensibilidad y calibración de los modelos.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Capítulo 4. Descripción del caso de estudio: descripción de los datos utilizados en el caso de estudio; determinación del dominio numérico planteado.

Capítulo 5. Resultados y discusión: exposición y comentarios sobre los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, calibración y simulación utilizada para la comparación entre los modelos.

Capítulo 6 Erro! Fonte de referência não encontrada.. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. Modelos de evolución de línea de costa

La línea de costa suele ser definida como la interfaz física entre tierra y mar, no obstante, esta interfaz cambia de posición constantemente a lo largo del tiempo, debido al transporte transversal (perpendicular a la línea de costa) y longitudinal (paralelo a la línea de costa) de sedimentos, y a las variaciones del nivel del mar (marea astronómica, marea meteorológica, *swash*, *run-up*, ascenso del nivel medio del mar, etc.) (Boak y Turner, 2005). Debido a las complejas interacciones entre las variables físicas que definen la posición de la línea de costa, actualmente todavía no es posible resolver completamente la evolución de esta (Alvarez-Cuesta et al., 2021b).

Los modelos de evolución de línea de costa se pueden agrupar en tres diferentes grupos (Vitousek et al., 2017a):

- I. Modelos 2 o 3-D que resuelven la hidrodinámica del oleaje incidente y transporte de sedimentos resultante, por ejemplo, Delft3D (Lesser et al., 2004) o XBeach (Roelvink et al., 2009).
- II. Modelos heurísticos simplificados que infieren o se basan en procesos, como por ejemplo, modelos de evolución de línea de costa tendentes al equilibrio, para transporte transversal de sedimentos (Davidson et al., 2013a; Jara et al., 2015; Jaramillo et al., 2020; Miller and Dean, 2004; Yates et al., 2009), o modelos *one-line*, para transporte longitudinal de sedimentos (Pelnard-Considère, 1956).
- III. Modelos empíricos basados solamente observaciones, por ejemplo, análisis histórico de líneas de costa (Manno et al., 2022).

Los modelos del tipo I suelen exigir una gran resolución espacial y temporal, siendo adecuados en análisis de corto plazo del orden de tormentas hasta $\mathcal{O}(10^1 \text{ días})$. Por más que la capacidad y las técnicas computacionales hayan permitido que estos tipos de simulaciones lleguen a escalas cada vez mayores, el coste computacional para su empleo en escalas temporales de décadas, todavía resulta limitante, no presentando, algunas veces, ventajas significativas sobre modelos simplificados (Vitousek et al., 2017a).

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Los modelos basados en observaciones (tipo III) buscan utilizar datos de imágenes aéreas, satélites, fotográficos o de otros métodos de medición para determinar formulaciones que puedan permitir la predicción de la línea de costa. Estos métodos suelen ser eficientes para estimar tasas de erosión y acreción en playas, no obstante, no resuelven explícitamente los cambios morfodinámicos. Además, la fiabilidad de estos modelos es proporcional a la cantidad de datos que se incorpora al modelo y, lastimosamente, datos históricos de posición de la línea de costa suelen ser escasos.

En los últimos años, diversos grupos de investigación propusieron diferentes modelos que infieren o se basan en procesos. Estos modelos presentaron cierta fiabilidad en la predicción de la evolución de la línea de costa en escalas espaciales del orden metros hasta kilómetros y escalas temporales multianuales. Además, el costo computacional asociado a estos modelos suele ser bastante inferior a los modelos del tipo I, facilitando los procesos de calibración y validación.

En general, los modelos simplificados del tipo II suelen estar asociados a los procesos a procesos de corto plazo que generan transportes transversales de sedimento y procesos de medio y largo plazo asociados a gradientes del transporte longitudinal de sedimentos.

El presente trabajo se centra en los modelos del tipo II, más específicamente, modelos híbridos (o combinados) que combinan modelos heurísticos tendientes al equilibrio asociados al transporte transversal de sedimentos (*cross-shore*) y modelos simplificados asociados al transporte longitudinal de sedimentos (*longshore*).

Cabe señalar que, entre los modelos heurísticos, existen propuestas de modelos que infieren procesos asociados al transporte longitudinal de sedimento. Entre ellas, se tienen modelos simplificados que reproducen los cambios en la orientación de la línea de costa y son aplicables principalmente a playas encajadas (p. ej. Jaramillo et al., 2021a; Turki et al., 2013). Como integración de ambos procesos se tiene el modelo IH-MOOSE, propuesto por Jaramillo et al. (2021b), el cual integra componente *cross-shore*, de rotación, y expresión de forma en planta parabólica, siendo un modelo netamente tendente al equilibrio.

En el siguiente subapartado serán descritos algunos de los modelos híbridos publicados en los últimos años y sus principales propuestas.

2.1. Modelos Híbridos

Los modelos híbridos buscan incorporar los procesos de corto plazo (horas-días), asociados al transporte transversal de sedimentos, los procesos de largo plazo (años-décadas), asociados al gradiente longitudinal de transporte de sedimentos y los procesos de muy largo plazo como el ascenso del nivel medio del mar (SLR). Además de involucrar distintas escalas temporales, este tipo de modelo suele permitir el modelado de zonas costeras del orden de centenas de kilómetros.

Vitousek et al. (2017b) propusieron el modelo CoSMoS-COAST (*Coastal One-line Assimilated Simulation Tool*), que calcula la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo (Y) acoplando un modelo *longshore one-line* $\left(-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}\right)$, el modelo *cross-shore* de Yates et al. (2009) $(CE^{0.5} \Delta E)$, un término de regresión de la línea de costa debido al SLR $\left(-\frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t}\right)$ y un término lineal relacionado con los procesos de largo plazo no considerados por el modelo (vertido de arena, aportes fluviales, transporte eólico, etc.) (v_{lt}), resultando en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + CE^{0.5} \Delta E - \frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t} + v_{lt} \quad (2.1)$$

El CoSMoS-COAST funciona simplificando el dominio en transectos sobre los cuales se calcula la posición de la línea de costa respecto a una línea de referencia georreferenciada, posibilitando así la obtención de las coordenadas geográficas de las posiciones modeladas. Además, el modelo utiliza técnicas de asimilación de datos que facilitan el proceso de calibración del modelo.

Siguiendo la línea de integración de procesos *longshore* y *cross-shore*, Robinet et al. (2018b) propusieron el modelo LX-Shore. Este modelo combina un modelo *one-line* idéntico al del CoSMoS-COAST con el modelo *cross-shore* de Splinter et al. (2014). A diferencia del

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

CoSMoS-COAST, este modelo considera un dominio bidimensional compuesto por celdas que, a cada instante de tiempo, ganan o pierden sedimento. Los autores afirman que la principal ventaja del LX-Shore es su habilidad de modelar líneas de costa con geometrías más complejas que el CoSMoS-COAST. Además, el LX-Shore propaga el oleaje a través del modelo SWAN, permitiendo cambios batimétricos en el cálculo de la propagación.

Antolínez et al. (2019), introdujeron el modelo COCOONED (*A COupled CrOss-shOre, loNg-shorE, and foreDune evolution model*). El modelo consiste en el acoplamiento del clásico modelo *one-line* $\left(-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}\right)$, de un término de fuentes y sumideros $\left(-\frac{1}{h_*} (q_x + q_y)\right)$, del modelo *cross-shore* de Miller and Dean (2004) $\left(k_c^{+/-} (Y_{eq} - Y)\right)$ y del modelo de evolución de posición de las dunas de Kriebel y Dean (1993) $\left(1/T_s (Y_{D,eq} - Y_D)\right)$, resultando en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + k_c^{+/-} (Y_{eq} - Y) + \frac{1}{h_*} (q_x + q_y) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Y_D}{\partial t} = \frac{1}{T_s} (Y_{D,eq} - Y_D) \quad (2.3)$$

El modelo COCOONED presentó la habilidad de modelar zonas costeras con presencia de dunas y, principalmente, tener en cuenta los efectos del nivel del mar a partir de modificaciones aplicadas al modelo *cross-shore*. Otra habilidad del COCOONED fue su acoplamiento a datos de oleaje propagados hasta profundidades reducidas. No obstante, los parámetros de rotura del oleaje se calculan utilizando la teoría lineal, lo que no permite calcular la rotura considerando elementos complejos de la batimetría. Así como el CoSMoS-COAST, este modelo se construyó determinando un dominio de transectos sobre una línea de referencia georreferenciada.

Los modelos antedichos consideran los efectos de corto plazo generados por el movimiento *cross-shore*, los de medio y largo plazo generados por los gradientes del transporte longitudinal de sedimentos, los de muy largo plazo generados por el SLR, las variaciones del

nivel del mar y la presencia de dunas. No obstante, ningún modelo considera la presencia de elementos antrópicos como diques o espigones. Para subsanar esta limitación. Alvarez-Cuesta et al. (2021) propusieron el IH-LANS (*Long-term ANthropized coastlines Simulation tool*), un modelo híbrido simplificado, con el dominio establecido en transectos, que acopla el modelo *one-line* $\left(-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}\right)$, el modelo *cross-shore* de Toimil et al. (2017) $\left(k_c^\pm (Y_{eq} - Y)\right)$, un término de fuentes y sumideros $\left(\frac{1}{h_{berm}+h_*} q\right)$ y un término lineal asociado a procesos de largo plazo no resueltos (v_{LT}) resultando en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_{berm}+h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + k_c^\pm (Y_{eq} - Y) + \frac{1}{h_{berm}+h_*} q + v_{LT} \tag{2.4}$$

El IH-LANS presenta como principal innovación el modelado de la posición de la línea de costa considerando intervenciones como diques, espigones y vertidos de arena. Además, el modelo está adaptado, así como el COCOONED, para recibir datos del clima del oleaje propagados hasta profundidades reducidas por modelos como el SWAN. Así como el CoSMoS-COAST, el IH-LANS incorpora una técnica de asimilación de datos para facilitar la calibración del modelo.

La Tabla 2.1 presenta un resumen de los modelos híbridos simplificados publicados hasta el momento y sus respectivas características. Vale resaltar que todos presentan la capacidad de modelar efectos a escalas temporales del orden de tormentas (horas-días) hasta escalas del orden de décadas y escalas espaciales del orden de metros hasta kilómetros.

Tabla 2.1. Características de los modelos híbridos simplificados.

Característica	Modelo			
	CosMoS-COAST	LX-Shore	COCOONED	IH-LANS
Asimilación de datos	✓	—	—	✓
Efectos del SLR	✓	—	✓	✓

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE
LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Característica	CosMoS-COAST	LX-Shore	COCOONED	IH-LANS
Efectos del nivel del mar	—	—	✓	✓
Geometrías costeras complejas	—	✓	—	—
Efectos antropogénicos	—	—	—	✓
Acoplamiento a modelo de propagación	—	✓	—	✓

Además de los modelos ya referenciados, existen otras propuestas de modelos que combinan procesos cross-shore y longshore (p. ej. Arriaga et al., 2017; de Santiago et al., 2021; Palalane and Larson, 2020; Tran and Barthélemy, 2020), pero adoptan metodologías distintas a las comentadas en este subapartado. Por lo tanto, dichos modelos serán integrados en análisis a desarrollar en futuros trabajos.

3. Metodología

Aunque en la literatura se identificaron más propuestas de modelos híbridos, en este estudio se han seleccionado tres modelos preexistentes y una adaptación propuesta en esta investigación.

Para permitir la comparación planteada en los objetivos del estudio, se aplicarán los modelos descritos en esta sección al caso de estudio descrito en el capítulo 4. Se comparará los resultados de la implementación de 4 modelos híbridos distintos, siendo estos:

- CoSMoS-COAST (Vitousek et al., 2017a), implementado por el autor del presente trabajo.
- COCOONED (Antolínez et al., 2019), facilitado por el autor principal del manuscrito.
- IH-LANS (Alvarez-Cuesta et al., 2021a), facilitado por el Grupo de Clima Marino y Cambio Climático de IHCantabria.
- ShoreFor modificado (Splinter et al., 2014), incorporado a un modelo híbrido, propuesto por el autor del presente trabajo.

En la secuencia del capítulo, se detallará la metodología utilizada por cada uno de los modelos para el modelado de la posición de la línea de costa.

3.1. Ecuación general de los modelos

En general, los modelos híbridos integran los procesos de corto plazo, asociados a los movimientos transversales (*cross-shore*), de medio-largo plazo, asociados al gradiente de transporte longitudinal (*longshore*) y de muy largo plazo, asociados al SLR, generando una ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \chi_{AL} + \chi_{CS} + \chi_q + \chi_{SLR} + v_{lt} \quad (3.1)$$

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE
LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Donde Y es la distancia de la línea de costa respecto a una línea de referencia, t es el tiempo, χ_{AL} el modelo *longshore* adoptado, χ_{CS} es el modelo *cross-shore* adoptado, χ_q el término de fuentes y sumideros, χ_{SLR} el modelo de erosión debido al SLR y v_{lt} es un término relacionado a procesos de largo plazo no considerados por los demás términos.

En este trabajo, los términos χ_q y v_{lt} no serán considerados, una vez que el problema planteado (capítulo 4) no considera aportes o extracciones de arena a lo largo del tiempo ($\chi_q = 0$) y el término lineal v_{lt} sería considerado idéntico para todos los modelos, siendo irrelevante para la comparación.

Cabe resaltar que los modelos COCOONED presenta un módulo de evolución del cordón de dunas e IH-LANS un módulo de afecciones antropogénicas que no serán utilizados en este estudio; por lo tanto, las ecuaciones presentadas, correspondientes a estos modelos, son versiones simplificadas que cuentan solamente con las componentes *cross-shore* y *longshore*.

Los modelos adoptados para cada término de la ecuación 3.1 (χ_{AL} , χ_{CS} y χ_{SLR}), para cada modelo seleccionado, son presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Términos de la ecuación 3.1 para cada modelo seleccionado.

Componente	Modelo de referencia			
	CoSMoS-COAST	COCOONED	IH-LANS	ShoreFor incorporado a un modelo híbrido
$\chi_{AL} =$	$-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}$	$-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}$	$-\frac{1}{h_* + h_{berm}} \frac{\partial Q}{\partial x}$	$-\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x}$
$\chi_{CS} =$	$\frac{1}{\tau} (Y_s - Y_{eq})$	$K_c (Y_{eq} - Y_s)$	$K_c (Y_{eq} - Y_s)$	$c_s (F^+ + rF^-)$
$\chi_{SLR} =$	$\frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t}$	Incorporado al modelo <i>cross-shore</i>	Incorporado al modelo <i>cross-shore</i>	$\frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t}$

Todos los modelos seleccionados consideran la discretización de la costa en transectos, tal como se presenta en el croquis genérico de la Figura 3.1. A partir de una línea imaginaria de referencia (línea roja) el modelo calcula la posición de la línea de costa (Y) en cada instante de tiempo (subíndice n), para cada transecto (subíndice k). Con la distancia entre la línea de referencia y la línea de costa, es posible calcular las coordenadas de la línea de costa (x_{UTM}, y_{UTM}). Las variaciones de Y a lo largo del tiempo son calculadas sobre cada transecto, por lo tanto, el transporte longitudinal de sedimentos se calcula entre transectos, con la finalidad de obtener el gradiente ($\partial Q / \partial x$) sobre los mismos.

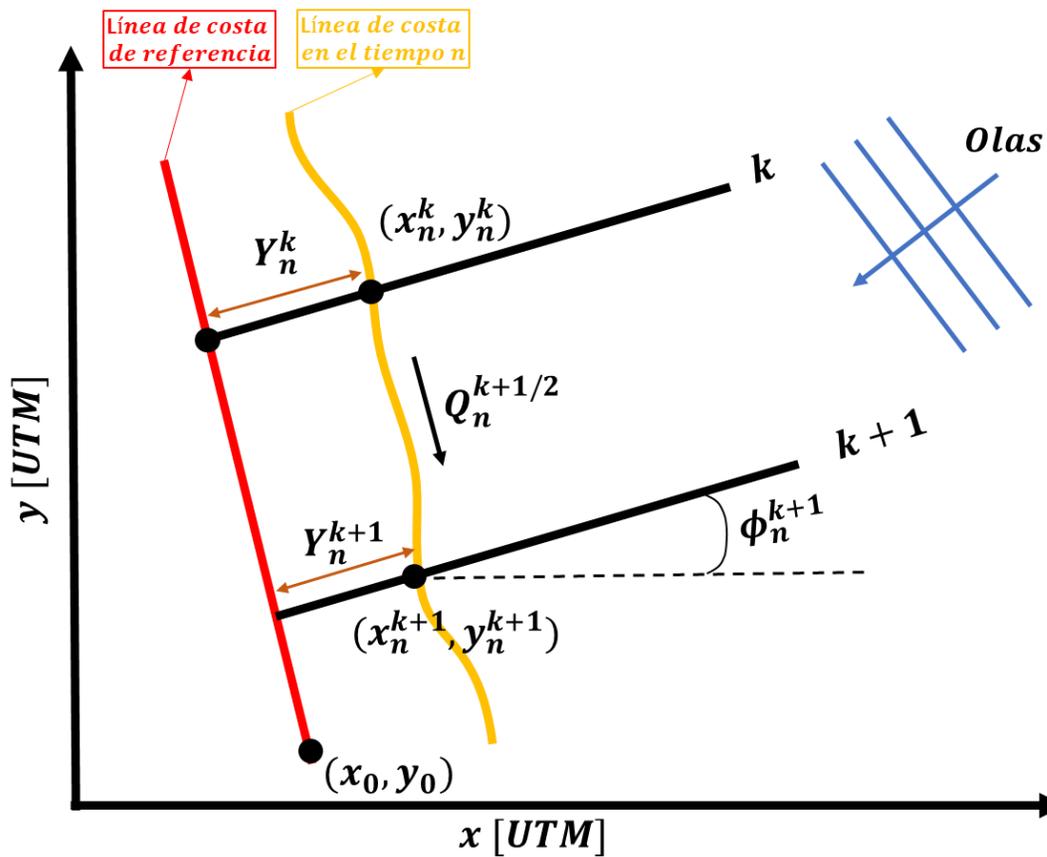


Figura 3.1 Dominio genérico de los modelos híbridos.

A continuación, en los siguientes subapartados, se detallará la metodología de cálculo de la posición de la línea de costa, para cada uno de los modelos presentados.

3.2. Modelo CoSMoS-COAST

El modelo CoSMoS-COAST, propuesto por Vitousek et al. (2017), resuelve a lo largo del tiempo la siguiente ecuación general:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{\tau} (Y_s - Y_{eq}) - \frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.2)$$

Donde h_* es la profundidad de cierre, $\partial Q/\partial x$ es el gradiente longitudinal del transporte de sedimentos, $\frac{1}{\tau}(Y_s - Y_{eq})$ es el modelo *cross-shore* de Yates et al. (2009) modificado por Vitousek et al. (2021), explicado en la secuencia, y $\frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t}$ es el término que determina la variación de la línea de costa debido al ascenso o descenso del nivel medio del mar, asumiendo que la pendiente media del perfil de playa ($\tan \beta$) se mantiene constante a lo largo del tiempo.

El transporte longitudinal de sedimentos (Q) se calcula a partir de la formulación CERC (Komar, 1971), dada por:

$$Q = K \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)^P} \frac{H_b^2 C_{g,b}}{16} \sin(2(\theta_b - \alpha_{SL})) \quad (3.3)$$

Donde K es el parámetro de calibración, ρ es la densidad del agua, ρ_s es la densidad del sedimento, P es la porosidad del sedimento, H_b es la altura de ola en rotura, $C_{g,b}$ es la celeridad de grupo del tren de olas en rotura, θ_b la dirección de propagación del oleaje en rotura y α_{SL} la orientación de la línea de costa. Cabe resaltar que la estabilidad numérica del modelo *longshore* exige que se cumpla la condición de $\Delta t < (h_* \Delta x^2)/4Q_{max}$.

Las características del oleaje en rotura ($H_{s,b}$, h_b , θ_b) se calculan, de manera iterativa a cada instante de tiempo, a través de la teoría lineal, considerando una batimetría recta, asumiendo una relación entre la altura de ola significativa en rotura ($H_{s,b}$) y la profundidad de rotura (h_b) $H_{s,b} = 0.55h_b$.

El modelo *cross-shore* implementado produce resultados idénticos al propuesto por Yates et al. (2009), no obstante, la modificación de los parámetros de ajuste propuesta por Vitousek et al. (2021) facilita la interpretación de estos. La posición de equilibrio propuesta por los autores se calcula por:

$$Y_{eq} = -\Delta Y \frac{H_s^2 - \widehat{H}_s^2}{\widehat{H}_s^2} \quad (3.4)$$

Donde ΔY es el parámetro que representa la escala espacial de los procesos de erosión y acreción, H_s^2 es la energía del oleaje incidente adoptada por los autores y \widehat{H}_s el parámetro que se relaciona con la energía media del oleaje histórico. Este parámetro debe ser calibrado, así como el parámetro ΔY , pero su valor suele ser próximo a la altura de ola significativa media de la serie histórica ($\sqrt{\overline{H_s}}$).

El parámetro τ se calcula por la siguiente ecuación:

$$\tau = -\Delta T \left(\frac{H_s}{\widehat{H}_s} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

Donde ΔT es el parámetro que indica la escala temporal de los procesos de tendencia al equilibrio.

El tercer término de la ecuación 3.2 se compone por el parámetro de calibración c , por la pendiente media del perfil de playa $\tan \beta$ y por la variación de la posición de la línea de costa debido a los cambios del nivel medio del mar $c \partial S / \partial t$, calculada por la regla de Bruun (1962):

$$c \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{W_b}{(h_{berm} + h_*)} = SLR \frac{W_b}{(h_{berm} + h_*)} \quad (3.6)$$

Donde h_{berm} es la altura de la berma, h_* la profundidad de cierre, $\partial H / \partial t = SLR$ es la variación del nivel medio del mar, W_b es la longitud del perfil activo que, asumiendo que el

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

perfil transversal de la playa se ajusta al perfil parabólico propuesto por Dean (1991), se calcula por:

$$W_b = \left(\frac{h_*}{0.51w_s^{0.44}} \right)^{3/2} \quad (3.7)$$

Donde w_s es la velocidad de caída del sedimento y h_* la profundidad de cierre, calculada a partir de la formulación de Birkemeier (1985):

$$h_* = 1.75H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_{s12}^2} \right) \quad (3.8)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, H_{s12} es la altura de ola significativa superada 12 horas al año y T_{s12} el periodo asociado a H_{s12} .

Para la resolución de la ecuación 3.2 se utilizó un esquema de diferencias finitas de Euler, semejante al utilizado por el modelo COCOONED, resultando en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{(Y_s)_{n+1}^k - (Y_s)_n^k}{\Delta t} = & \theta \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_{n+1}^{k+1/2} - (Q)_{n+1}^{k-1/2}}{\Delta x^k} + \frac{1}{(\tau)_{n+1}^k} \left((Y_{eq})_{n+1}^k - (Y_s)_{n+1}^k \right) - \frac{SLR_{n+1}(W_b)_{n+1}^k}{\tan \beta (h_{berm+h_*})} \right) + \\ & (1 - \theta) \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_n^{k+1/2} - (Q)_n^{k-1/2}}{\Delta x^k} + \frac{1}{(\tau)_n^k} \left((Y_{eq})_n^k - (Y_s)_n^k \right) - \frac{SLR_n(W_b)_n^k}{\tan \beta (h_{berm+h_*})} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Donde el subíndice n determina el instante de tiempo, k es el subíndice que determina el transecto, Δt es el paso temporal, Δx_k es la distancia entre transectos y θ es el parámetro de implicidad, que, dependiendo del valor que asuma, determina el esquema de cálculo:

- $\theta = 0 \rightarrow$ Esquema de Euler progresivo, explícito $\mathcal{O}(\Delta t)$;
- $\theta = 0.5 \rightarrow$ Esquema de Crank – Nicholson implícito $\mathcal{O}(\Delta t^2)$;
- $\theta = 1 \rightarrow$ esquema de Euler regresivo, implícito $\mathcal{O}(\Delta t)$;

La ecuación 3.9 genera un sistema no lineal que se resuelve a través del método iterativo *Jacobian Free Newton Krylov*, que garantiza la precisión propuesta por el esquema de derivadas y, utilizando las técnicas adecuadas de optimización y aceleración, reduce el tiempo de cálculo. La implementación del CoSMoS-COAST fue realizada por el autor del presente estudio en el lenguaje de programación de alta performance Julia (Bezanson et al., 2017).

3.3. Modelo COCOONED

Tal como se ha explicado en el capítulo 4, el modelo COCOONED, propuesto por Antolínez et al. (2019), incorpora el cálculo de las componentes *cross-shore*, *longshore* y evolución de la posición del pie de dunas; no obstante, en este estudio la evolución de la posición de las dunas no será considerada. Por lo tanto, a lo largo del tiempo el modelo resuelve la siguiente ecuación general:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + k_c^{+/-} (Y_{eq} - Y) + \frac{1}{h_*} (q_x + q_y) \quad (3.10)$$

Donde h_* es la profundidad de cierre, $\partial Q/\partial x$ es el gradiente longitudinal del transporte de sedimentos, $k_c^{+/-} (Y_{eq} - Y)$ es el modelo *cross-shore* adoptado y $q_{x,y}$ es el término de fuentes y sumideros.

La profundidad de cierre y el transporte longitudinal de sedimentos se calculan de manera idéntica al modelo CoSMoS-COAST, a través de las ecuaciones 3.8 y 3.3 respectivamente. Los parámetros de rotura del oleaje se calculan de manera iterativa a través de la teoría lineal.

El modelo *cross-shore* implementado al COCOONED es el propuesto por Miller y Dean (2004), en el cual $k_c^{+/-}$ es el parámetro de ajuste de erosión o acreción, Y_{eq} es la posición de equilibrio y Y es la posición actual de la línea de costa. La constante de calibración $k_c^{+/-}$ puede asumir distintos valores, que dependen de si la playa se encuentra en proceso de erosión ($k_c^{+/-} = k_{ero}$), que ocurre cuándo $(Y_{eq} - Y) < 0$, o acreción ($k_c^{+/-} = k_{acr}$), cuándo $(Y_{eq} - Y) > 0$. La posición de equilibrio se calcula por:

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

$$Y_{eq} = \Delta Y_0 + \Delta Y_{eq} \quad (3.11)$$

Donde ΔY_0 es un parámetro empírico que determina la posición de referencia en la cual ocurre la fluctuación de las predicciones y ΔY_{eq} es la posición de equilibrio determinada por las fluctuaciones locales del nivel del mar, calculado por:

$$Y_{eq} = W_b + \frac{WL_{ST}}{h_{berm} + h_b} \quad (3.12)$$

Donde W_b es la longitud del perfil activo (ecuación 3.7), h_{berm} es la altura de la berma, h_b es la profundidad de rotura del oleaje, WL_{ST} es la profundidad local, dada por:

$$WL_{ST} = 0.106H_{s,b} + SS + AT \quad (3.13)$$

Donde $0.106H_{s,b}$ es el *setup* inducido por el oleaje, SS es la marea meteorológica y AT es la marea astronómica.

El término W_b en la ecuación 3.12 es la longitud del perfil activo, calculada por la ecuación 3.7.

El parámetro ΔY_0 varía a lo largo del tiempo, una vez que este se ve afectado por la posición del tiempo anterior, por las variaciones de largo plazo del nivel medio del mar, por las variaciones de corto plazo de la línea de costa y por las variaciones de largo plazo de la línea de costa. Para cada instante de tiempo k , ΔY_0 se calcula por:

$$\Delta Y_0^k = \Delta Y_0^{k-1} + \Delta Y_{WL_{LT}} + \Delta Y_{LT} + \Delta Y_{CS} \quad (3.14)$$

Donde ΔY_0^{k-1} es el parámetro ΔY_0 en el instante de tiempo anterior, ΔY_{LT} es la variación de la posición debido al gradiente longitudinal de transporte de sedimentos, ΔY_{CS} es la variación de debido al transporte transversal de sedimentos y $\Delta Y_{WL_{LT}}$ es la variación de la posición debido las variaciones de nivel medio del mar de largo plazo, calculado por:

$$\Delta Y_{WL_{LT}} = WL_{LT} \frac{W_b}{h_{berm} + h_*} \quad (3.15)$$

Donde W_b es la longitud del perfil de playa activo (ecuación 3.7), h_{berm} es la altura de la berma, h_* es la profundidad de cierre y WL_{LT} se calcula por:

$$WL_{LT} = SLR + MMSLA \quad (3.16)$$

Donde SLR es el ascenso del nivel medio del mar y $MMSLA$ la anomalía de la media mensual del nivel del mar.

Para resolver la ecuación 3.10, el modelo utiliza un esquema de diferencias finitas de Euler, resultando en la siguiente expresión:

$$\frac{(Y_S)_{n+1}^k - (Y_S)_n^k}{\Delta t} = \theta \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_{n+1}^{k+1/2} - (Q)_{n+1}^{k-1/2}}{\Delta x^k} + (K_c)_{n+1}^k \left((Y_{eq})_{n+1}^k - (Y_S)_{n+1}^k \right) + \frac{1}{h_*} (q_{x,n+1} + q_{y,n+1}) \right) + (1 - \theta) \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_n^{k+1/2} - (Q)_n^{k-1/2}}{\Delta x^k} + (K_c)_n^k \left((Y_{eq})_n^k - (Y_S)_n^k \right) + \frac{1}{h_*} (q_{x,n} + q_{y,n}) \right) \quad (3.17)$$

Donde el subíndice n determina el instante de tiempo, k es el subíndice que determina el transecto, Δt es el paso temporal, Δx_k es la distancia entre transectos y θ es el parámetro de implícidad, que, dependiendo del valor que asuma, determina el esquema de cálculo, tal como se ha explicado en el subapartado 3.2.

La ecuación 3.10 genera un sistema no lineal que se resuelve a través del método iterativo *Jacobian Free Newton Krylov*, que garantiza la precisión propuesta por el esquema de derivadas y, utilizando las técnicas adecuadas de optimización y aceleración, reduce el tiempo de cálculo. Por último, cabe indicar que el código facilitado por los autores está implementado en Python.

3.4. Modelo IH-LANS

Tal como se ha citado en el capítulo anterior, el modelo IH-LANS, propuesto por Alvarez-Cuesta et al. (2021a) se trata de un modelo diseñado principalmente para simulaciones de la línea de costa en zonas con elementos antropogénicos, no obstante, en este estudio no se considerarán este tipo de elementos. Siendo así, la ecuación general del modelo se da por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_{berm}+h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + k_c^\pm (Y_{eq} - Y) + \frac{1}{h_{berm}+h_*} q + v_{LT} \quad (3.18)$$

Donde h_* es la profundidad de cierre, $\partial Q/\partial x$ es el gradiente longitudinal del transporte de sedimentos, $k_c^\pm (Y_{eq} - Y)$ es el modelo *cross-shore* incorporado, q es el término de fuentes y sumideros y v_{LT} el término correspondiente a los procesos de largo plazo no resueltos por el modelo.

La profundidad de cierre es un parámetro de entrada determinado por el usuario, por lo tanto, fue calculada a través de la formulación 3.8. El transporte longitudinal se calcula a través de la ecuación 3.3.

El modelo *cross-shore* implementado es el propuesto por Toimil et al. (2017), basado en el modelo de Miller y Dean (2004), donde k_c^\pm es el parámetro de ajuste de erosión o acreción, Y_{eq} es la posición de equilibrio y Y es la posición actual de la línea de costa. La constante de calibración $k_c^{+/-}$ puede asumir distintos valores, que dependen de si la playa se encuentra en proceso de erosión ($k_c^{+/-} = k_{ero}$), que ocurre cuándo $(Y_{eq} - Y) < 0$, o acreción ($k_c^{+/-} = k_{acr}$), cuándo $(Y_{eq} - Y) > 0$. La posición de equilibrio se calcula por:

$$Y_{eq} = \Delta Y_0 + \Delta Y_{eq} + R_{SLR} \quad (3.19)$$

Donde ΔY_0 es el parámetro empírico que determina una línea de base sobre la cual las fluctuaciones de la posición de la línea de costa oscilan, R_{SLR} es el retroceso de la posición

de la línea de costa debido al SLR (calculado por la ecuación 3.6, con $R_{SLR} = \partial H / \partial t$) y ΔY_{eq} dada por:

$$\Delta Y_{eq} = -W_b \left(\frac{0.106H_{s,b} + SS + AT}{h_{berm} + h_b} \right) \quad (3.20)$$

Donde W_b es la longitud del perfil activo (calculado por la ecuación 3.7), $0.106H_{s,b}$ es el *setup* inducido por el oleaje incidente, SS es la marea meteorológica, AT es la marea astronómica, h_{berm} es la altura de la berma y h_b es la profundidad de rotura del oleaje.

El modelo propone una ecuación semejante a la propuesta por Antolínez et al. (2019a), no obstante, tal como se ha citado anteriormente, este modelo posibilita la incorporación de datos de oleaje en rotura transferidos a partir de modelos de propagación más robustos. Debido a no tener disponibles datos de batimetría de detalle del caso de estudio (capítulo 4), en este estudio, el IH-LANS será utilizado propagando el oleaje en cada paso de tiempo a partir de la misma metodología citada en el apartado 3.2.

Para resolver la ecuación 3.18 el IH-LANS utiliza un esquema de Euler explícito progresivo, resultando en la siguiente ecuación:

$$\frac{(Y_S)_{n+1}^k - (Y_S)_n^k}{\Delta t} = -\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_{n+1}^{k+1/2} - (Q)_{n+1}^{k-1/2}}{\Delta x^k} + (K_C)_{n+1}^k \left((Y_{eq})_{n+1}^k - (Y_S)_{n+1}^k \right) + \frac{1}{h_*} (q_{n+1}) \quad (3.21)$$

Donde el subíndice n determina el instante de tiempo, k es el subíndice que determina el transecto, Δt es el paso temporal y Δx_k es la distancia entre transectos. Por último, cabe indicar que el código facilitado por los autores está implementado en MATLAB®.

3.5. Modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido

El modelo ShoreFor, originalmente propuesto por Davidson et al. (2013), se compone solamente por la componente *cross-shore*. Con la finalidad de comparar los distintos modelos híbridos, se adoptó una metodología semejante a la de Vitousek et al. (2017) y se implementó el modelo ShoreFor, modificado por Splinter et al. (2014b), juntamente a las componentes

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

longshore y del SLR del modelo CoSMoS-COAST, resultando en la siguiente ecuación general:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_*} \frac{\partial Q}{\partial x} + c_s(F^+ + rF^-) - \frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3.22)$$

Donde h_* es la profundidad de cierre, $\partial Q/\partial x$ es el gradiente longitudinal del transporte de sedimentos, $c_s(F^+ + rF^-)$ es el modelo *cross-shore* ShoreFor y $\frac{c}{\tan \beta} \frac{\partial S}{\partial t}$ es el término que determina la variación de la línea de costa debido al ascenso o descenso del nivel medio del mar, asumiendo que la pendiente media del perfil de playa ($\tan \beta$) se mantiene constante a lo largo del tiempo.

El primero y tercer términos se resuelven de manera idéntica a los modelos CoSMoS-COAST. El modelo ShoreFor se basa en el equilibrio del estado morfodinámico de la playa, c_s es el parámetro de calibración, r es la tasa de respuesta entre los procesos de erosión y acreción, F es el termino de forzamiento, dividido entre F^+ (acreción; $F > 0$) y F^- (erosión; $F < 0$), calculado por:

$$F = p^{1/2} \frac{\Delta \Omega}{\sigma_{\Delta \Omega}} \quad (3.23)$$

Donde p es el flujo de energía del oleaje en rotura:

$$p = E_b C_{g,b} \quad (3.24)$$

Donde $E_b = 1/16\rho g H_{s,b}^2$ es la energía del oleaje en rotura y $C_{g,b} = \sqrt{gh_b}$ es la celeridad de grupo del oleaje en rotura. Las características del oleaje en rotura se calculan de manera idéntica a la descrita en el apartado 3.2.

En la ecuación 3.23 $\Delta \Omega$ denota la diferencia entre la velocidad de caída de grano adimensional de equilibrio (Ω_{eq}) y la actual (Ω). Para obtener las correctas dimensiones, se divide $\Delta \Omega$ por su propia desviación estándar ($\sigma_{\Delta \Omega}$). El estado morfodinámico actual se calcula por:

$$\Omega = \frac{H_{s,b}}{wT_p} \quad (3.25)$$

Donde $H_{s,b}$ es la altura de ola en rotura, T_p es el periodo de pico asociado y w es la velocidad de caída del grano.

El parámetro de caída de grano de equilibrio se calcula a través de la formulación propuesta por Wright et al. (1985):

$$\Omega_{eq} = \left[\sum_{i=1}^{2\phi} 10^{-i/\phi} \right]^{-1} \sum_{i=1}^{2\phi} \Omega_i 10^{-i/\phi} \quad (3.26)$$

Donde i denota el número de días anteriores al día actual y ϕ es el factor de respuesta, en días, que debe ser calibrado.

Adoptando el esquema de diferenciación de Euler, el código fue implementado para la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{(Y_s)_{n+1}^k - (Y_s)_n^k}{\Delta t} = & \theta \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_{n+1}^{k+1/2} - (Q)_{n+1}^{k-1/2}}{\Delta x^k} + c_s \left((F^+)_{n+1}^k + r(F^-)_{n+1}^k \right) - \frac{SLR_{n+1}(W_b)_{n+1}^k}{\tan \beta (h_{berm+h_*})} \right) + \\ (1 - \theta) & \left(-\frac{1}{h_*} \frac{(Q)_n^{k+1/2} - (Q)_n^{k-1/2}}{\Delta x^k} + c_s \left((F^+)_{n+1}^k + r(F^-)_{n+1}^k \right) - \frac{SLR_n(W_b)_n^k}{\tan \beta (h_{berm+h_*})} \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Donde el subíndice n determina el instante de tiempo, k es el subíndice que determina el transecto, Δt es el paso temporal, Δx_k es la distancia entre transectos y θ es el parámetro de implicidad, que, dependiendo del valor que asuma, determina el esquema de cálculo, tal como se ha explicado en la sección 3.2.

La implementación del ShoreFor fue realizada por el autor en el lenguaje de programación de alta performance Julia (Bezanson et al., 2017), utilizando el método iterativo *Jacobian Free Newton Krylov* por las razones citadas en el subapartado 3.2.

3.6. Análisis de sensibilidad

En este estudio se contempla un análisis de sensibilidad de los modelos híbridos seleccionados, considerando la variación de diversos parámetros. Para ello, se han realizado diversas simulaciones en las cuales se evaluaron los cambios en los resultados de los modelos al variar tan sólo uno de los parámetros y mantener los demás fijos. El cuadro 3.2 presenta los parámetros evaluados de cada modelo.

Cuadro 3.2 Parámetros evaluados en el análisis de sensibilidad.

Modelo	Parámetros
CoSMoS-COAST	$K, \hat{H}_s, \Delta Y, \Delta T$
COCOONED	$K, k_{ero}, k_{acr}, \Delta Y_0$
IH-LANS	$K, k_{ero}, k_{acr}, \Delta Y_0$
ShoreFor híbrido	K, c, r, ϕ

Para cada parámetro, de cada modelo, se seleccionaron 3 valores de los parámetros seleccionados para realizar el análisis. Siendo así, como todos los modelos presentan 4 parámetros, son necesarias 12 simulaciones por modelo.

3.7. Calibración

Una vez verificada la sensibilidad del modelo con relación a los parámetros de calibración, se buscar encontrar los valores óptimos de estos parámetros para reproducir resultados semejantes a las observaciones a través de un proceso de calibración.

Tal como se ha indicado en el capítulo 2, los modelos CoSMoS-COAST y IH-LANS cuentan con técnicas de asimilación de datos integradas, no obstante, estas técnicas no serán utilizadas en este estudio, debido a que uno de los objetivos es realizar la calibración de los modelos mediante la misma metodología.

Se proponen intervalos para los parámetros (cuadro 3.2) y se realizan simulaciones utilizando parámetros dentro de estos intervalos, o sea, para cada parámetro genérico “ p_n ” (por ejemplo: para el COCOONED $p_n = K; p_n = k_{ero}; p_n = k_{acr}; p_n = \Delta Y_0$) se determina un límite inferior “ p_i ” y un límite superior “ p_f ”, que determinan el rango de variación del parámetro “ k_n ” veces. Como los modelos cuentan con 4 parámetros de calibración, son necesarias $\prod k_n$ simulaciones para cada conjunto de parámetros definidos. Por ejemplo, determinando para el modelo un total de 3 valores distintos para cada parámetro, son necesarias $\prod k_n = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 = 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ simulaciones.

A continuación, se verifica el error cuadrático medio (*RMSE*) entre los resultados de las simulaciones y los datos disponibles de la posición media de la línea de costa. El *RMSE* se calcula por:

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{obs,i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

Donde Y_i denota el resultado de la simulación en el instante i y $Y_{obs,i}$ el valor de la observación en el instante i .

Además del *RMSE* también se evalúa el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r) entre los resultados y los valores de las observaciones, calculado por:

$$\rho_r = \frac{\text{cov}(Y, Y_{obs})}{[\text{var}(Y)\text{var}(Y_{obs})]^{1/2}} \quad (3.29)$$

Donde $\text{cov}(Y, Y_{obs})$ es la covarianza entre la posición de la línea de costa modelada (Y) y las observaciones (Y_{obs}), $\text{var}(Y)$ la varianza de Y y $\text{var}(Y_{obs})$ la varianza de Y_{obs} . La Tabla 3.3 presenta la interpretación del coeficiente de Pearson de acuerdo con su valor.

Tabla 3.3 Interpretación del coeficiente de correlación de Pearson. (StatsTutor, n.d.)

Rango	Correlación
$\rho_r = 1$	Perfecta

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Rango	Correlación
$0.8 \leq \rho_r < 1$	Muy Alta
$0.6 \leq \rho_r < 0.8$	Alta
$0.4 \leq \rho_r < 0.6$	Moderada
$0.2 \leq \rho_r < 0.4$	Baja
$0 < \rho_r < 0.2$	Muy baja
$\rho_r = 0$	Depreciable

Una vez obtenidos los menores valores de error y mayores valores de coeficiente de correlación, se evalúan nuevos rangos para los parámetros del modelo y se vuelven a realizar simulaciones. El proceso se repite hasta que el error cuadrático medio y la correlación varíen de manera poco significativa al redefinir los rangos. En el caso del error cuadrático medio, variaciones de $10^{-1} m$ se adoptan como suficientemente buenas para la determinación de los parámetros calibrados. Para el coeficiente de correlación, se considera que variaciones de 10^{-2} son suficientes para determinar los parámetros de calibración definitivos. La Figura 3.2 presenta el flujograma del proceso de calibración de los modelos.

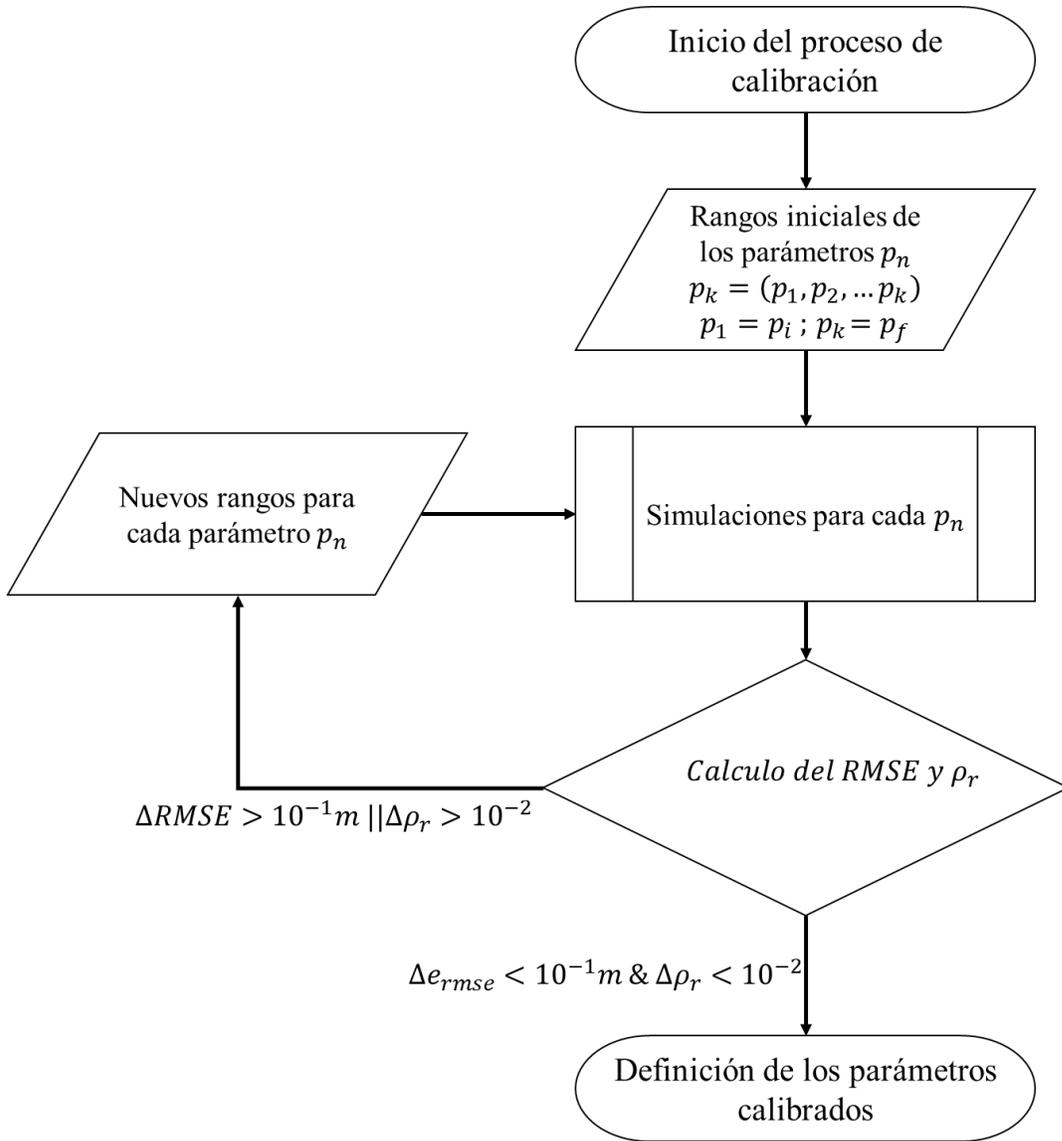


Figura 3.2 Flujograma del proceso de calibración.

4. Descripción del caso de estudio

Para la aplicación y comparación de los modelos, se utilizaron los datos de acceso libre dispuestos del taller *Shoreshop*, realizado por la *University of Auckland* (Montaño et al., 2020), correspondientes a la playa de Tairúa, Nueva Zelanda. Entre los datos disponibles se tienen:

- Serie de datos de reanálisis de estados de mar (H_s, T_p, θ_p) obtenidos por MetOcean desde 01/01/1999 hasta 01/01/2017, a una profundidad de 10 m;
- Serie de predicción del oleaje a partir del forzamiento Wavewatch III desde 01/01/2017 hasta 19/12/2099;
- Serie temporal de marea astronómica desde 01/01/1968 hasta 01/01/2018;
- Serie temporal de predicción de la marea astronómica desde 01/01/2018 hasta 01/01/2101;
- Serie temporal desde marea meteorológica de 01/01/1979 hasta 01/01/2011;
- Serie temporal de predicción de la marea meteorológica desde 01/01/2011 hasta 16/12/2099;
- Serie temporal de ascenso del nivel medio del mar desde 01/05/1973 hasta 01/05/2017;
- Serie temporal de predicción del ascenso del nivel medio del mar desde 01/05/2016 hasta 01/01/2150;
- Serie histórica de posición de la línea de costa obtenida a partir de sistema de videocámara desde 02/01/1999 hasta 31/12/2013.

La Figura 4.1 presenta la zona de estudio.



Figura 4.1 Zona de Estudio

La playa de Tairúa se encuentra en la península de Coromandel, en la isla norte del país. La zona de estudio consiste en una playa encajada, confinada en el extremo norte por el acantilado Pumpkin y en el extremo sur por el cerro Paku, con 1.2 km de extensión, compuesta por arenas intermedias y gruesas (Montaño et al., 2020).

Para el estudio del problema propuesto, se considera que la playa presenta un diámetro mediano del sedimento (D_{50}) igual a 0.3 mm, que no varía para toda la extensión de la playa.

4.1. Oleaje

La serie temporal del oleaje dispuesta se corresponde a datos de estados de mar con periodicidad cada tres horas. Las características del oleaje (altura de ola significativa, periodo de pico y dirección de incidencia) en profundidades indefinidas fueron transferidas a la zona

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

de estudio a través del modelo SWAN, propagando el oleaje hasta una profundidad de 10 m. La Figura 4.2 presenta las series temporales de las características del oleaje para los datos de reanálisis y predicción. La altura máxima del registro es de 4.5 m, correspondiente a la fecha 04/04/2082, presentando un periodo de pico de 21 s. El oleaje llega a la zona de estudio predominantemente del NE, una vez que es la dirección perpendicular a la línea de costa. Se puede observar un cambio del comportamiento de la serie de datos a partir del inicio del periodo de predicción del oleaje, los valores de H_s , T_p y θ_p presentan una menor dispersión que durante el periodo de reanálisis.

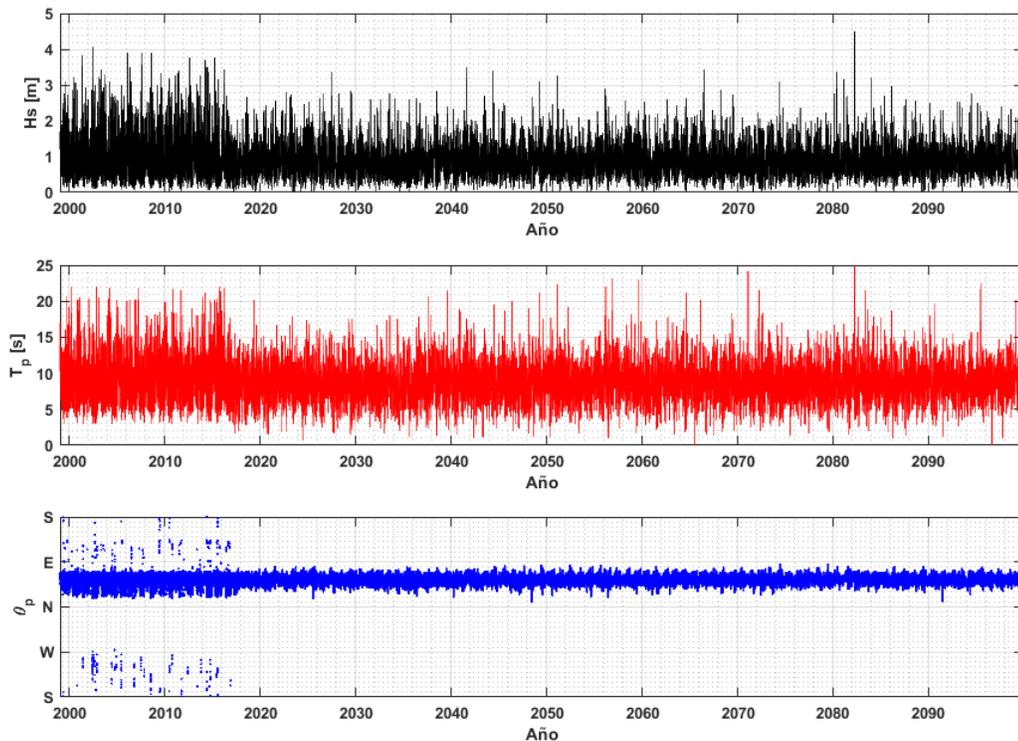


Figura 4.2 Serie temporal de las características del oleaje incidente para el periodo de reanálisis y predicción. Panel superior: altura de ola significativa H_s . Panel intermedio: periodo de pico T_p . Panel inferior: dirección de incidencia θ_p .

La Figura 4.3 presenta las distribuciones de probabilidad de H_s para el periodo de reanálisis y periodo de predicción. Se puede observar que, para el periodo de reanálisis se tiene una mayor desviación estándar, explicando la mayor dispersión observada en la serie temporal (Figura 4.2). El valor de la altura de ola media significativa (H_{s50}) es 10 *cm* mayor para el

periodo de predicción, no obstante, la altura de ola significativa del percentil 75 supera en tan solo 0.1 s, mientras en los percentiles 95, 99 y 99.86 (H_{s12}) esta es inferior en 24, 44 y 69 cm respectivamente.

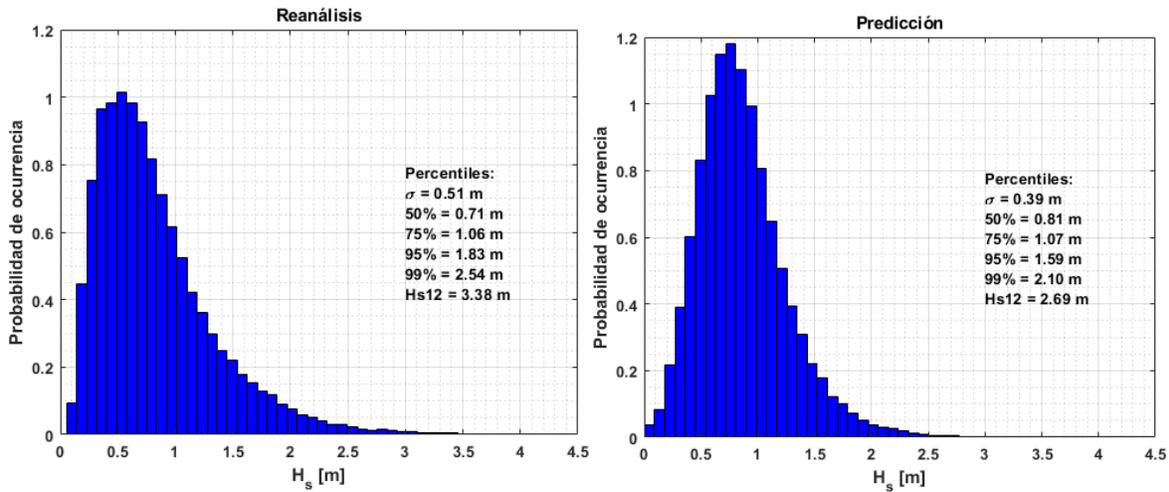


Figura 4.3 Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa para los periodos de reanálisis y predicción. Panel izquierdo: periodo de reanálisis. Panel derecho: periodo de predicción.

El régimen medio de la altura de ola significativa de todo el registro se presenta en la Figura 4.4. La desviación estándar coincide con el valor de la serie de predicción y los percentiles presentados son más próximos a los valores de los datos de predicción, una vez que estos representan 82% de los datos del registro.

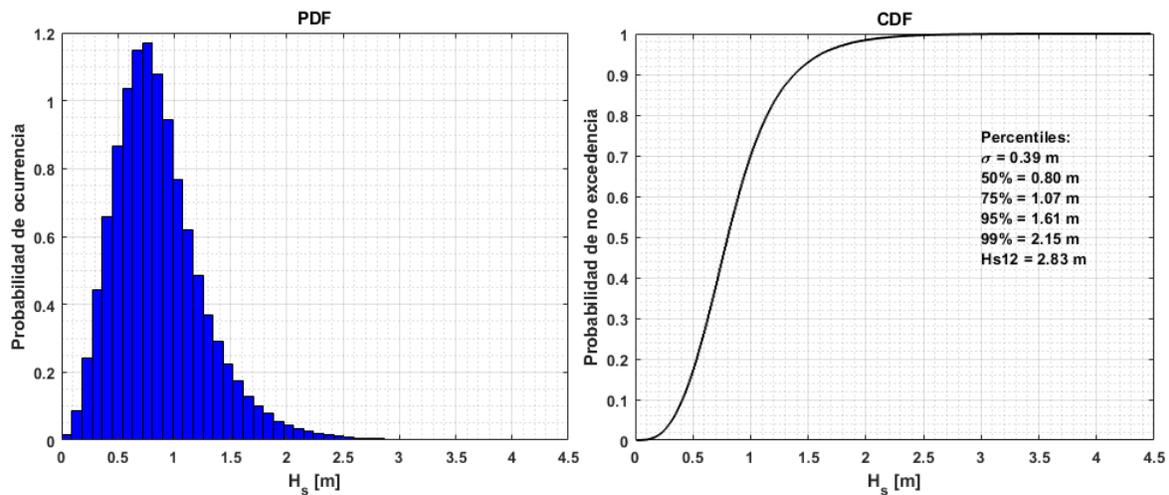


Figura 4.4 Distribución de probabilidad de la altura de ola significativa para los periodos de reanálisis y predicción.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

En la Figura 4.5 se presenta la serie anual de las características del oleaje. Se observa una cierta estacionalidad, pues en los meses de verano (diciembre-febrero) la dispersión de alturas de olas es menos enmarcada que en los meses de invierno (junio-agosto). Para los datos de dirección de propagación y periodo de pico no se observa una estacionalidad.

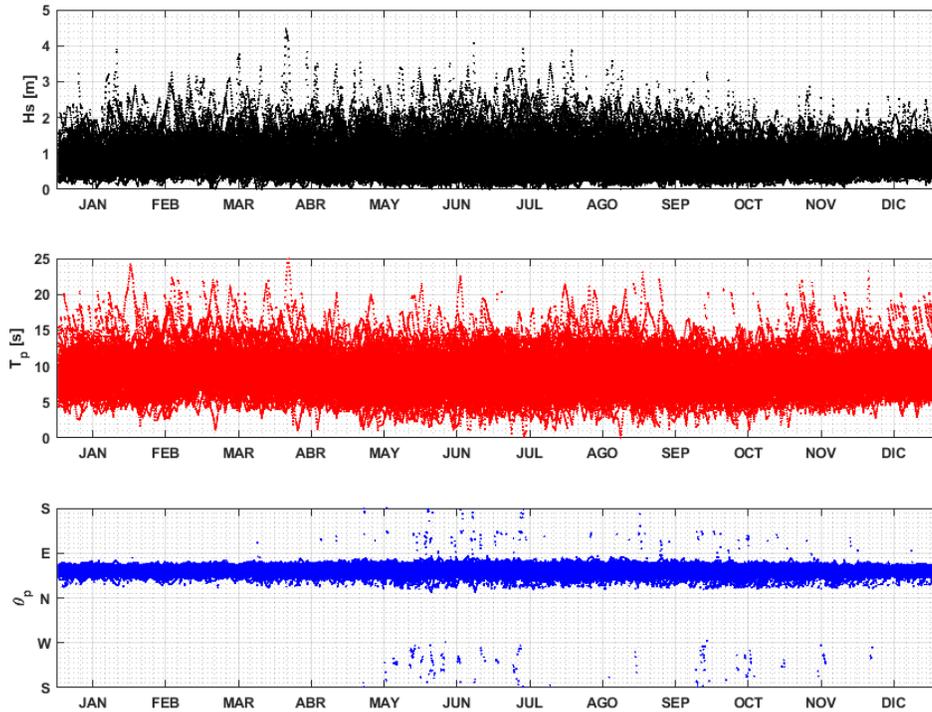


Figura 4.5 Serie anual de las características del oleaje incidente para el periodo de reanálisis y predicción. Panel superior: altura de ola significativa H_s . Panel intermedio: periodo de pico T_p . Panel inferior: dirección de incidencia θ_p .

La Figura 4.6 presenta el histograma de frecuencias de la altura de ola significativa y del periodo de pico. Asociando la probabilidad de ocurrencia del H_{s12} obtenido al periodo de pico, se obtuvo un T_{s12} igual 9.5 s.

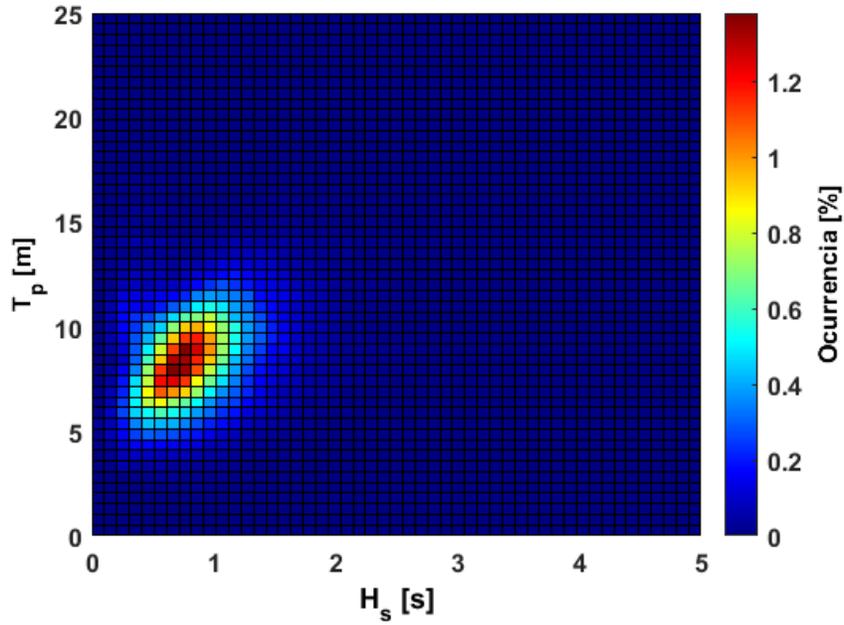


Figura 4.6 Histograma de frecuencias $H_s \times T_p$.

En la Figura 4.7 se presenta la rosa de oleaje de la altura de ola significativa, donde se puede observar que el oleaje reinante, o más frecuente, y dominante, o más energético, proviene de la dirección NE (47%), seguido por el oleaje proveniente del ENE (46%).

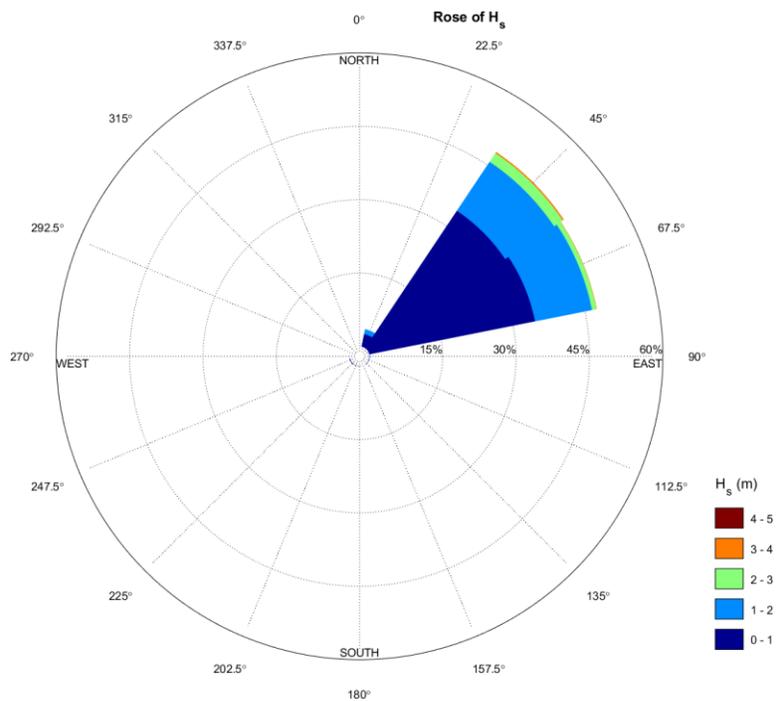


Figura 4.7 Rosa del oleaje.

4.2. Nivel del mar

El nivel del mar se da por las siguientes componentes:

$$H = AT + SS + SLR + RU \quad (4.1)$$

Donde AT es la marea astronómica, SS la marea meteorológica, SLR es el ascenso del nivel medio del mar y RU es el *runup* inducido por el oleaje, calculado por la formulación de Stockdon et al. (2006):

$$RU = 1.1 \left(0.35 \beta (H_0/L_0)^{1/2} + \frac{[H_0 L_0 (0.563 \beta^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (4.2)$$

Donde β es la pendiente media local, H_0 la altura de ola en profundidades indefinidas y L_0 la longitud de onda en profundidades indefinidas.

La Figura 4.8 presenta las series temporales de marea astronómica, marea meteorológica y ascenso medio del nivel del mar para el periodo de reanálisis y de predicción. También se presenta un registro de 3 días de la marea astronómica, que permite identificar que la zona se encuentra en una región micro mareal, con una carrera de marea media igual a 0.9 m.

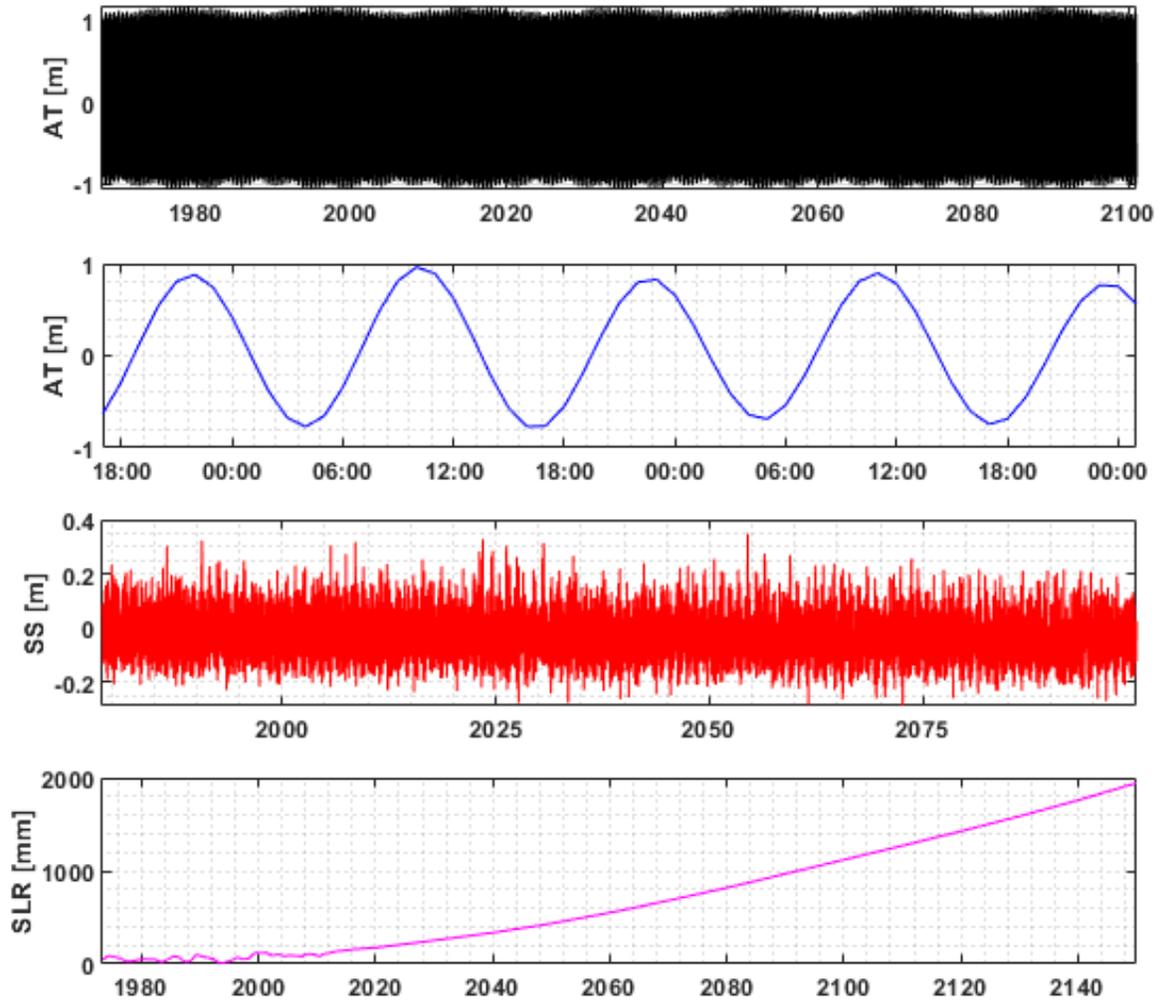


Figura 4.8 Series temporales de AT, SS y SLR.

La marea meteorológica presenta una magnitud máxima de 0.35 m. El ascenso del nivel medio del mar hasta 2017 fue obtenido a través de mediciones y, a partir de la última fecha de medición se adoptó el escenario RCP8.5 del *Intergovernmental Panel on Climate Change 2013* (IPCC, 2013), que estima un ascenso del nivel medio del mar igual a 2 m para el año del 2100.

La Figura 4.9 presenta el *runup* calculado por la ecuación 3.2 y la serie temporal de nivel del mar total obtenida. Se observa que el SLR desplaza la curva de niveles hasta un nivel máximo de 3.56 m en el año de 2099.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

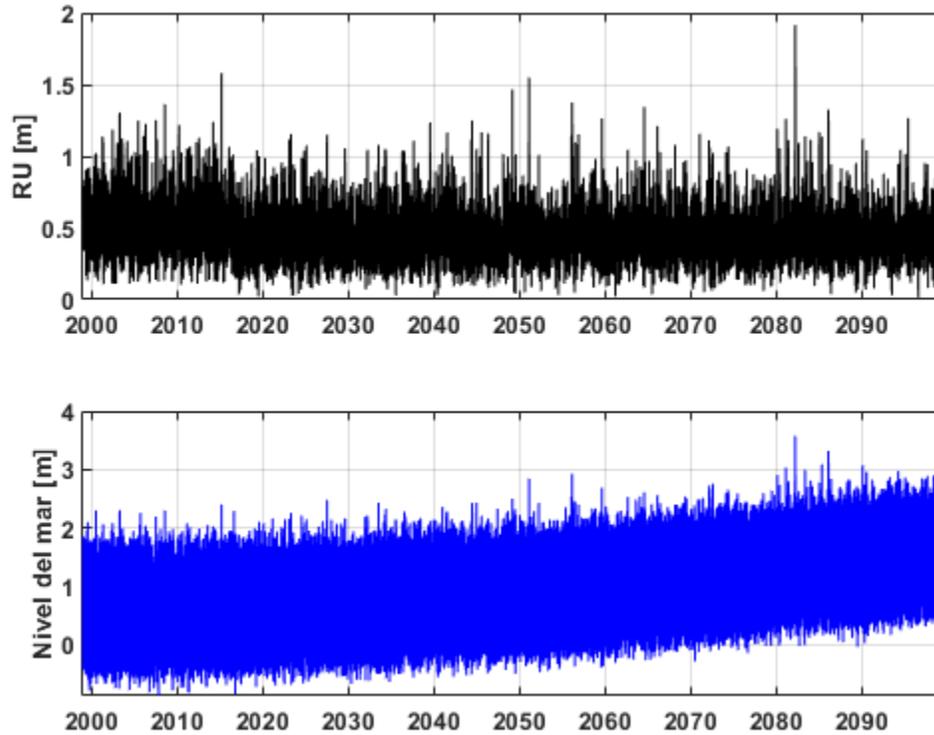


Figura 4.9 Series temporales *runup* y nivel del mar total. Panel superior: *runup* calculado. Panel inferior: nivel del mar total.

4.3. Morfología de la línea de costa

La playa cuenta con una serie histórica de medición de la posición de la línea de costa obtenidas por fotografías aéreas y fotografías oblicuas obtenidas a partir de un sistema de videocámaras que forma parte de la red "Cam-Era" del Instituto Nacional de Investigación del Agua y la Atmósfera (NIWA) de Nueva Zelanda, y ha capturado imágenes desde enero de 1999 hasta diciembre de 2013. En la Figura 4.1 se muestra la ubicación de la estación de medición, en el cerro Paku. El sistema de videocámaras funciona durante el día y obtiene aproximadamente 600 fotos oblicuas cada 15 minutos, generando la posición media de la línea de costa para este tiempo de medición.

Para la serie de datos utilizada en este estudio la frecuencia media de los datos es de uno a cada 16 horas, con un error del orden de 0.5 m. La Figura 4.10 presenta la serie temporal de la posición de la línea de costa. Los valores varían entre $Y = 81.54 \text{ m}$ y $Y = 44.60 \text{ m}$,

correspondientes a las fechas de 29/08/2009 y 03/04/2012 respectivamente. La línea de costa media se encuentra a una distancia de 64.28 m.

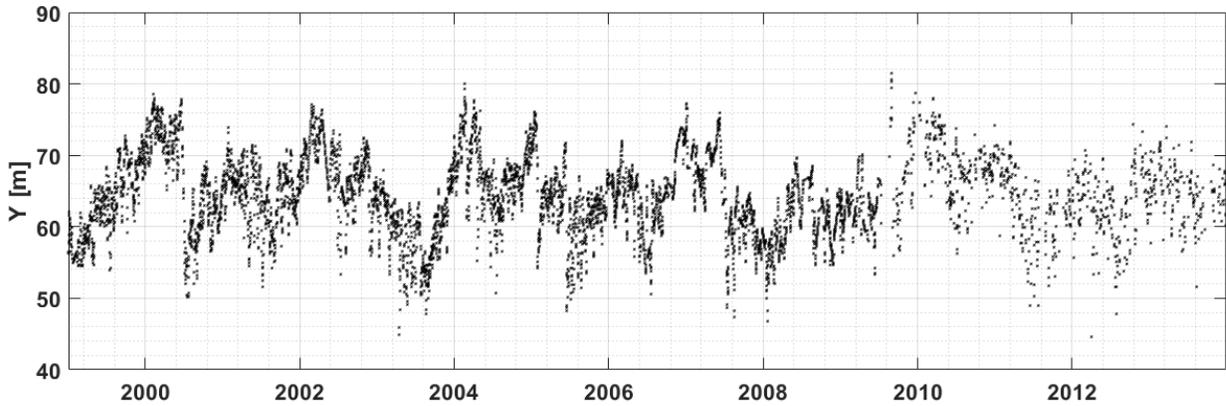


Figura 4.10 Serie temporal de la posición de la línea de costa.

La Figura 4.11 presenta la distribución de probabilidad de la línea de costa. La distribución presenta características de una distribución normal, con la media en $Y = 64.28\text{ m}$ y la desviación estándar igual a 5.51 m .

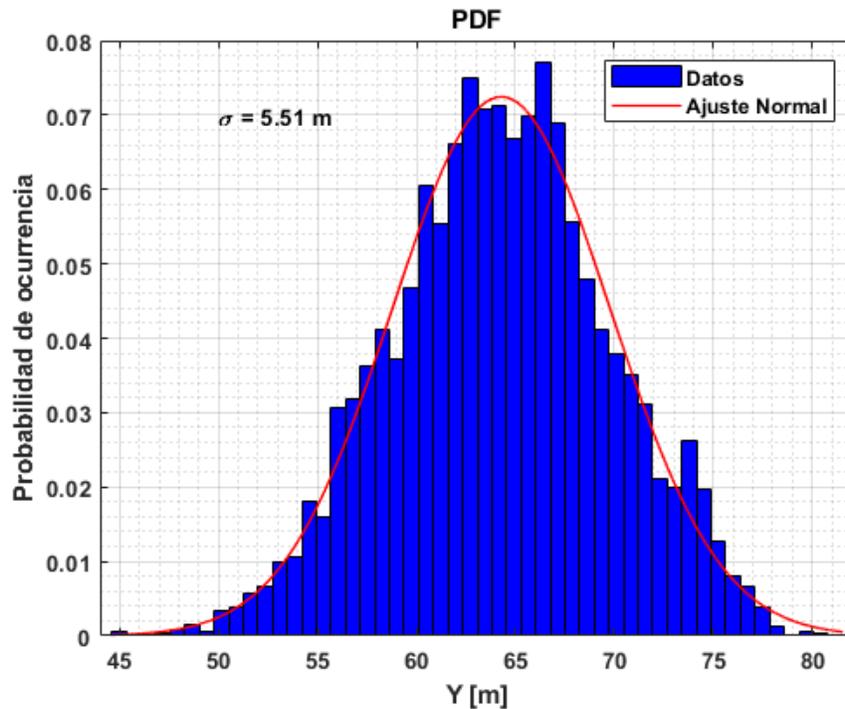


Figura 4.11 Distribución de probabilidad de la posición línea de costa.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Por último, se presenta un análisis mensual de la posición de la línea de costa a través de un diagrama tipo *boxplot* en la Figura 4.12. Se observa que, durante los meses de invierno, la posición media de la línea de costa tiende a retroceder, debido a la estacionalidad comentada en el subapartado 4.1. Durante los meses de verano la posición media de la línea de costa se sitúa alrededor de $Y = 70 \text{ m}$, mientras en los meses de invierno se sitúa entre $Y = 67 \sim 68 \text{ m}$. Los meses de invierno presentan menores límites inferiores, menores límites superiores y más valores atípicos que los meses de verano, tanto para el límite superior, como para el límite inferior.

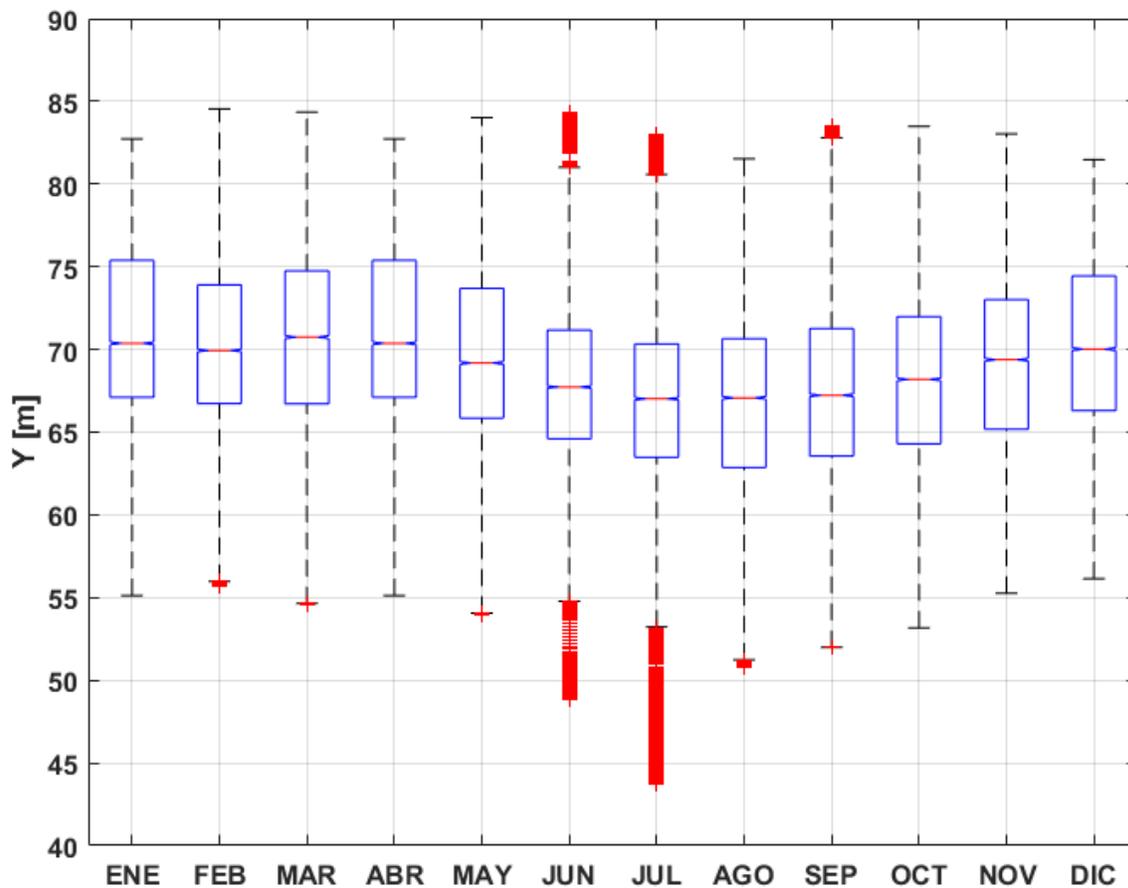


Figura 4.12 *Boxplot* mensual de la posición de la línea de costa.

4.4. Dominio numérico

Tal como se ha comentado anteriormente, la playa de Tairúa presenta una longitud de 1.2 km. Por lo tanto, en este estudio, el dominio numérico ha sido definido como 10 transectos

equiespaciados cada 100 m entre ellos. La posición geográfica de los transectos se ha definido en el sistema de coordenadas *NZGD 2000 UTM Zone 60S* (2135). La Figura 4.13 presenta el dominio numérico definido.

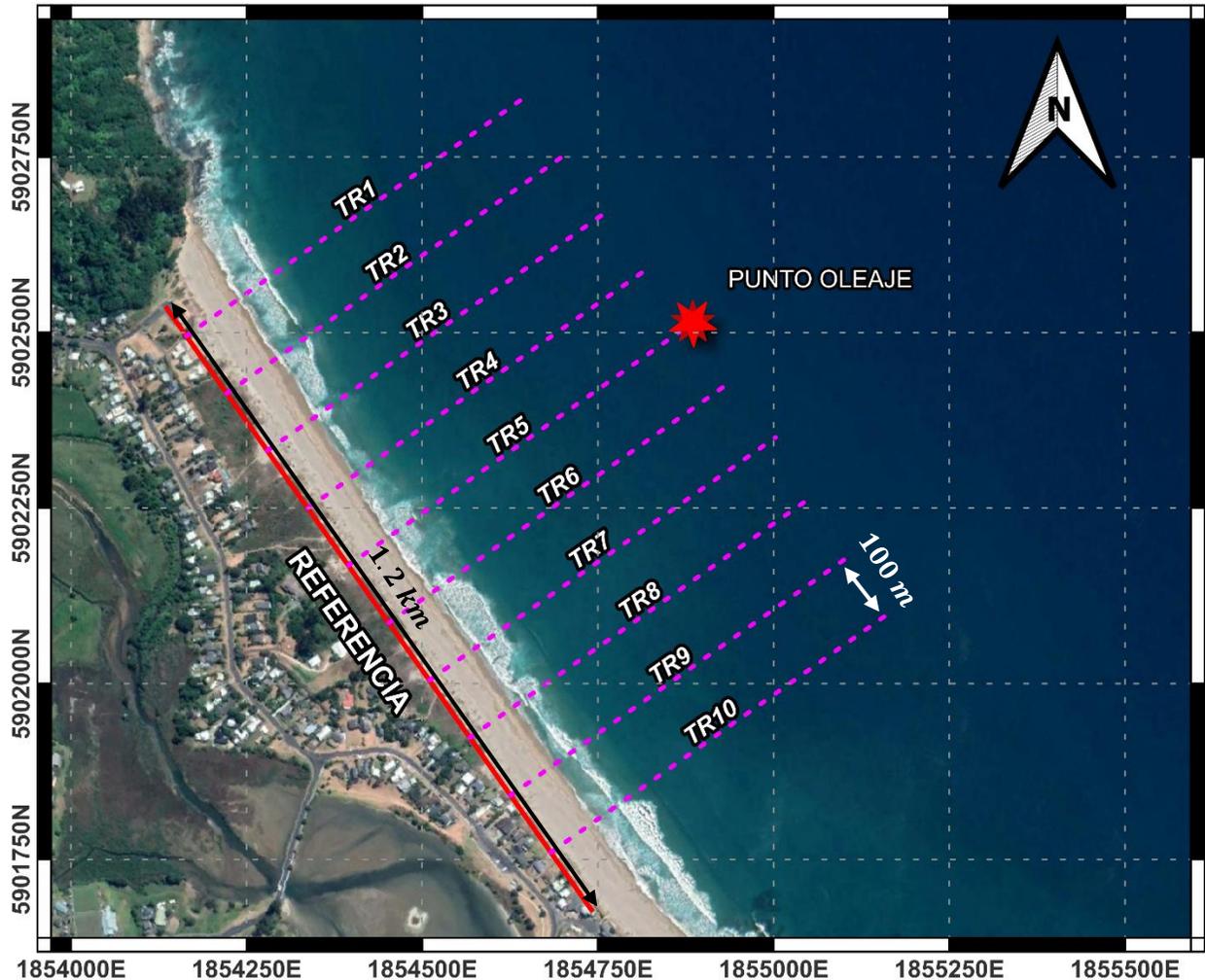


Figura 4.13 Dominio numérico planteado.

La línea de referencia y cada transecto se definen a partir de las coordenadas inicial y final. En la Tabla 4.1 se presentan las coordenadas iniciales (x_i, y_i) y finales (x_f, y_f) de la línea de referencia y de cada transecto.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Tabla 4.1. Coordenadas iniciales y finales de los transectos del dominio numérico y línea de referencia.

Línea	$(x_i, y_i)[UTM]$	$(x_f, y_f)[UTM]$
Referencia	(1854135.31, 5902535.92)	(1854940.61, 5901394.33)
TR1	(1854164.11, 5902495.09)	(1854654.40, 5902840.95)
TR2	(1854221.81, 5902413.30)	(1854712.10, 5902759.16)
TR3	(1854279.41, 5902331.64)	(1854769.70, 5902677.50)
TR4	(1854337.11, 5902249.85)	(1854827.40, 5902595.71)
TR5	(1854394.71, 5902168.19)	(1854885.00, 5902514.05)
TR6	(1854452.31, 5902086.54)	(1854942.60, 5902432.40)
TR7	(1854510.01, 5902004.75)	(1855000.30, 5902350.61)
TR8	(1854567.61, 5901923.09)	(1855057.90, 5902268.95)
TR9	(1854625.31, 5901841.30)	(1855115.60, 5902187.16)
TR10	(1854682.91, 5901759.64)	(1855173.20, 5902105.50)

Debido a que la playa se encuentra encajada entre dos acantilados, como condición de contorno en las fronteras, se determinó que el transporte en la zona de acantilado es nulo, o sea:

$$Q_{1-1/2} = Q_{10+1/2} = 0 \quad (4.3)$$

5. Resultados y discusión

En este capítulo se recogen los principales resultados obtenidos en el estudio. Primero, se presenta el resultado de las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad. A continuación, se presenta la calibración de los modelos, y finalmente, se presentan los resultados de la simulación completa de los datos de 1999 hasta 2099 así como la comparación entre los resultados de los modelos.

5.1. Análisis de sensibilidad

Para evaluar la respuesta de los modelos al variar los parámetros, se realizaron diversas simulaciones para el periodo de reanálisis (1999-2014), en las cuales se evaluó el cambio entre simulaciones al variar un parámetro y mantener los demás fijos. A continuación, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad para cada uno de los modelos seleccionados.

5.1.1. Modelo CoSMoS-COAST

El modelo considera los parámetros K de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos y \hat{H}_s , ΔT y ΔY del modelo *cross-shore*. Los valores de los parámetros fueron preseleccionados a partir del artículo de referencia del modelo (Vitousek et al., 2017a). Posteriormente, mediante simulaciones de prueba, se evaluaron los cambios en los resultados y se determinaron 3 valores para el análisis. La Tabla 5.1 presenta los valores utilizados para el análisis de sensibilidad de cada parámetro de calibración.

Tabla 5.1. Parámetros evaluados en el análisis de sensibilidad para el modelo CoSMoS-COAST.

Parámetro	Valores
ΔY [m]	(2, 4, 6)
ΔT [días]	(10, 20, 30)
\hat{H}_s [m]	(0.6, 0.8, 1)
K [-]	(0.001, 0.01, 0.1)

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

En la Figura 5.1 se presentan los resultados obtenidos para la variación del parámetro ΔY . Se observa que el parámetro controla el límite de erosión. Para $\Delta Y = 2 \text{ m}$, la línea de costa presenta un retroceso máximo de $Y = -6 \text{ m}$; para $\Delta Y = 4 \text{ m}$, el retroceso máximo aumenta a $Y = -18 \text{ m}$ y para el valor más alto del análisis, $\Delta Y = 6 \text{ m}$, el retroceso máximo aumenta hasta $Y = -29 \text{ m}$. Al observar las tasas de acreción y erosión a lo largo del tiempo, se puede notar que, cuanto mayor es el valor de ΔY , mayores son estas tasas.

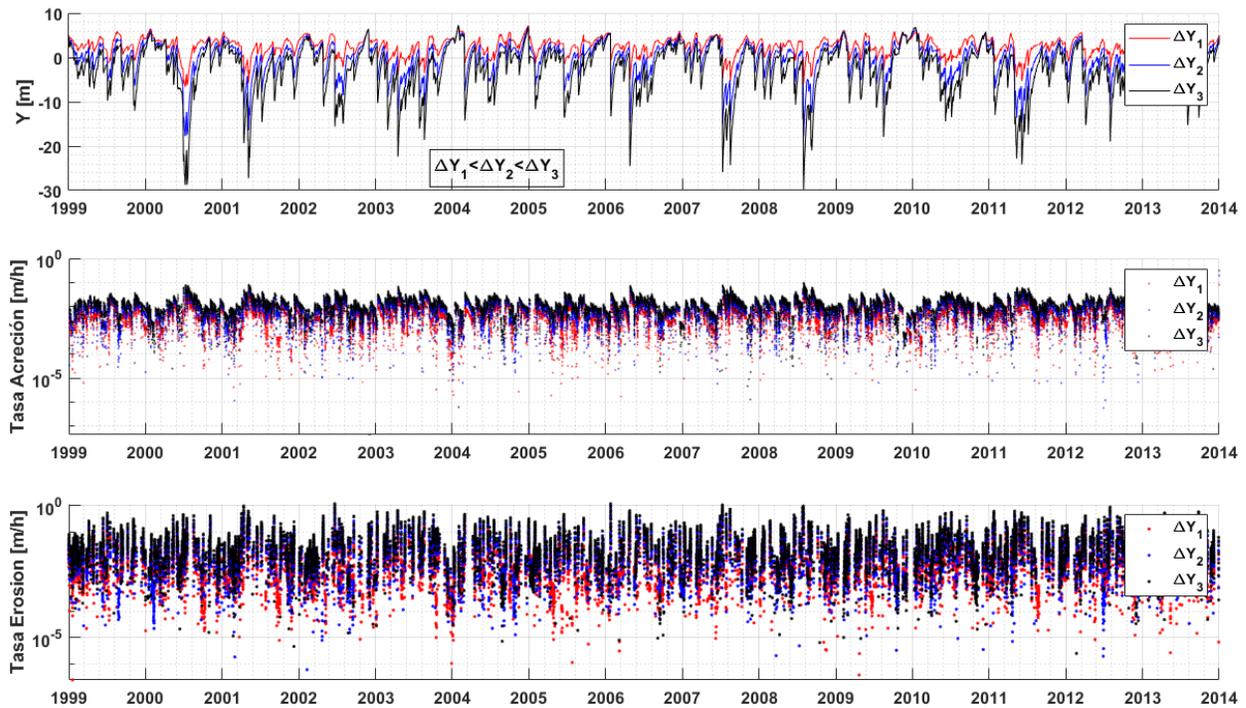


Figura 5.1 Análisis de sensibilidad del parámetro ΔY del modelo CoSMoS-COAST. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

La Figura 5.2 presenta el análisis de sensibilidad del parámetro ΔT . Se puede observar que, al aumentar el valor de este parámetro, las tasas de erosión y acreción disminuyen, limitando, consecuentemente, el rango de variación de las predicciones. Para $\Delta T = 10 \text{ días}$, los resultados del modelo varían entre $-29 \text{ m} < Y < 8 \text{ m}$; para $\Delta T = 20 \text{ días}$, el rango de variación cambia para $-18 \text{ m} < Y < 6 \text{ m}$ y finalmente para $\Delta T = 30 \text{ días}$, el rango de variación disminuye para $-17 \text{ m} < Y < 6 \text{ m}$.

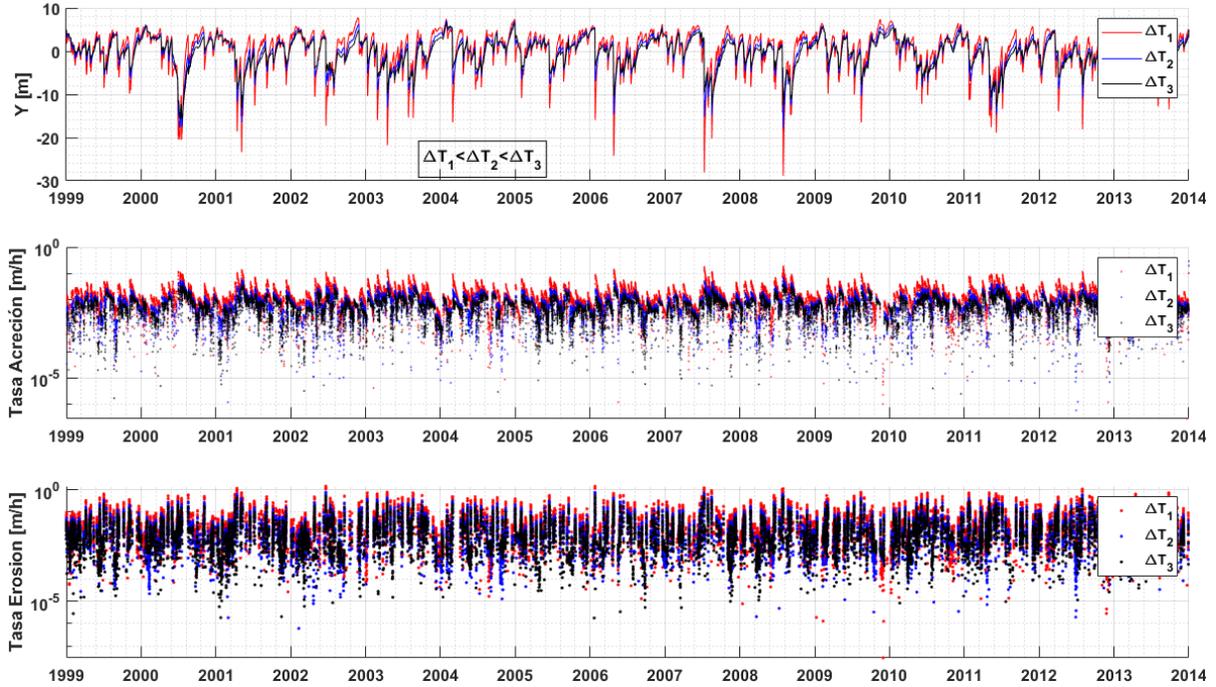


Figura 5.2 Análisis de sensibilidad del parámetro ΔT del modelo CoSMoS-COAST. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

En la Figura 5.3 se presenta el análisis del parámetro \hat{H}_s . El valor del parámetro determina la línea de base sobre la cual los valores de Y oscilan. Mayores valores de \hat{H}_s disminuyen los gradientes temporales tanto de acreción como de erosión. Al mismo tiempo que se disminuye la magnitud de los procesos de erosión y acreción, se desplaza la línea de base hacia mayores valores de Y . Para $\hat{H}_s = 0.6 \text{ m}$ la línea de base se localiza en $Y = -7 \text{ m}$ y las posiciones calculadas varían entre $-47 \text{ m} < Y < 5 \text{ m}$; por otro lado, para $\hat{H}_s = 0.8 \text{ m}$ la línea de base se localiza en $Y = 0 \text{ m}$ y las posiciones calculadas varían entre $-17 \text{ m} < Y < 7 \text{ m}$. Finalmente, para el mayor valor de este parámetro, $\hat{H}_s = 1 \text{ m}$, la línea de base se localiza en $Y = 3 \text{ m}$ y las posiciones calculadas varían entre $-8 \text{ m} < Y < 9 \text{ m}$.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

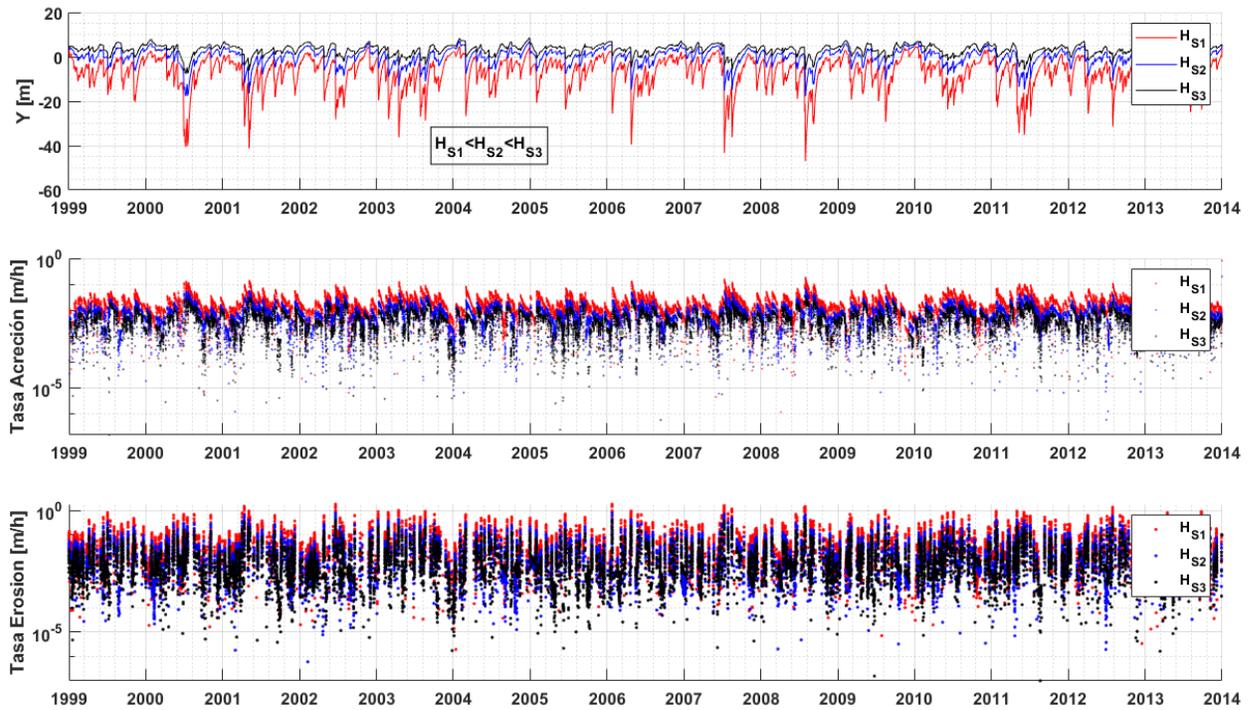


Figura 5.3 Análisis de sensibilidad del parámetro \hat{H}_s del modelo CoSMoS-COAST. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

El análisis del parámetro K , de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos, se presenta en la Figura 5.4. Se puede observar que, para el dominio numérico del caso de estudio planteado, al cambiar el orden de magnitud del parámetro K se da lugar a una diferencia media de tan solo 0.12 m entre los resultados de la simulación para $K = 0.001$ y la simulación para $K = 0.01$ y una diferencia media de 0.65 m entre las simulaciones para $K = 0.01$ y $K = 0.1$.

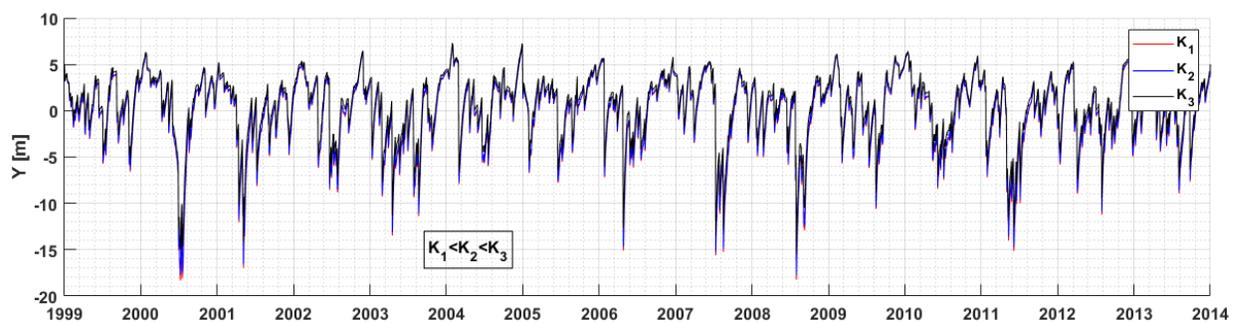


Figura 5.4 Análisis de sensibilidad del parámetro K del modelo CoSMoS-COAST.

5.1.2. Modelo COCOONED

El modelo considera los parámetros K de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos y k_{ero} , k_{acr} y ΔY_0 del modelo *cross-shore*. En la Tabla 5.2 se presentan los valores utilizados para cada parámetro.

Tabla 5.2. Parámetros evaluados en el análisis de sensibilidad para el modelo COCOONED.

Parámetro	Valores
ΔY_0 [m]	(50, 60, 70)
k_{acr} [-]	$(0.5, 2, 6) \times 10^{-4}$
k_{ero} [-]	$(0.5, 2, 6) \times 10^{-1}$
K [-]	(0.001, 0.01, 0.1)

La Figura 5.5 presenta la evolución del modelado de la línea de costa para tres distintos valores del parámetro ΔY_0 . Se puede observar que, al aumentar el valor de este parámetro, no cambian las tasas de erosión y acreción, solamente la línea de base sobre la cual las predicciones fluctúan. Este parámetro se hace importante para definir físicamente el límite de progradación de la línea de costa. También se puede observar que las tasas de erosión y acreción no se ven afectadas por este parámetro, salvo en los primeros meses de la simulación, hasta que el modelo se estabilice en su línea de base. Tal como se observa, para $\Delta Y_0 = 50$ m, la línea base se ubica en $Y = 5$ m, para $\Delta Y_0 = 60$ m, la línea avanza hacia $Y = 15$ m y para el valor más alto del parámetro, $\Delta Y_0 = 70$ m, la línea de base se desplaza hasta $Y = 25$ m.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

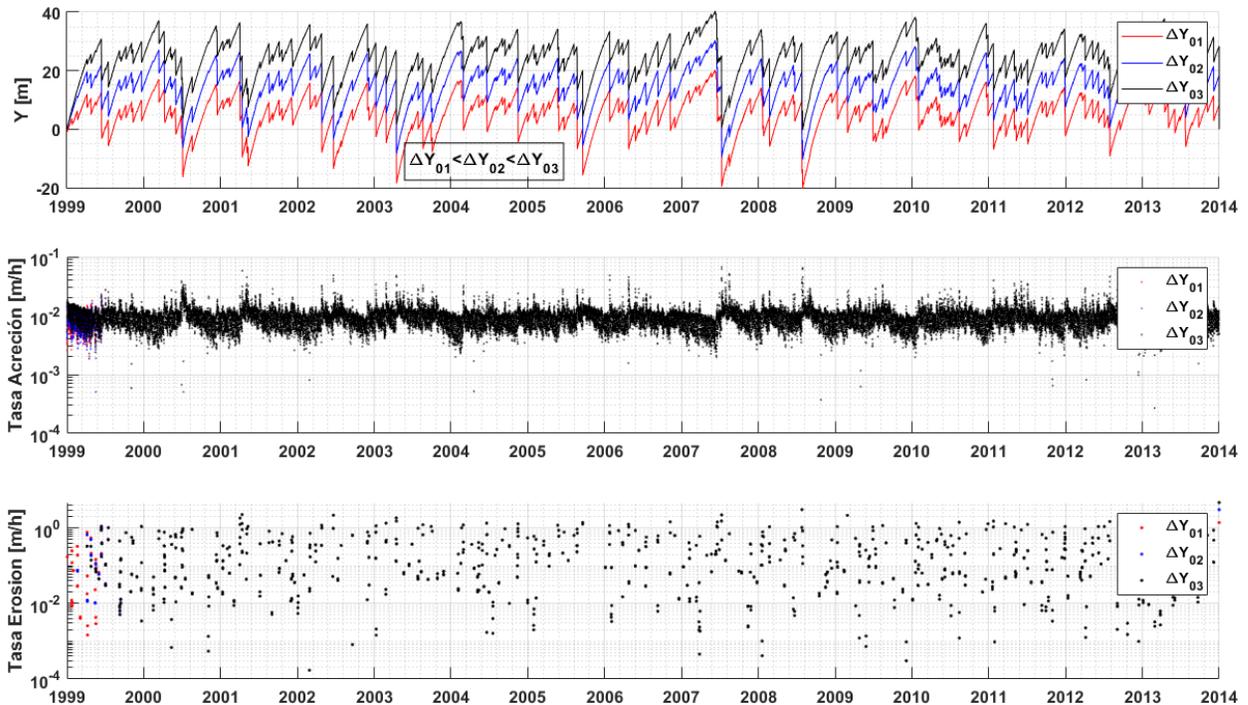


Figura 5.5 Análisis de sensibilidad del parámetro ΔY_0 del modelo COCOONED. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

Al aumentar el parámetro k_{acr} , se espera que los procesos de acreción sean de menor magnitud, tal como se presenta en la Figura 5.6. Además de atenuar los avances de la línea de costa, al plantear mayores valores de este parámetro, las tasas de acreción y, consecuentemente, los valores de las posiciones calculadas aumentan. Este parámetro resulta significativo para identificar las fluctuaciones de la línea de costa durante los periodos de acreción, además de la magnitud de estos procesos. Entre $k_{acr} = 0.5 \times 10^{-4}$ y $k_{acr} = 2 \times 10^{-4}$ las tasas de acreción se ven aumentadas, en media, un 161%, ya entre $k_{acr} = 2 \times 10^{-4}$ y $k_{acr} = 6 \times 10^{-4}$, las tasas aumentan, en media un 135%. Se observa también un incremento del 35% en la tasa de erosión media entre las simulaciones de $k_{acr} = 0.5 \times 10^{-4}$ y $k_{acr} = 2 \times 10^{-4}$ y del 22% entre las simulaciones para $k_{acr} = 2 \times 10^{-4}$ y $k_{acr} = 6 \times 10^{-4}$.

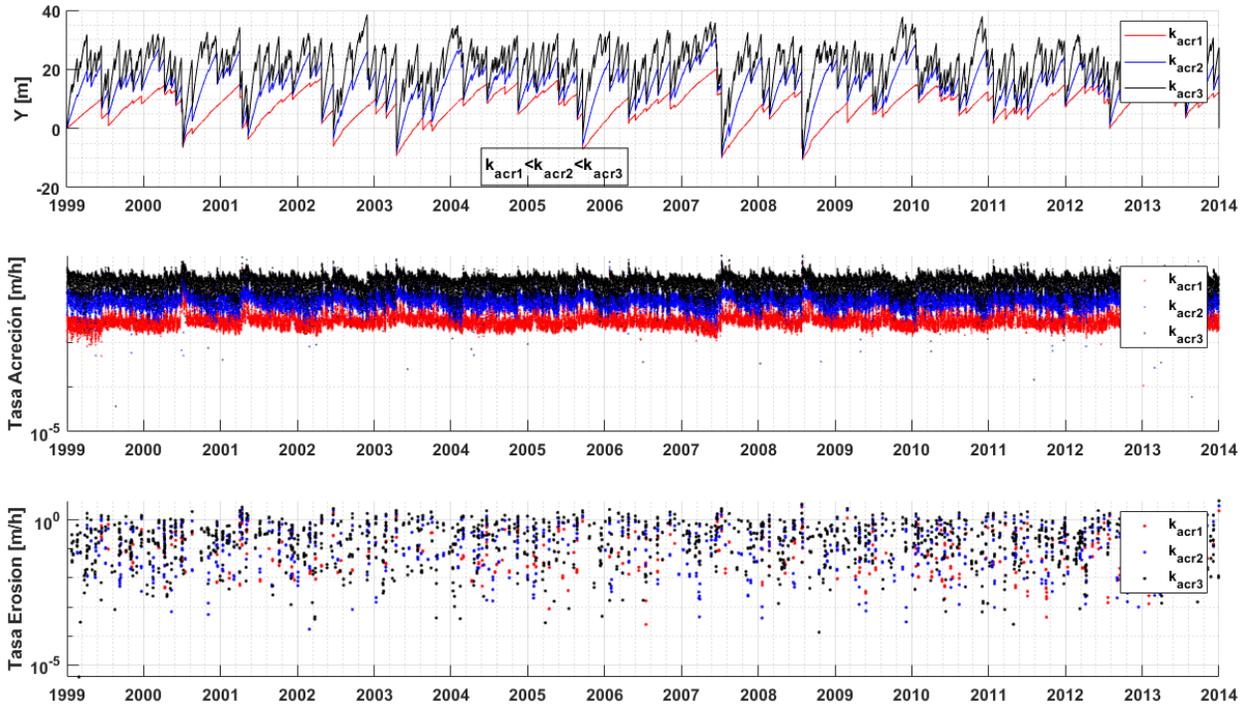


Figura 5.6 Análisis de sensibilidad del parámetro k_{acr} del modelo COCOONED. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

En la Figura 5.7 se presentan los resultados obtenidos al variar el parámetro k_{ero} . Se puede comparar los resultados a los obtenidos al variar k_{acr} , pero considerando que los procesos de erosión serán los más afectados. Al aumentar el valor del parámetro, las tasas de erosión aumentan y los valores de las posiciones calculadas son menores. Así como el parámetro k_{acr} , este parámetro resulta significativo para identificar las fluctuaciones de corto plazo de la línea de costa, principalmente en los procesos de erosión. Entre las simulaciones para $k_{ero} = 0.5 \times 10^{-1}$ y $k_{acr} = 2 \times 10^{-1}$ las tasas de erosión se ven aumentadas, de media, un 156%, ya entre, las simulaciones para $k_{ero} = 2 \times 10^{-1}$ y $k_{ero} = 6 \times 10^{-1}$ las mismas tasas aumentan, de media, un 76%. Las tasas de acreción aumentan un 27 y 9% respectivamente.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

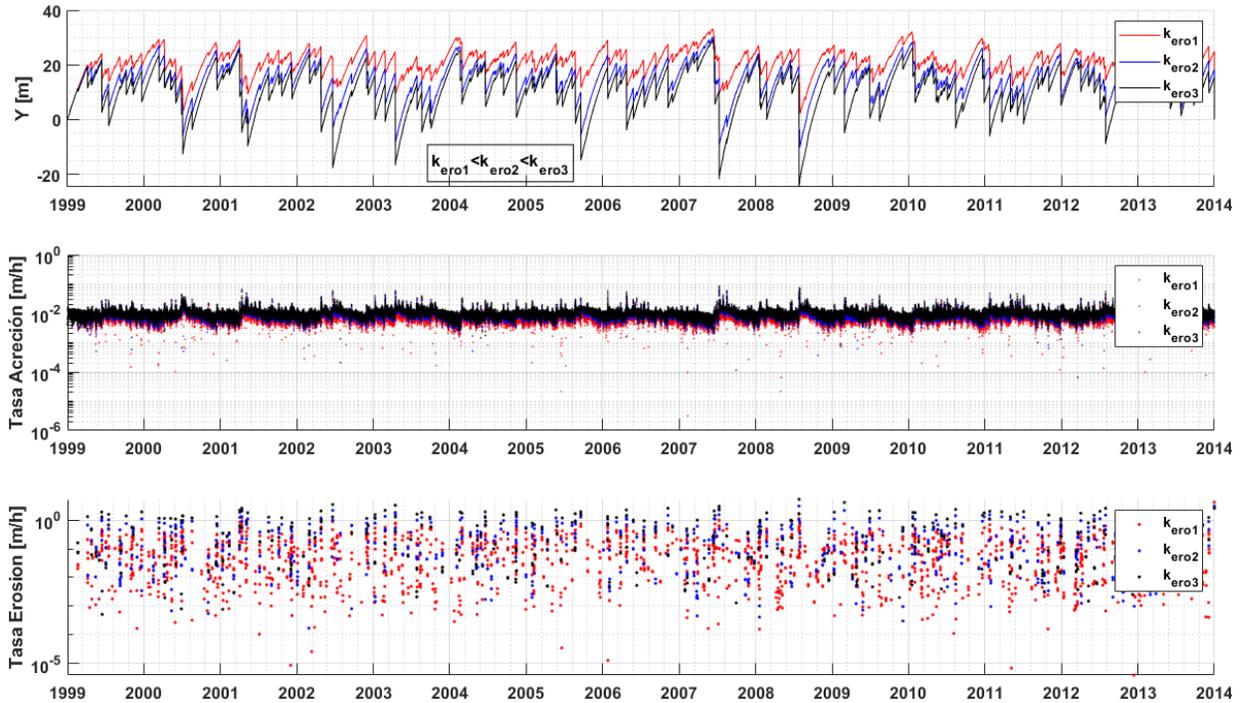


Figura 5.7 Análisis de sensibilidad del parámetro k_{ero} del modelo COCOONED. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

El parámetro K se asocia a cambios de medio a largo plazo debido al gradiente de transporte longitudinal de sedimentos. La Figura 5.8 presenta los resultados obtenidos para los distintos valores de este parámetro. Al aumentar el valor de K , los valores de las predicciones disminuyen, no presentando cambios superiores a 2.2 m, resultando en una diferencia media de 0.5 m entre las predicciones para $K = 0.001$ y $K = 0.01$ y una diferencia media de 0.8 m entre las predicciones para $K = 0.01$ y $K = 0.1$.

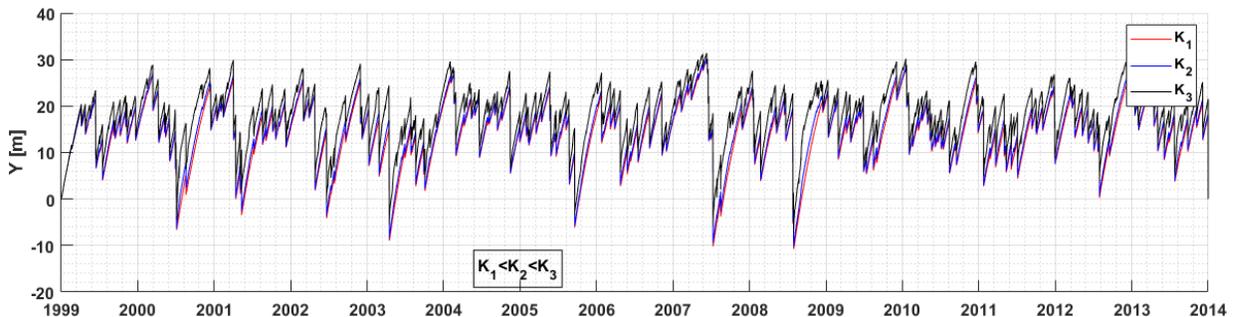


Figura 5.8 Análisis de sensibilidad del parámetro K del modelo COCOONED.

5.1.3. Modelo IH-LANS

El modelo IH-LANS considera los parámetros K de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos y k_{ero} , k_{acr} y ΔY_0 del modelo *cross-shore*. En la Tabla 5.3 se presentan los valores utilizados para el análisis de sensibilidad de cada parámetro.

Tabla 5.3. Parámetros evaluados en el análisis de sensibilidad para el modelo IH-LANS.

Parámetro	Valores
ΔY_0 [m]	(-10, 0, 10)
k_{acr} [-]	$(0.5, 2, 6) \times 10^{-4}$
k_{ero} [-]	$(0.5, 2, 6) \times 10^{-1}$
K [-]	(0.001, 0.01, 0.1)

La Figura 5.9 presenta la evolución del modelado de la línea de costa para tres distintos valores del parámetro ΔY_0 . Se puede observar que, al aumentar el valor de este parámetro, no cambian las tasas de erosión y acreción, solamente la línea de base sobre la cual las posiciones calculadas fluctúan. Para $\Delta Y_0 = -10$ m las predicciones fluctúan alrededor de $Y = -0.5$ m, para $\Delta Y_0 = 0$ m la línea de base se desplaza hacia $Y = 0.5$ m y para $\Delta Y_0 = 10$ m la línea de base se ubica en $Y = 19$ m.

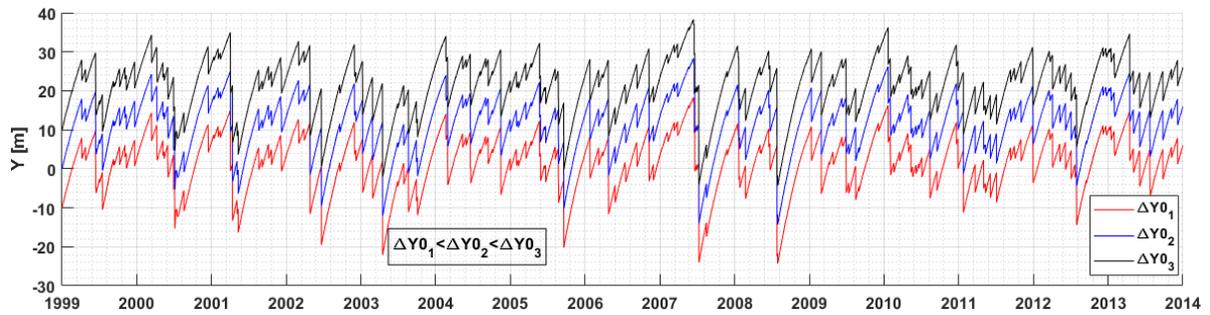


Figura 5.9 Análisis de sensibilidad del parámetro ΔY_0 del modelo IH-LANS.

El análisis para el parámetro k_{acr} se presenta en la Figura 5.10. Tal como se observado para el modelo COCOONED, este parámetro controla la magnitud de los procesos de acreción. Mayores valores de k_{acr} aumentan las tasas de acreción y, consecuentemente, la magnitud de estos procesos. La tasa media de acreción aumenta un 191% al aumentar el parámetro de

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

0.5×10^{-4} para 2×10^{-4} . Al aumentar el parámetro de 2×10^{-4} para 6×10^{-4} , la tasa de acreción media aumenta un 185%. Por otro lado, la tasa de acreción media disminuye un 74% al subir k_{acr} de 0.5×10^{-4} para 2×10^{-4} , mientras sube un 331% al subir el parámetro de 2×10^{-4} para 6×10^{-4} .

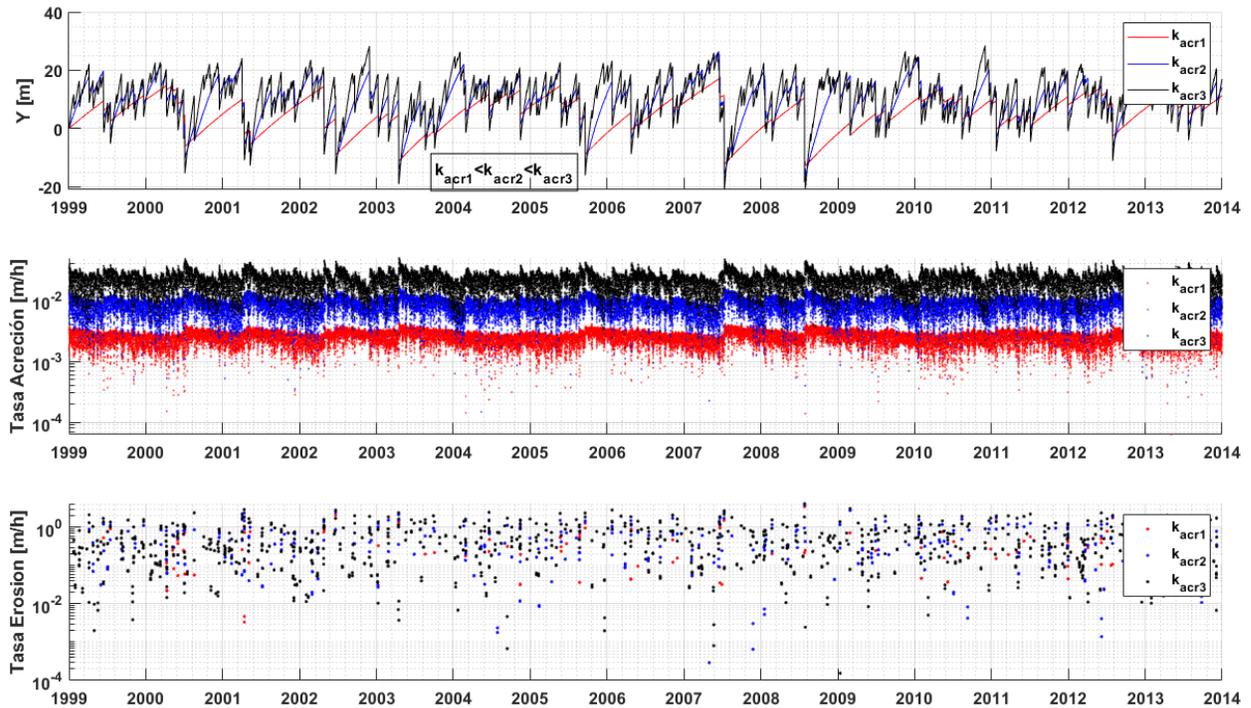


Figura 5.10 Análisis de sensibilidad del parámetro k_{acr} del modelo IH-LANS. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

En la Figura 5.11 se presenta el análisis de sensibilidad del parámetro k_{ero} . Tal como se ha mencionado anteriormente, este parámetro se comporta de manera semejante a k_{acr} , pero para los procesos de erosión. Mayores valores de k_{ero} aumentan las tasas de erosión y, consecuentemente, la magnitud de estos procesos. En este caso, la tasa media de erosión aumenta un 440% al aumentar el parámetro de 0.5×10^{-1} para 2×10^{-1} , mientras la de acreción aumenta un 143%. Por otro lado, al subir k_{ero} de 2×10^{-4} para 6×10^{-4} , la tasa de erosión media aumenta un 27%, mientras la tasa de acreción aumenta 381%.

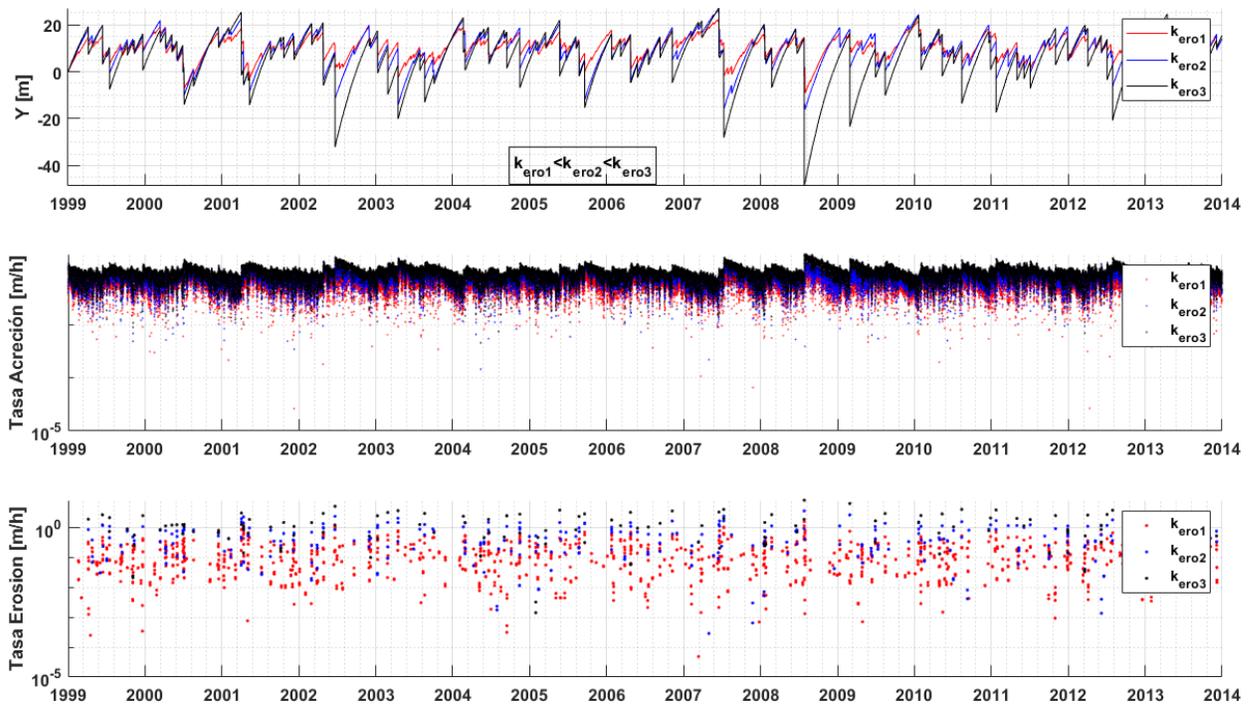


Figura 5.11 Análisis de sensibilidad del parámetro k_{ero} del modelo IH-LANS. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

La Figura 5.12 presenta las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad del parámetro K de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos. Así como se ha observado con los modelos CoSMoS-COAST y COCOONED, para el problema planteado, los resultados se ven afectados de menor manera por los cambios en este parámetro. La diferencia media entre las simulaciones para $K = 0.001$ y $K = 0.01$ es de $0.3 m$, mientras las diferencias medias entre las simulaciones para $K = 0.01$ y $K = 0.1$ es igual a $0.5 m$.

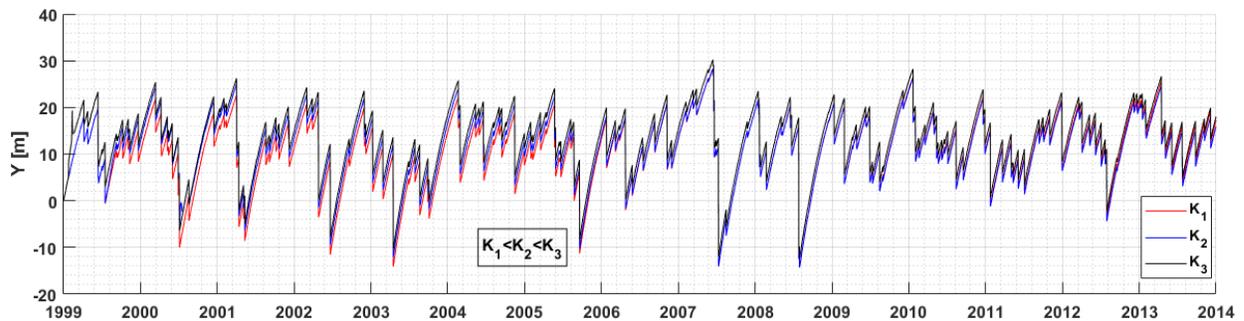


Figura 5.12 Análisis de sensibilidad del parámetro K del modelo IH-LANS.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

5.1.4. Modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido

El modelo presenta los parámetros K de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos y ϕ , c y r del modelo *cross-shore*. La Tabla 5.4 presenta los valores utilizados para el análisis de sensibilidad de cada parámetro de calibración.

Tabla 5.4 Parámetros evaluados en el análisis de sensibilidad para el modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido.

Parámetro	Valores
r [-]	(0.25, 0.27, 0.29)
c [-]	$(1, 3, 7) \times 10^{-4}$
ϕ [días]	(20, 30, 40)
K [-]	(0.001, 0.01, 0.1)

La Figura 5.13 presenta el análisis de sensibilidad del parámetro ϕ . Este parámetro es el factor de respuesta del sistema o parámetro de decaimiento. Valores mayores de ϕ inducen el modelo a calcular menores avances de la línea de costa. Al aumentar ϕ de 20 hasta 30 días, se observa una diferencia media de 12.9 m, mientras al aumentar de 30 hasta 40 días la diferencia media es de 7.5 m.

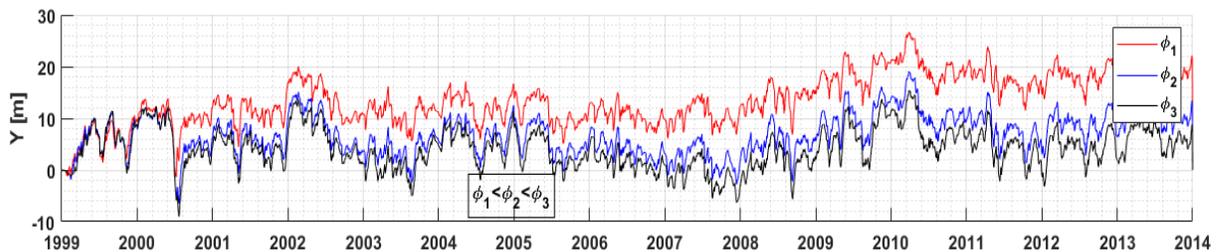


Figura 5.13 Análisis de sensibilidad del parámetro ϕ del modelo ShoreFor.

El análisis de sensibilidad del parámetro r se presenta en la Figura 5.14. El parámetro determina la tasa entre los efectos de acreción y erosión. Valores menores de r inducen una predominancia de los procesos de acreción, mientras valores mayores inducen una respuesta más erosiva. Al observar las tasas de acreción y erosión, no se pueden observar cambios de órdenes de magnitud y los cambios medios entre las tasas de erosión y acreción de las tres

simulaciones son inferiores al 20%. El parámetro se hace relevante para determinar la tendencia de las predicciones.

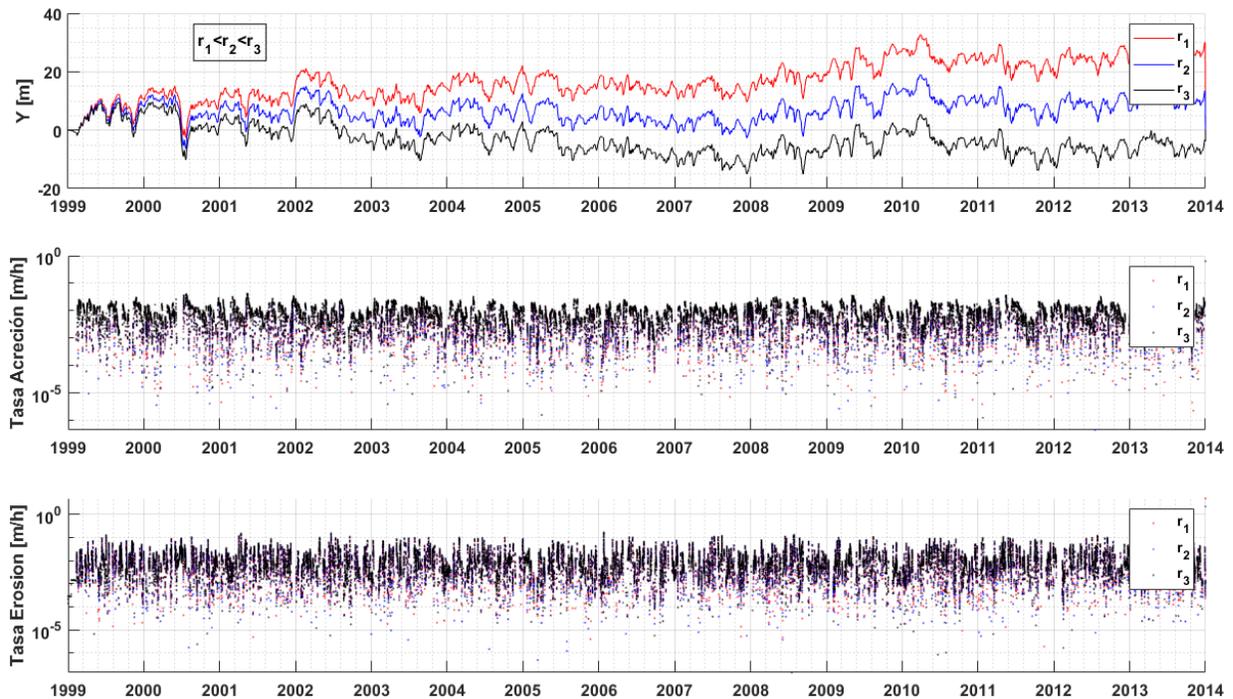


Figura 5.14 Análisis de sensibilidad del parámetro r del modelo ShoreFor. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

En la Figura 5.15 se presenta el análisis de sensibilidad del parámetro c . El parámetro controla la magnitud de los procesos de erosión y acreción. Al incrementar el valor del parámetro, las tasas de erosión y acreción aumentan, aumentando el rango de los resultados del modelo. Para $c = 1 \times 10^{-4}$ las posiciones calculadas varían entre $-2 \text{ m} < Y < 10 \text{ m}$, para $c = 3 \times 10^{-4}$ varían entre $-9 \text{ m} < Y < 20 \text{ m}$ y para $c = 7 \times 10^{-4}$ varían entre $-11 \text{ m} < Y < 28 \text{ m}$. Comparando las tasas de acreción y erosión medias entre las simulaciones, al subir c de 1×10^{-4} hasta 3×10^{-4} , estas aumentan un 158 y 230% respectivamente. Entre las simulaciones para $c = 3 \times 10^{-4}$ y $c = 7 \times 10^{-4}$ las tasas medias de acreción y erosión aumentan un 47 y 44% respectivamente. Este parámetro es relevante para determinar la magnitud de los procesos de erosión y acreción de corto plazo (asociados al movimiento *cross-shore*), una vez que es el único parámetro del modelo que influye en las tasas de erosión y acreción.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

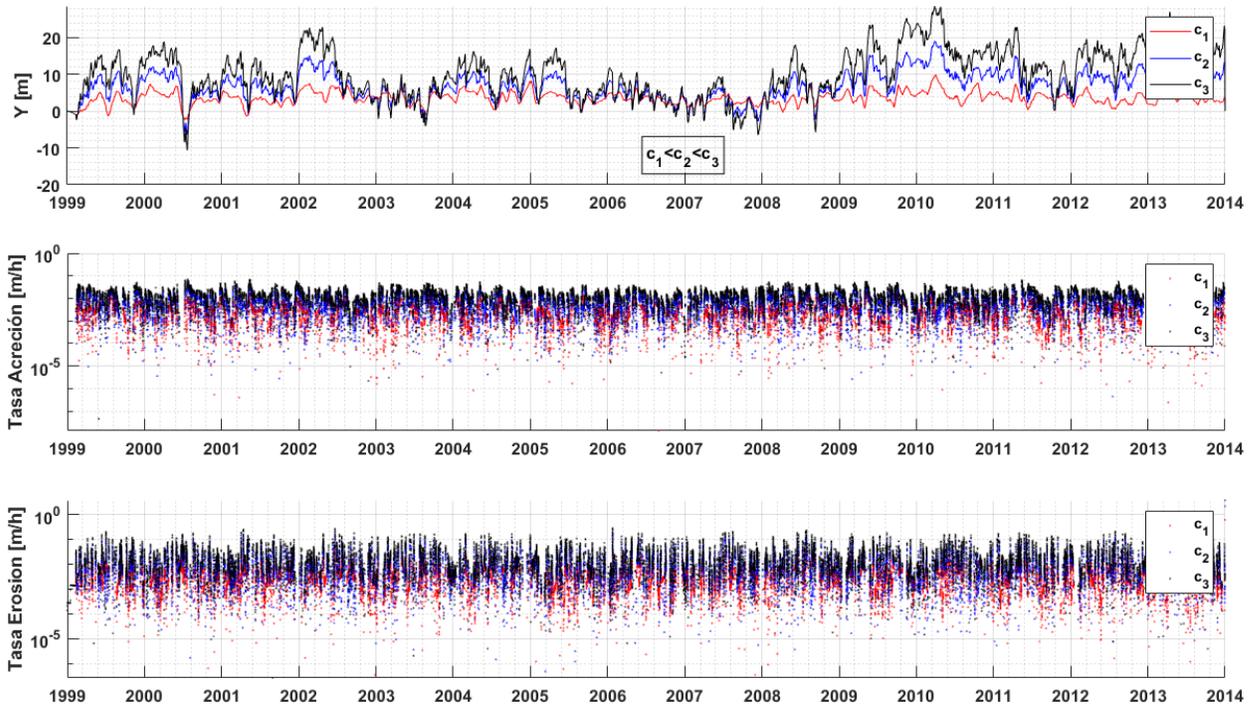


Figura 5.15 Análisis de sensibilidad del parámetro c del modelo ShoreFor. Panel superior: resultados de la posición de línea de costa. Panel intermedio: tasas de acreción calculadas. Panel inferior: tasas de erosión calculadas.

El análisis de sensibilidad del parámetro K , de la formulación del transporte longitudinal de sedimentos, se presenta en la Figura 5.16. Tal como observado para los demás modelos, para el caso de estudio planteado, los resultados se ven afectados de menor manera por este parámetro. La diferencia media entre las simulaciones para $K = 0.001$ y $K = 0.01$ es de 0.25 m , mientras la diferencia media entre las simulaciones para $K = 0.01$ y $K = 0.1$ es de 0.20 m .

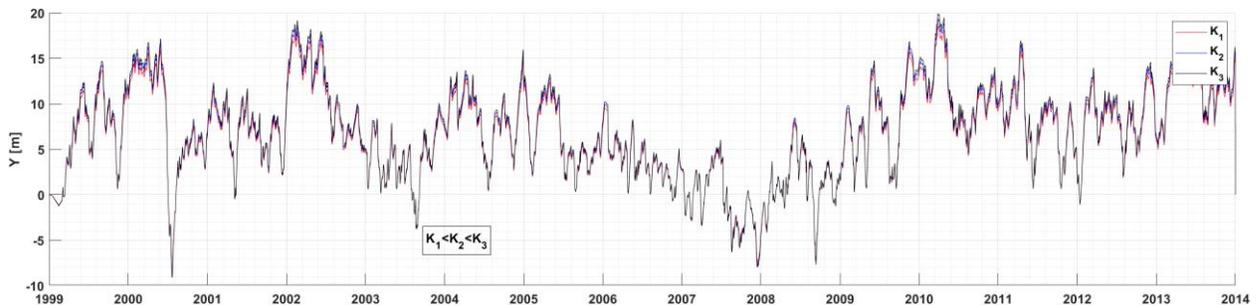


Figura 5.16 Análisis de sensibilidad del parámetro K del modelo ShoreFor integrado a modelo híbrido.

5.2. Calibración

El proceso de calibración se realizó mediante la metodología expuesta en el subapartado 3.7. Debido a ser un proceso en el cual se llevaron a cabo más de 1000 simulaciones por modelo, se presentará en este apartado, un resumen de los resultados definitivos a partir de los cuales se determinaron los parámetros calibrados.

El período de calibración elegido es el mismo de la disponibilidad de datos de posición de la línea de costa (Figura 4.10), o sea, de enero de 1999 hasta diciembre de 2013. Los siguientes subapartados muestran los resultados obtenidos en la calibración de cada modelo seleccionado.

5.2.1. Modelo CoSMoS-COAST

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad, se determinaron los conjuntos de los parámetros K , \hat{H}_s , ΔT y ΔY buscando maximizar el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r) y minimizar el error cuadrático medio (RMSE). La Tabla 5.5 presenta el conjunto final de parámetros seleccionado. Los resultados de las simulaciones para cada combinación de estos parámetros se presentan en el panel superior de la Figura 5.17, así como el resultado del modelo calibrado en el panel inferior.

Tabla 5.5 Conjunto final de parámetros utilizados para la calibración del modelo CoSMoS-COAST.

Parámetro	Valores
ΔY [m]	(7.5,7.6, ...,8.5)
ΔT [días]	(80,81, ...,95)
\hat{H}_s [m]	(0.75,0.76, ...,0.85)
K [-]	(0.04, 0.05, ..., 0.08)

Los parámetros calibrados obtenidos fueron: $\Delta Y = 8.0 \text{ m}$; $\Delta T = 90$; $\hat{H}_s = 0.85 \text{ m}$; $K = 6 \times 10^{-2}$. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue $\rho_r = 0.55$, indicando una correlación moderada entre el resultado de la simulación y los datos medidos. El **RMSE** obtenido fue de **3.95 m**.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

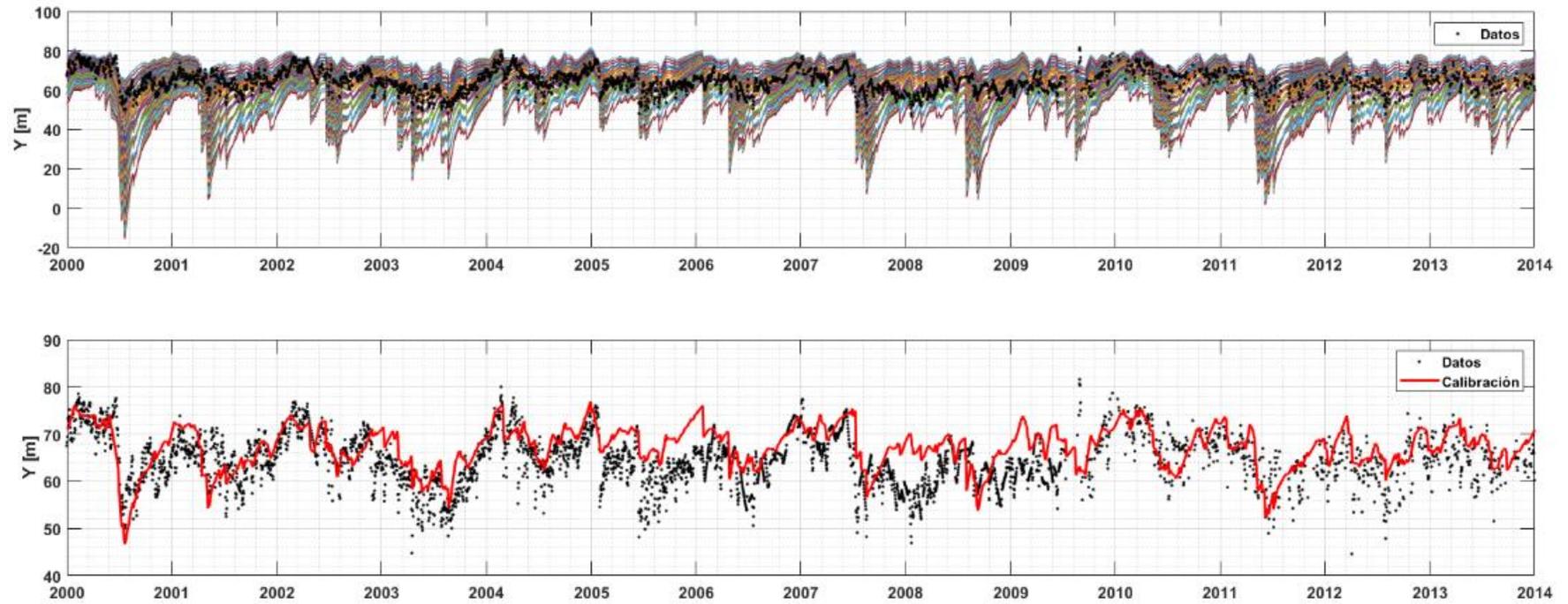


Figura 5.17 Resultados de la calibración del modelo CoSMoS-COAST. Panel superior: simulaciones realizadas para el rango de parámetros expuesto en la Tabla 5.5. Panel inferior: curva obtenida por el método de calibración; $Y = 8.0 \text{ m}$; $\Delta T = 90$; $\hat{H}_s = 0.85 \text{ m}$; $K = 6 \times 10^{-2}$.

5.2.2. Modelo COCOONED

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad, se determinaron los conjuntos de los parámetros K , k_{acr} , k_{ero} y ΔY_0 buscando maximizar el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r) y minimizar el error cuadrático medio ($RMSE$). La tabla 5.6 presenta el conjunto final de parámetros seleccionado. Los resultados de las simulaciones para cada combinación de estos parámetros se presentan en el panel superior de la Figura 5.18, así como el resultado del modelo calibrado en el panel inferior.

Tabla 5.6 Conjunto final de parámetros utilizados para la calibración de modelo COCOONED.

Parámetro	Valores
ΔY_0 [m]	(60,61, ..., 70)
k_{acr} [-]	$(5,5.2, \dots, 7) \times 10^{-5}$
k_{ero} [-]	(0.08,0.09, ..., 0.15)
K [-]	(0.04, 0.05, ..., 0.08)

Los parámetros calibrados obtenidos fueron: $\Delta Y_0 = 65 \text{ m}$; $k_{acr} = 6.5 \times 10^{-5}$; $k_{ero} = 0.1$; $K = 6 \times 10^{-2}$. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue $\rho_r = 0.50$, indicando una correlación moderada entre el resultado de la simulación y los datos medidos. El $RMSE$ obtenido fue de **4.18 m**.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

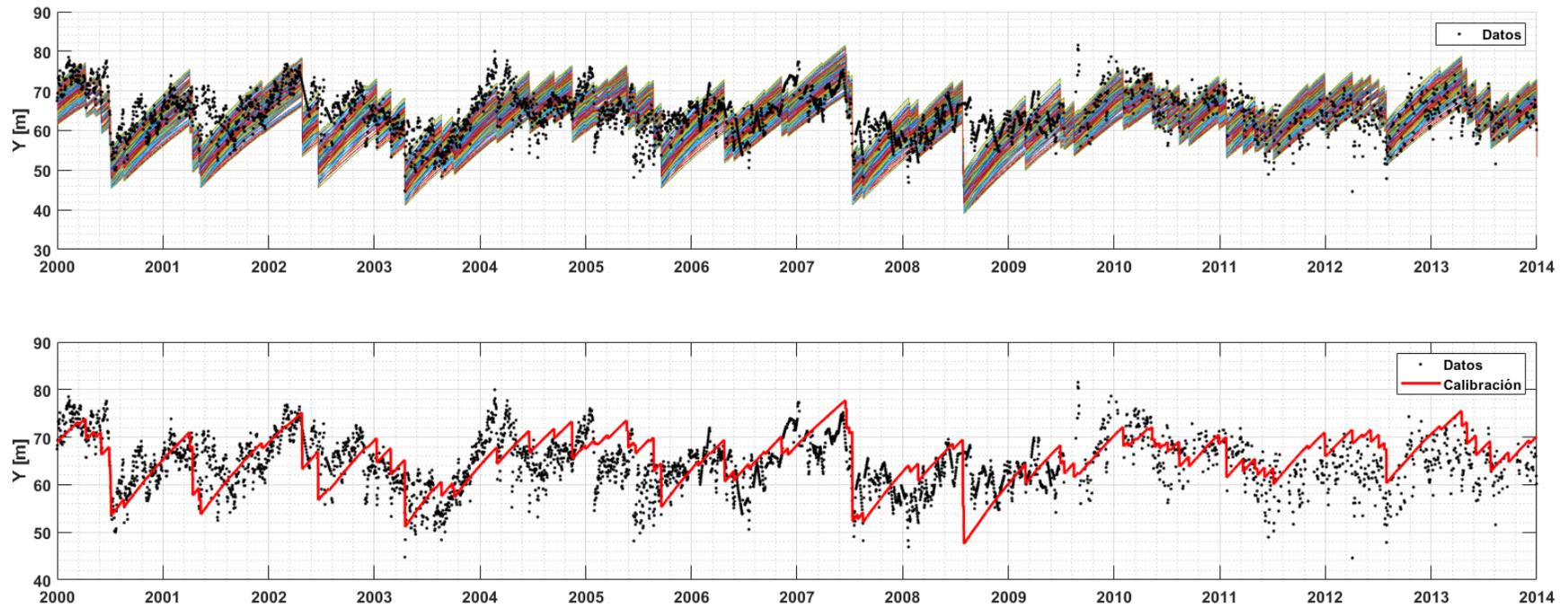


Figura 5.18 Resultados de la calibración del modelo COCOONED. Panel superior: simulaciones realizadas para el rango de parámetros expuesto en la Tabla 5.6. Panel inferior: curva obtenida por el método de calibración; $\Delta Y_0 = 65 \text{ m}$; $k_{acr} = 6.5 \times 10^{-5}$; $k_{ero} = 0.1$; $K = 6 \times 10^{-2}$.

5.2.3. Modelo IH-LANS

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad, se determinaron los conjuntos de los parámetros K , k_{acr} , k_{ero} y ΔY_0 buscando maximizar el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r) y minimizar el error cuadrático medio ($RMSE$). La Tabla 5.7 presenta el conjunto final de parámetros seleccionado. Los resultados de las simulaciones para cada combinación de estos parámetros se presentan en el panel superior la Figura 5.19, así como el resultado del modelo calibrado en el panel inferior.

Tabla 5.7 Conjunto final de parámetros utilizados para la calibración del modelo IH-LANS.

Parámetro	Valores
ΔY_0 [m]	(-8, -7.9, ..., -7)
k_{acr} [-]	(5.5, 5.6, ..., 6.5) $\times 10^{-4}$
k_{ero} [-]	(0.08, 0.09, ..., 0.15)
K [-]	(0.04, 0.05, ..., 0.08)

Los parámetros calibrados obtenidos fueron: $\Delta Y_0 = -7.1 \text{ m}$; $k_{acr} = 6.5 \times 10^{-5}$; $k_{ero} = 9 \times 10^{-2}$; $K = 6 \times 10^{-2}$. El coeficiente de correlación de Pearson obtenido fue $\rho_r = 0.52$, indicando una correlación moderada entre el resultado de la simulación y los datos medidos. El $RMSE$ obtenido fue de **3.88 m**.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

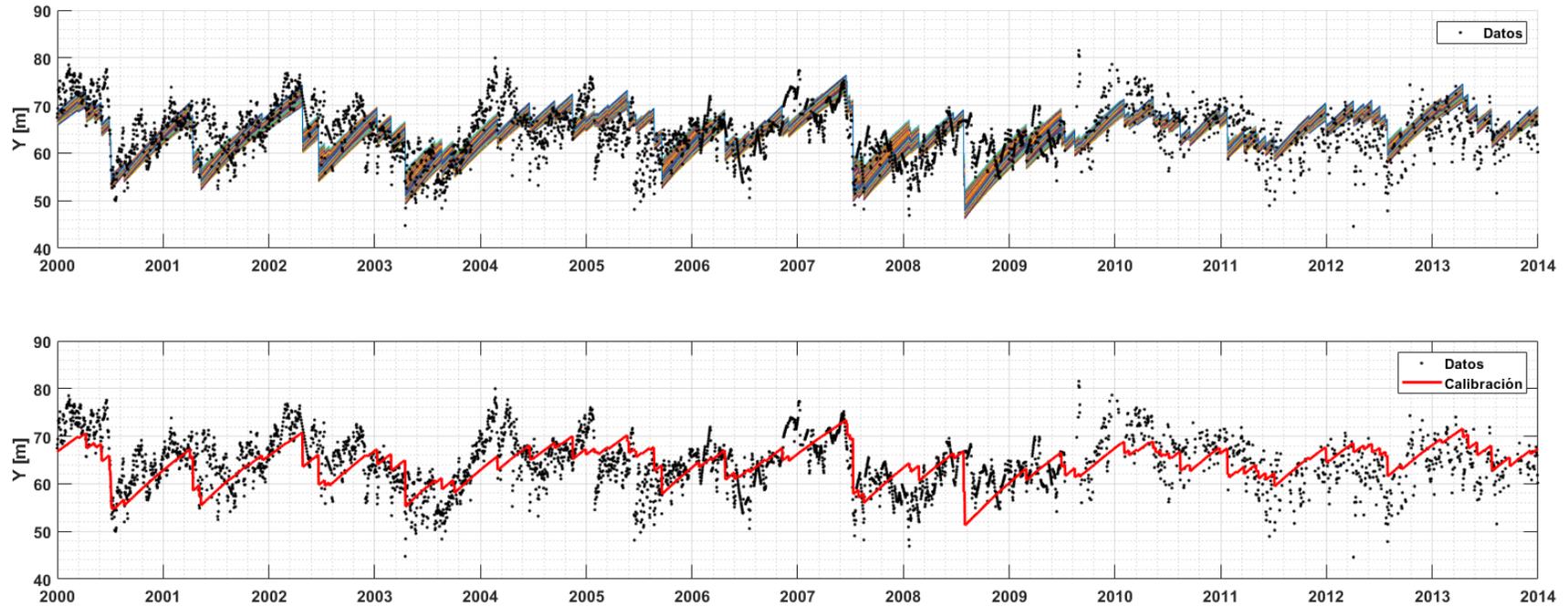


Figura 5.19 Resultados de la calibración del modelo IH-LANS. Panel superior: simulaciones realizadas para el rango de parámetros expuesto en la Tabla 5.7. Panel inferior: curva obtenida por el método de calibración; $\Delta Y_0 = -7.1 \text{ m}$; $k_{acr} = 6.5 \times 10^{-5}$; $k_{ero} = 9 \times 10^{-2}$; $K = 6 \times 10^{-2}$.

5.2.4. Modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad, se determinaron los conjuntos de los parámetros K , r , c y ϕ buscando maximizar el coeficiente de correlación de Pearson (ρ_r) y minimizar el error cuadrático medio ($RMSE$). La Tabla 5.8 presenta el conjunto final de parámetros seleccionado. Los resultados de las simulaciones para cada combinación de estos parámetros se presentan el panel superior de la Figura 5.20, así como el resultado del modelo calibrado en el panel inferior.

Tabla 5.8 Conjunto de parámetros usados para la calibración final de modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido.

Parámetro	Valores
r [-]	(0.260, 0.261, ..., 0.268)
c [-]	$(3.2, 3.1, \dots, 3.7) \times 10^{-4}$
ϕ [días]	(80, 85, ..., 100)
K [-]	(0.04, 0.05, ..., 0.08)

Los parámetros calibrados obtenidos fueron: $r = 0.262$; $c = 3.5 \times 10^{-4}$; $\phi = 90$ días; $K = 6.2 \times 10^{-2}$. El coeficiente de correlación obtenido fue $\rho_r = 0.65$, indicando una correlación alta entre el resultado de la simulación y los datos medidos. El $RMSE$ obtenido fue de **4.08 m**.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

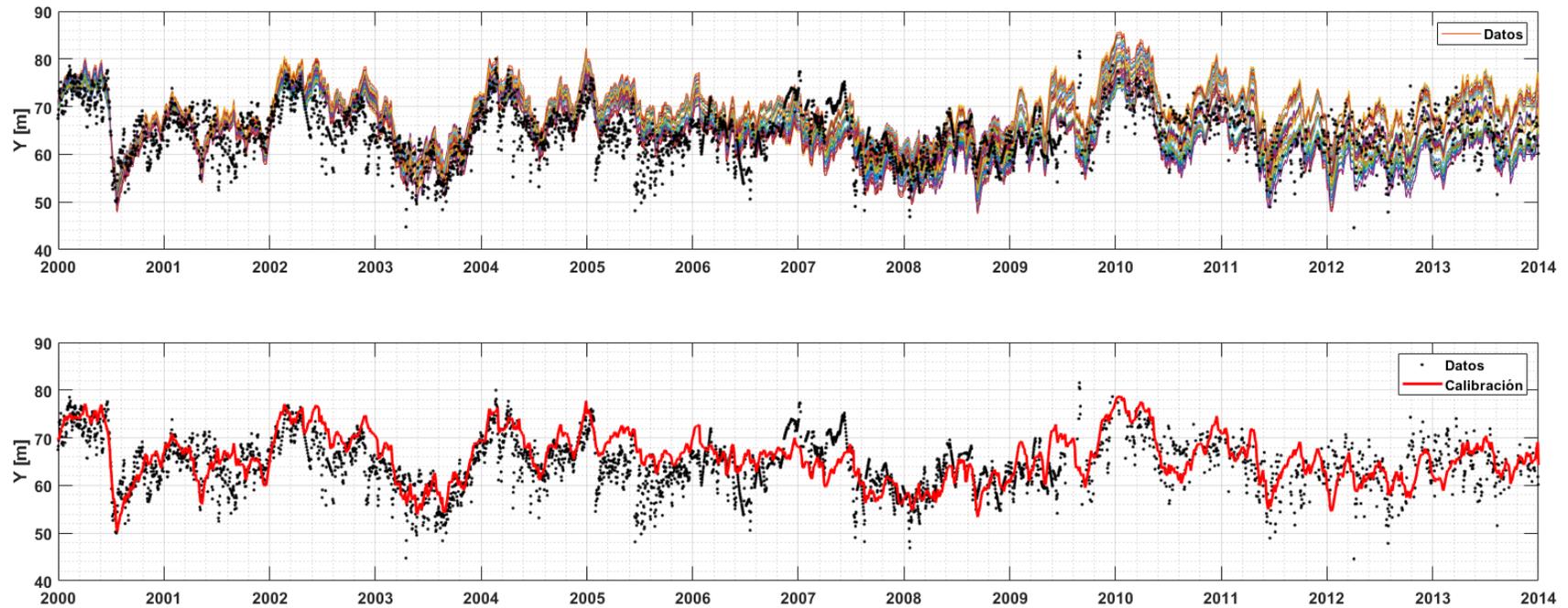


Figura 5.20 Resultados de la calibración del ShoreFor integrado en modelo híbrido. Panel superior: simulaciones realizadas para el rango de parámetros expuesto en la Tabla 5.8. Panel inferior: curva obtenida por el método de calibración; $r = 0.262$; $c = 3.52 \times 10^{-4}$; $\phi = 90$ días; $K = 6.2 \times 10^{-2}$.

5.3. Predicción de la evolución de la línea de costa 1999 - 2099

El proceso de análisis de sensibilidad y calibración permitieron la determinación de los parámetros de cada modelo, posibilitando la simulación para el período completo del forzamiento. La Tabla 5.9 presenta un resumen de los valores obtenidos para cada parámetro de calibración evaluado y la figura 5.21 presenta la sobreposición de las curvas calibradas para cada uno de los modelos aplicados.

Tabla 5.9 Conjunto de parámetros usados para la calibración final de modelo ShoreFor integrado en modelo híbrido.

<i>CoSMoS-COAST</i>		<i>COCOONED</i>	
Parámetro	Valor calibrado	Parámetro	Valor calibrado
ΔY [m]	8.0	ΔY_0 [m]	65
ΔT [días]	90	k_{acr} [-]	6.5×10^{-5}
\hat{H}_s [m]	0.85	k_{ero} [-]	0.1
K [-]	6×10^{-2}	K [-]	6×10^{-2}
<i>IH-LANS</i>		ShoreFor integrado en modelo híbrido	
Parámetro	Valor calibrado	Parámetro	Valor calibrado
ΔY_0 [m]	-7.1	r [-]	0.262
k_{acr} [-]	6.5×10^{-5}	c [-]	3.5×10^{-4}
k_{ero} [-]	9×10^{-2}	ϕ [días]	90
K [-]	6×10^{-2}	K [-]	6.2×10^{-2}

La Figura 5.22 presenta los resultados de la posición media de la línea de costa obtenidos para todas las simulaciones, graficados en 4 períodos de 25 años cada una. Adicional a los valores de posición de línea de costa modelados, se graficó la energía del oleaje ($E = 1/16\rho g H_s$, relativizada dividiendo por el valor máximo del registro) para posibilitar la visualización simultanea de la evolución de la posición modelada con la energía incidente.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

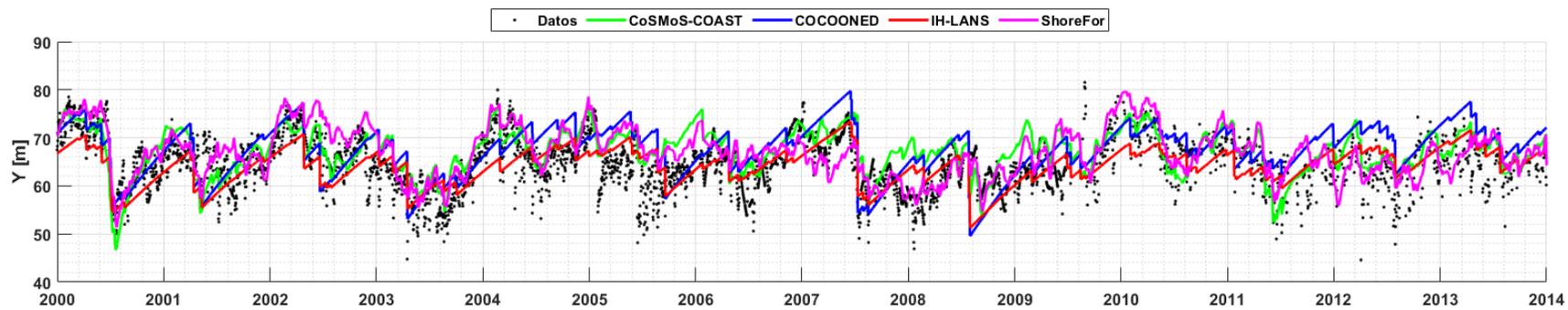


Figura 5.21 Resultados de la calibración de los modelos.

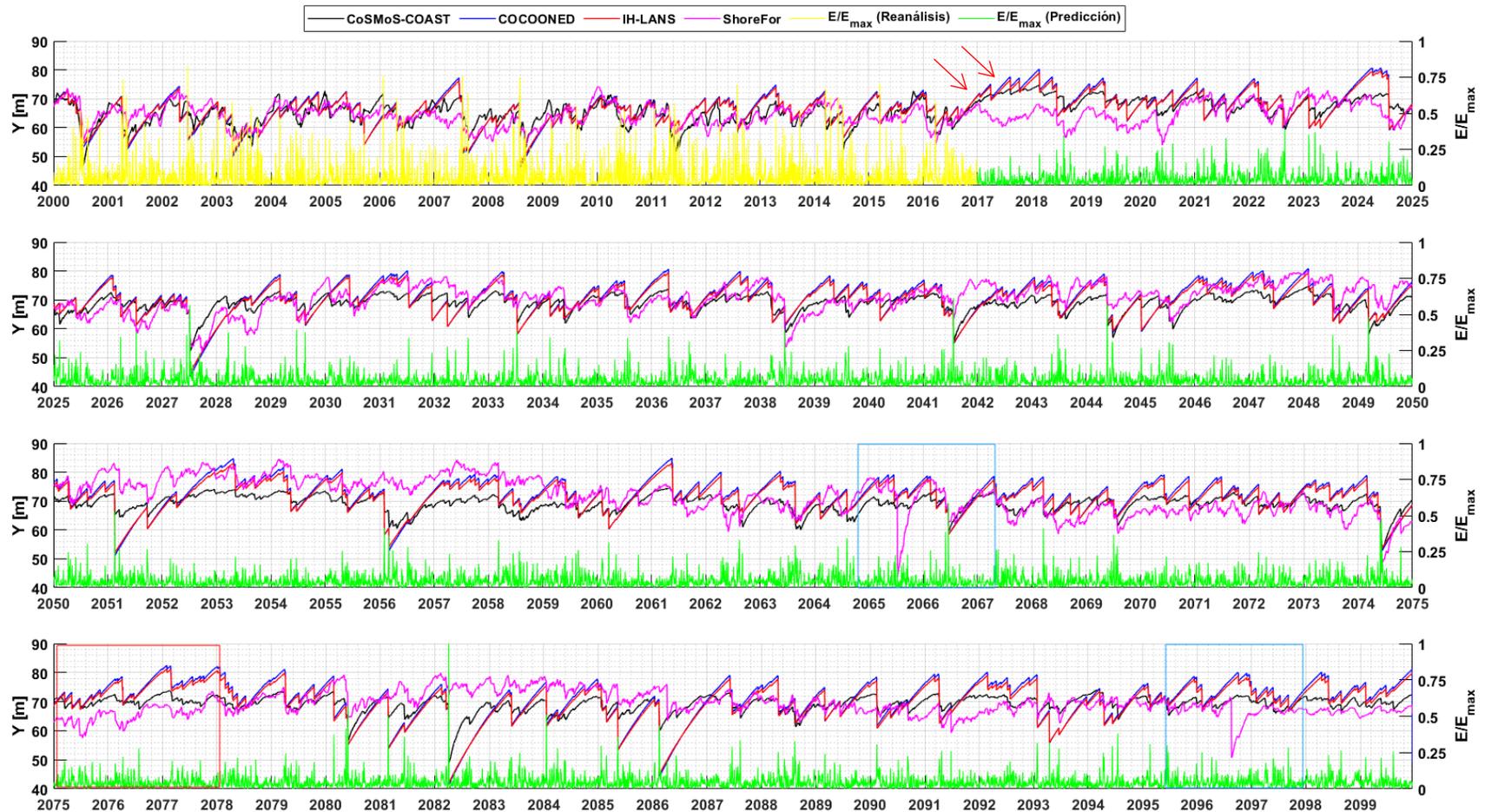


Figura 5.22 Resultados del modelado de la línea de costa para los cuatro modelos evaluados y energía de oleaje incidente. Panel superior: periodo simulado de 01/01/2000 hasta 01/01/2025. Segundo panel: periodo simulado de 01/01/2025 hasta 01/01/2050. Tercer panel: periodo simulado de 01/01/2050 hasta 01/01/2075. Panel inferior: periodo simulado de 01/01/2075 hasta 16/12/2099.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

Primero, se puede observar que los modelos COCOONED e IH-LANS se comportan de manera muy semejante, presentando una diferencia máxima entre predicciones de 1.8 *m*. La respuesta de ambos modelos también es la que presenta el mayor rango de variabilidad en los períodos de los datos provenientes de reanálisis y de predicción, prediciendo valores entre $42\text{ m} < Y < 84\text{ m}$. La posición media de la línea de costa calculada es $Y = 69.9\text{ m}$ para el COCOONED y $Y = 69.4\text{ m}$ para el IH-LANS. La desviación estándar es 6.3 *m* para el COCOONED y 5.8 *m* para el IH-LANS.

Entre todos los modelos, el CosMoS-COAST es el que aparenta la mayor “inercia” frente a los procesos de erosión y acreción, siendo el modelo que presenta el menor rango de variabilidad, comprendido entre $47\text{ m} < Y < 75\text{ m}$. La posición media resultante para la simulación del CoSMoS-COAST es $Y = 68.2\text{ m}$ y la desviación estándar es 3.5 *m*.

El modelo propuesto en este estudio, Shorefor adaptado en modelo híbrido, presenta períodos que se asemejan a los resultados de los demás modelos - como los períodos de reanálisis, entre 2000 y 2017 y el período entre 2025 y 2050 ; períodos en los cuales sus variaciones coinciden con las variaciones observadas en los demás modelos, pero la posición media difiere de las posiciones calculadas por los demás modelos – marcado por el rectángulo rojo en la Figura 5.22; y períodos en los cuales se observan fuertes procesos de erosión calculados por el modelo, pero no calculados por los demás modelos – rectángulos azules en la Figura 5.22.

Para ShoreFor integrado en modelo híbrido, los resultados variaron en el rango de $44\text{ m} < Y < 84\text{ m}$, la posición media de la línea de costa simulada se encuentra en $Y = 69.0\text{ m}$ y la desviación estándar es 5.5 *m*.

Tal como se ha indicado anteriormente (subapartado 4.1), los datos del forzamiento para el período de reanálisis presentan oleajes más energéticos. Este cambio genera efectos de acreción para los modelos CoSMoS-COAST, COCOONED e IH-LANS, no obstante, para el modelo ShoreFor adaptado a modelo híbrido no se perciben grandes efectos de estos cambios en los parámetros del oleaje.

La Figura 5.23 presenta las líneas de costas máxima y mínima obtenidas para los resultados de cada modelo.

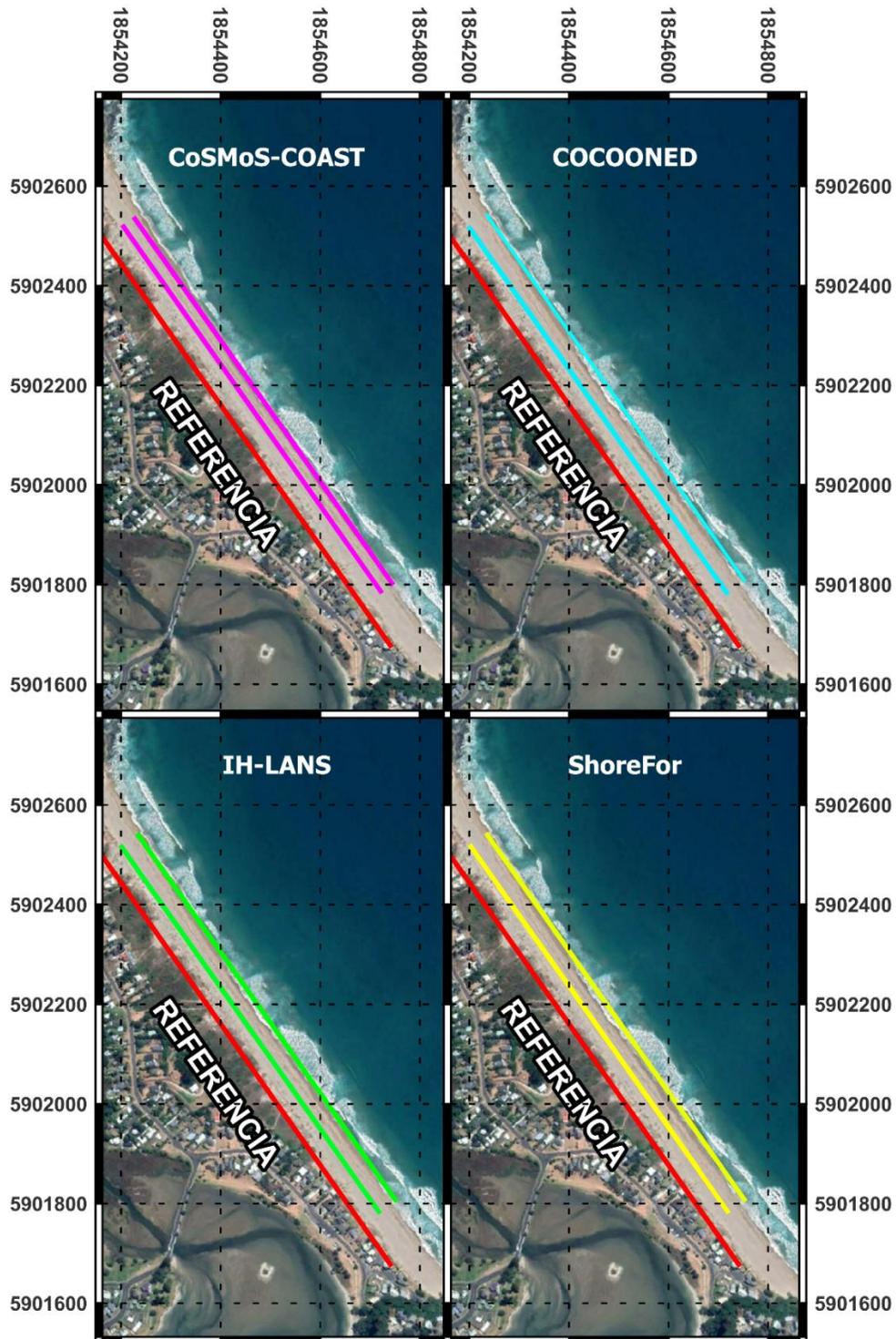


Figura 5.23 Posiciones mínimas y máximas de las líneas de costa para los resultados de cada modelo.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

En la Tabla 5.10 se presentan los valores máximos y mínimos obtenidos para cada modelo y la fecha de ocurrencia de dichos valores.

Tabla 5.10 Retrocesos y avances máximo de la posición media de la línea de costa calculado para cada modelo.

Modelo	Y [m]	Fecha	Y [m]	Fecha
<i>CoSMoS-COAST</i>	74	18/02/2018	49.96	20/07/2000
<i>COCOONED</i>	84.84	18/05/2061	41.41	05/04/2082
<i>IH-LANS</i>	83.09	18/05/2061	42.12	05/04/2082
<i>ShoreFor híbrido</i>	84.54	24/02/2054	43.77	13/07/2065

La figura 5.24 presenta el análisis mensual de la posición de la línea de costa, modelada por el modelo CoSMoS-COAST, a través de un diagrama tipo *boxplot*.

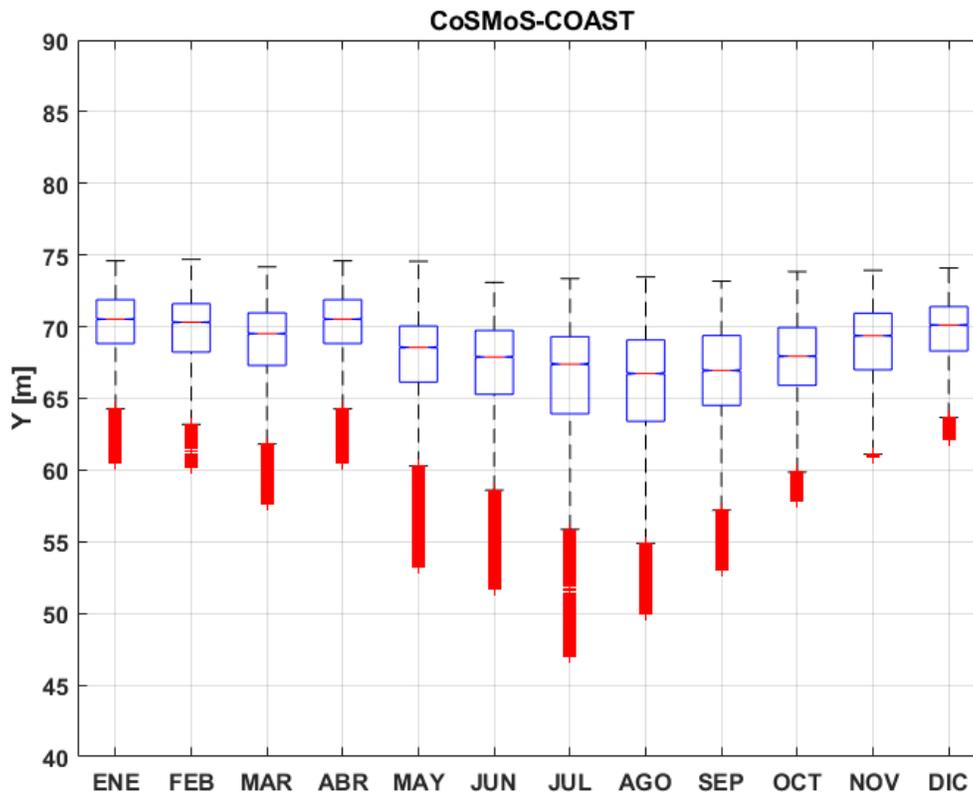


Figura 5.24 Diagrama tipo *boxplot* para los resultados del modelo CoSMoS-COAST.

Los resultados del modelo CoSMoS-COAST demuestran que el modelo es capaz de reproducir la variabilidad estacional observada para los datos de las mediciones (figura 5.12). Durante los meses de invierno, se observa una posición media de la línea de costa entre $67 < Y < 68$ m. Durante los meses de verano la posición media de la línea de costa se mantiene en $Y = 73$ m. Diferente de las mediciones, el modelo predice valores atípicos en todos los meses del año, no reproduciendo ningún valor atípico por encima del límite superior.

Las figuras 5.25 y 5.26 presentan el análisis mensual de las posiciones de la línea de costa, modeladas por los modelos COCOONED e IH-LANS, a través de diagramas tipo *boxplot*.

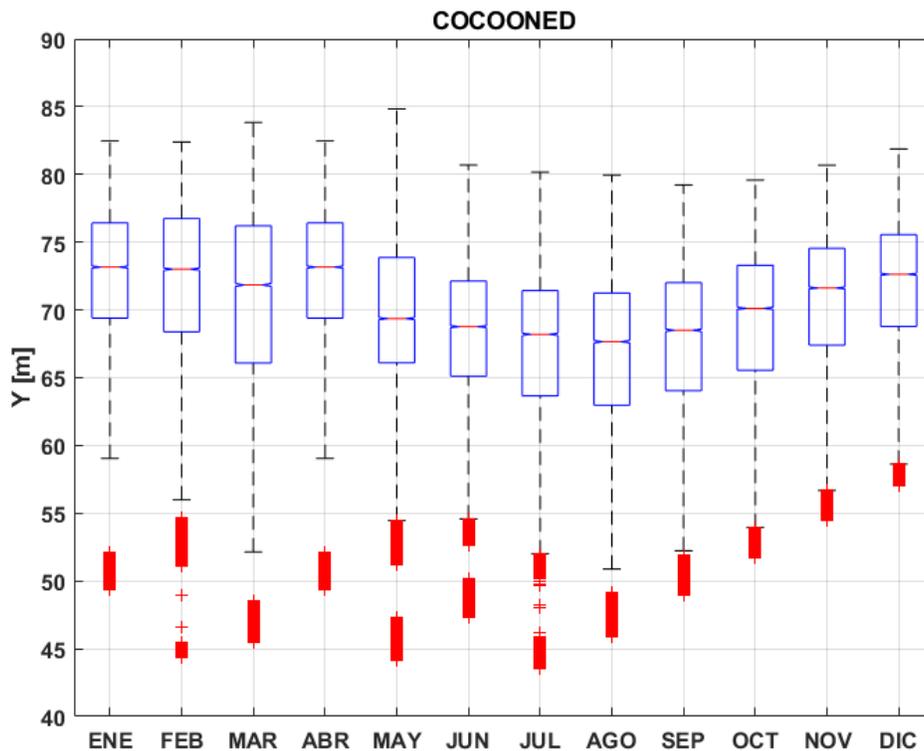


Figura 5.25 Diagrama tipo *boxplot* para los resultados del modelo COCOONED.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

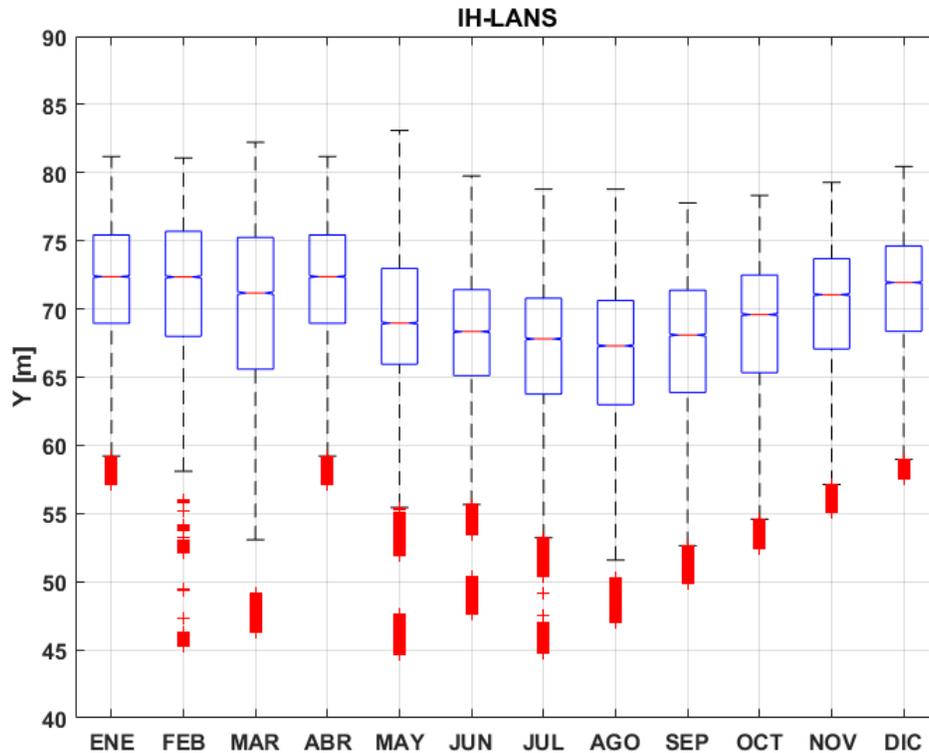


Figura 5.26 Diagrama tipo *boxplot* para los resultados del modelo IH-LANS.

Así como el modelo CoSMoS-COAST, los modelos COCOONED e IH-LANS fueron capaces de representar la estacionalidad observada en los datos de las mediciones de la posición de línea de costa. Diferente del CoSMoS-COAST, ambos modelos presentan el primer cuartil y tercer cuartil más cercanos a los obtenidos por las mediciones. Esto refleja la “inercia” observada en el modelado realizado por el modelo CoSMoS-COAST y el mayor rango de variabilidad de las predicciones presentado por los modelos COCOONED e IH-LANS. Durante los meses de invierno, los resultados presentaron valores medios de la posición de la línea de costa entre $67 < Y < 69 m$. Durante los meses de verano, los resultados presentaron valores medios de la posición de la línea de costa entre $72 < Y < 73 m$.

La Figura 5.26 presenta el análisis mensual de las posiciones de la línea de costa, modeladas por el modelo ShoreFor integrado a modelo híbrido, a través de diagramas tipo *boxplot*.

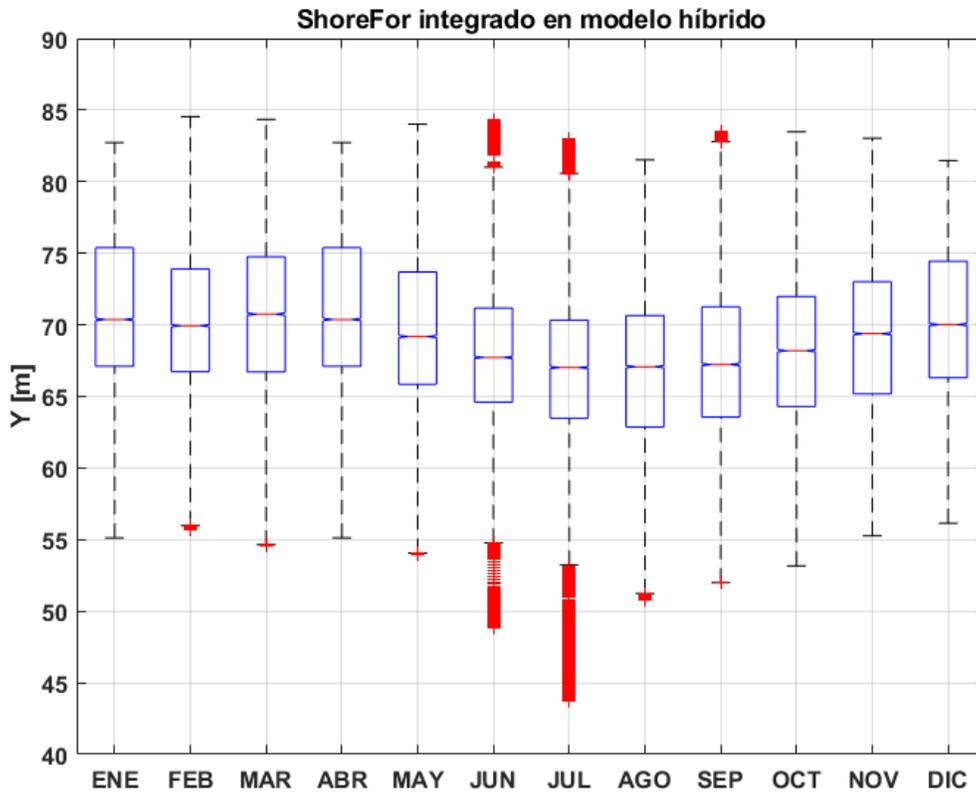


Figura 5.26 Diagrama tipo *boxplot* para los resultados del modelo ShoreFor adaptado a modelo híbrido.

El modelo ShoreFor adaptado a la formulación de modelo híbrido, así como los demás modelos, también fue capaz de representar la estacionalidad de las mediciones. Para los meses de invierno, los valores de la posición media de la línea de costa fueron de $67 < Y < 68 \text{ m}$. Para los meses de verano, los valores medios de la línea de costa fueron entre $70 < Y < 71 \text{ m}$. Así como en las mediciones, se identificaron valores atípicos predominantemente durante los meses de invierno.

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

A partir de la metodología planteada, fue posible realizar un análisis de sensibilidad, calibrar y analizar el comportamiento de cuatro distintos modelos híbridos aplicados al caso de estudio de la playa de Tairúa, logrando alcanzar el objetivo principal del estudio.

A partir de la metodología planteada, se definieron condiciones homogéneas para valorar el desempeño de los distintos modelos al caso de estudio planteado, como, por ejemplo, no se aplicaron las técnicas de asimilación de datos integradas a los modelos CoSMoS-COAST e IH-LANS. Además, no se consideraron aportes o fugas de sedimentos a través de los términos de fuentes y sumideros, una vez que la zona de estudio corresponde a una playa encajada, donde se asume la conservación de sedimento.

Con relación a la aplicación de los modelos COCOONED e IH-LANS, los resultados obtenidos durante los procesos de análisis de sensibilidad, calibración y aplicación fueron capaces de reproducir el comportamiento medio de las mediciones. El IH-LANS fue el modelo que presentó el menor *RMSE* durante el proceso de calibración.

El CoSMoS-COAST demostró habilidad semejante al COCOONED e IH-LANS durante el proceso de calibración, no obstante, durante el período de simulación comprendido entre los años de 2050 y 2099, el modelo demostró procesos de erosión y acreción de magnitudes inferiores a los demás modelos.

El modelo propuesto en este estudio, ShoreFor integrado en un modelo híbrido, generó la mejor correlación para el proceso de calibración. Durante el período de cálculo realizado con los datos de reanálisis del oleaje, este modelo reprodujo respuestas semejantes a las de los demás modelos, no obstante, durante el período de predicción, este modelo presentó un comportamiento distinto a los demás. Esto se puede justificar al hecho de que el modelo *cross-shore* implementado a esta aproximación no calcula la posición de la línea de costa a partir de una relación de equilibrio constante, sino que define la condición de equilibrio a partir del oleaje precedente.

Todos los modelos seleccionados fueron capaces de reproducir la estacionalidad observada en los datos de las mediciones, con valores medios de la posición de línea de costa menores durante los meses de invierno y mayores durante los meses de verano.

En la Tabla 6.1 se presenta el tiempo computacional medio de la simulación de 1999 hasta 2099 para cada uno de los modelos.

Tabla 6.1 Tiempo computacional de cada modelo.

Modelo	Tiempo computacional para la simulación de 1999 hasta 2000
<i>CoSMoS-COAST</i>	22 minutos
<i>COCOONED</i>	47 minutos
<i>IH-LANS</i>	10 minutos
<i>ShoreFor híbrido</i>	22 minutos

El IH-LANS ha sido el modelo que ha presentado el menor esfuerzo computacional, una vez que el modelo fue optimizado a partir de la implementación de técnicas de paralelización para el cálculo de los parámetros de rotura y de la posición de equilibrio (Y_{eq}) del modelo *cross-shore*.

Por último, siguiendo el desarrollo planteado en este estudio, se plantea para futuros análisis, las siguientes líneas de investigación:

- Implementar las técnicas de asimilación de datos a los modelos COCOONED y ShoreFor adaptado en modelo híbrido para optimizar el proceso de calibración.
- Aplicar los modelos a una zona costera dónde los efectos *longshore* sean más importantes y poder evaluar la habilidad de los modelos en reproducir dichos procesos.
- Evaluar la incorporación de otras propuestas de componentes *cross-shore* y *longshore*.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

- Optimizar el desempeño de los modelos CoSMoS-COAST, COCOONED y ShoreFor adaptado para reducir el esfuerzo computacional y permitir procesos de calibración y simulación más eficientes.
- Explorar la aplicabilidad de los modelos híbridos simplificados en ambientes costeros diversos sometidas a morfodinámicas complejas.

Referencias

- Alvarez-Cuesta, M., Toimil, A., Losada, I.J., 2021a. Modelling long-term shoreline evolution in highly anthropized coastal areas. Part 1: Model description and validation. *Coast. Eng.* 169. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2021.103960>
- Alvarez-Cuesta, M., Toimil, A., Losada, I.J., 2021b. Modelling long-term shoreline evolution in highly anthropized coastal areas. Part 1: Model description and validation. *Coast. Eng.* 169, 103960. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103960>
- Alvarez-Cuesta, M., Toimil, A., Losada, I.J., 2021c. Modelling long-term shoreline evolution in highly anthropized coastal areas. Part 2: Assessing the response to climate change. *Coast. Eng.* 168, 103961. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103961>
- Análisis y Prospectiva-serie Pesca nº 5. Demografía de la población costera en España, 2020.
- 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. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 124, 1596–1624. <https://doi.org/10.1029/2018JF004790>
- Arriaga, J., Rutten, J., Ribas, F., Falqués, A., Ruessink, G., 2017. Modeling the long-term diffusion and feeding capability of a mega-nourishment. *Coast. Eng.* 121, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.11.011>
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., Shah, V.B., 2017. Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing. <http://dx.doi.org/10.1137/141000671> 59, 65–98. <https://doi.org/10.1137/141000671>
- Birkemeier, W.A., 1985. Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* 111, 598–602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1985\)111:3\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:3(598))
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Source J. Coast. Res. J. Coast. Res.* 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Bruun, P.M., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *J. Waterw. Harb. Div.* 88, 117–132.
- Davidson, M.A., Splinter, K.D., Turner, I.L., 2013a. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coast. Eng.* 73, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.002>
- Davidson, M.A., Splinter, K.D., Turner, I.L., 2013b. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. *Coast. Eng.* 73, 191–202. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2012.11.002>
- de Santiago, I., Camus, P., González, M., Liria, P., Epelde, I., Chust, G., del Campo, A., Uriarte, A., 2021. Impact of climate change on beach erosion in the Basque Coast (NE Spain). *Coast. Eng.* 167, 103916. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2021.103916>
- Dean, R., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *J. Coast. Res.* 7, 53–84.

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

- IPCC, 2013. Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)], in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V.B. and P.M.M.] (Ed.), . Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp. 1395–1446.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.030>
- Jara, M.S., González, M., Medina, R., 2015. Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile. *Coast. Eng.* 99, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.02.006>
- Jaramillo, C., 2020. MODELO DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS CONSIDERANDO PLANTA Y PERFIL, EN ESCALAS DE MEDIO A LARGO PLAZO.
- Jaramillo, C., González, M., Medina, R., Turki, I., 2021a. An equilibrium-based shoreline rotation model. *Coast. Eng.* 163, 103789. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103789>
- 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. *Coast. Eng.* 169, 103983. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103983>
- 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). *Coast. Eng.* 156, 103612. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103612>
- Komar, P.D., 1971. The mechanics of sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.* 76, 713–721. <https://doi.org/10.1029/JC076I003P00713>
- Kriebel, D.L., Dean, R.G., 1993. Convolution Method for Time-Dependent Beach-Profile Response. *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* 119, 204–226.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:2\(204\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:2(204))
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coast. Eng.* 51, 883–915.
<https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2004.07.014>
- Manno, G., Lo Re, C., Basile, M., Ciraolo, G., 2022. A new shoreline change assessment approach for erosion management strategies. *Ocean Coast. Manag.* 225.
<https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2022.106226>
- Miller, J.K., Dean, R.G., 2004. A simple new shoreline change model. *Coast. Eng.* 51, 531–556.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.05.006>
- Montaño, J., Coco, G., Antolínez, J.A., Beuzen, tomas, Bryan, K.R., Cagigal, L., Castle, B., Davidson, M.A., Goldstein, E.B., Cbaceta, R., Cdier, D., Ludka, B., Masoud-Ansari, S., Méndez, fernando J., Brad Murray, A., Plant, nathaniel G., Ratliff, K.M., Robinet, A., Rueda, A., Sénéchal, nadia, Simmons, J.A., Splinter, K.D., Stephens, S., Townend, I., Vitousek, S., Vos, K., 2020. Blind testing of shoreline evolution models. *Sci. Reports. Nat.*
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-59018-y>
- Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., Nicholls, R.J., 2015. Future Coastal Population

- Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLoS One* 10, e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Palalane, J., Larson, M., 2020. A Long-Term Coastal Evolution Model with Longshore and Cross-Shore Transport. *J. Coast. Res.* 36, 411–423. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00020.1>
- Pelnard-Considère, R., 1956. Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. *Les Energies la Mer Compte Rendu Des Quatr. Journees L'hydraulique*, Paris 13, 14 15 Juin 1956; *Quest. III, Rapp.* 1, 74-1-10.
- Robinet, A., Idier, D., Castelle, B., Marieu, V., 2018a. A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: The LX-Shore model. *Environ. Model. Softw.* 109, 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2018.08.010>
- Robinet, A., Idier, D., Castelle, B., Marieu, V., 2018b. A reduced-complexity shoreline change model combining longshore and cross-shore processes: the LX-Shore model. *Environ. Model. Softw.* 109, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.08.010>
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coast. Eng.* 56, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2009.08.006>
- Splinter, K.D., Turner, I.L., Davidson, M.A., Barnard, P., Castelle, B., Oltman-Shay, J., 2014a. A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response. *J. Geophys. Res. F Earth Surf.* 119, 1–23. <https://doi.org/10.1002/2014JF003106>
- Splinter, K.D., Turner, I.L., Davidson, M.A., Barnard, P., Castelle, B., Oltman-Shay, J., 2014b. A generalized equilibrium model for predicting daily to interannual shoreline response. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 119, 1936–1958. <https://doi.org/10.1002/2014JF003106>
- StatsTutor, n.d. Pearson's correlation.
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>
- Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P., Díaz-Simal, P., 2017a. Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coast. Eng.* 128, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>
- Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P., Díaz-Simal, P., 2017b. Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coast. Eng.* 128, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>
- Tran, Y.H., Barthélemy, E., 2020. Combined longshore and cross-shore shoreline model for closed embayed beaches.
- Turki, I., Medina, R., Coco, G., Gonzalez, M., 2013. An equilibrium model to predict shoreline rotation of pocket beaches. *Mar. Geol.* 346, 220–232. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.08.002>
- Vitousek, S., Barnard, P.L., Limber, P., Erikson, L., Cole, B., 2017a. A model integrating longshore

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS HÍBRIDOS DE EVOLUCIÓN DE POSICIÓN DE
LÍNEA DE COSTA INTEGRANDO PROCESOS LONGSHORE Y CROSS-SHORE

and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 122, 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>

Vitousek, S., Barnard, P.L., Limber, P., Erikson, L., Cole, B., 2017b. A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 122, 782–806. <https://doi.org/10.1002/2016JF004065>

Vitousek, S., Cagigal, L., Montaña, J., Rueda, A., Mendez, F., Coco, G., Barnard, P.L., 2021. The Application of Ensemble Wave Forcing to Quantify Uncertainty of Shoreline Change Predictions. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 126, 1–43. <https://doi.org/10.1029/2019JF005506>

Wright, L. D., Short, a. . D., Green, M. O., 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. *Mar. Geol.* 62, 339–364. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(85\)90123-9](https://doi.org/10.1016/0025-3227(85)90123-9)

Yates, M.L., Guza, R.T., O'Reilly, W.C., 2009. Equilibrium shoreline response: Observations and modeling. *J. Geophys. Res. Ocean.* 114, 1–16. <https://doi.org/10.1029/2009JC005359>