

CALIBRACIÓN ESPACIAL DE REGÍMENES MEDIOS MENSUALES DE OLEAJE A PARTIR DE DATOS DE REANÁLISIS: APLICACIÓN AL MEDITERRÁNEO

Antonio Tomás, Fernando J. Méndez e Iñigo J. Losada

Resumen:

Para determinar la dinámica litoral son necesarias bases de datos de variables geofísicas oceanográficas de calidad, de altas resoluciones espaciales y continuas a lo largo de un período largo de tiempo. En la actualidad, las bases de datos instrumentales no cumplen con estos requisitos, por lo que los modelos numéricos de reanálisis y de predicción de variables oceanográficas se muestran como las únicas herramientas capaces de generar estas bases de datos. Desafortunadamente, desde un punto de vista cuantitativo, se ha comprobado que estas bases de datos obtenidas numéricamente no son siempre del todo correctas, por lo que se hace imprescindible su calibración antes de su utilización. En este artículo se desarrolla un método de calibración de bases de datos numéricos utilizando datos registrados. Este método está basado en la técnica de descomposición en funciones ortogonales empíricas (FOE), descomponiendo en modos los regímenes de una determinada variable espacio-temporal. En concreto, se va a calibrar la base de datos generada por el modelo WAM de generación de oleaje aplicado al mar Mediterráneo dentro del proyecto HIPOCAS. La aplicación de esta metodología se limita a una zona del mar Mediterráneo y a un parámetro que caracteriza el estado de mar, la altura de ola significativa (H_s).

Palabras clave: Calibración espacial, Clima marítimo, Régimen medio mensual, Funciones ortogonales empíricas, Altura de ola significativa, Modelos numéricos de reanálisis.

INTRODUCCIÓN

Un punto clave en el diseño de estructuras marítimas es la determinación de las cargas a las que va a ser sometido por la dinámica litoral. En este sentido es necesario poder determinar el clima marítimo en el lugar de ubicación de estas estructuras para poder caracterizar el mismo. Para ello es necesario examinar las propiedades estadísticas del oleaje acumuladas a lo largo de un largo período de tiempo, pues el comportamiento de las obras marítimas depende de la historia completa de acciones durante la totalidad de su vida útil. Es deseable, por lo tanto, que el diseño de las estructuras marítimas tenga en cuenta factores como la duración del temporal o su evolución a lo largo del tiempo; esto hace necesarias series de datos no sólo de una gran longitud, sino que también sean continuas.

Igualmente, para el diseño de los sistemas marinos, es necesaria información no sólo de los estados de mar más severos que es previsible que ocurran durante la vida útil del sistema, sino también de la frecuencia de ocurrencia de todos los estados de mar, esto último es especialmente necesario para evaluar las cargas de fatiga (Ochi, 1998).

Por otro lado, en la actualidad se ha de implementar medidas concretas para adaptarse a los efectos del cambio climático en la costa, de tal manera que lo primero que se debe hacer es evaluar los cambios acontecidos en la dinámica costera (IPCC, 2001; OECC, 2002; Wolf, 2003). Para realizar este análisis, se debe usar series de datos de suficiente longitud que incluyan las posibles variaciones del clima en el largo plazo considerado (decenas de años).

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander. España. Teléfono: 34 942 20 18 10.

Email: antonio.tomas@alumnos.unican.es, mendezf@unican.es, losadai@unican.es

Artículo recibido el 13 de Junio de 2005, recibido en forma revisada el 10 de abril 2006 y aceptado para su publicación el 29 de mayo de 2006. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Por lo tanto, disponer de bases de datos de variables geofísicas oceanográficas de calidad, de altas resoluciones espaciales y continuas durante un largo periodo de tiempo es un factor imprescindible para poder determinar tanto el clima marítimo como sus tendencias de cambio a lo largo de la costa.

En general, existen dos tipos de fuentes de datos a partir de las cuales se puede obtener series de datos de oleaje: datos registrados o datos numéricos. Dentro de los datos registrados se pueden clasificar en datos visuales, datos obtenidos mediante boyas y datos de satélite.

Los datos registrados de forma visual son datos tomados por observadores entrenados desde barcos en ruta. Son series de datos de larga duración, con más de 50 años de observaciones, pero tienen importantes carencias: están restringidos a zonas de tránsito de barcos (rutas predeterminadas); están poco repartidos en el tiempo (no son continuas); no tienen datos extremos, pues los barcos evitan los temporales; los datos tienen una gran subjetividad, pues en su apreciación influye mucho la experiencia del observador, su punto de observación... Todas estas carencias limitan la utilización directa de esta base de datos.

Los datos registrados por boyas son una base de datos de gran fiabilidad. Sin embargo, son limitados en cuanto a su distribución espacial, ya que las redes de boyas se ubican en puntos estratégicos a lo largo de la costa; son muy variables las longitudes de sus registros, la serie temporal más larga de las boyas españolas cuenta con aproximadamente 20 años de datos; las series tienen muchos huecos, no son continuas, y sus resoluciones temporales oscilan entre 1 y 3 horas. Además, las boyas que tienen las series más largas están ubicadas en aguas someras.

Los datos registrados por satélites son datos determinados mediante técnicas de teledetección, a partir de las imágenes captadas por los satélites. Esta base de datos tiene información fiable del oleaje lejos de las costas, no cubren un intervalo de tiempo muy grande (en torno a los 10 años de datos); sus resoluciones, tanto temporales como espaciales, dependen de la duración del ciclo y de la frecuencia de la toma de datos, que son distintas para cada satélite; no se puede considerar series de datos continuas, pues sus resoluciones temporales son del orden de días.

Los datos numéricos son datos generados a partir de modelos de oleaje. Se han desarrollado muchos modelos de oleaje en los que se describe la complicada naturaleza de la generación, propagación y disipación del oleaje. Estos modelos permiten obtener largas series temporales continuas en dominios extensos y con una distribución espacial suficiente que permite caracterizar adecuadamente el clima marítimo en una localización concreta.

Así, las bases de datos más adecuadas para caracterizar el clima marítimo son las bases de datos numéricas, pues son largas series continuas de datos, distribuidas homogéneamente y con las mejores resoluciones temporales y espaciales. De todas ellas, la mejor y más completa base de datos de la dinámica costera española, en la segunda mitad del siglo XX, es la base de datos del proyecto europeo HIPOCAS (*Hindcast of Dynamic Process of the Ocean and Coastal Areas of Europe*) (Soares et al., 2002) que ha generado una base de datos de oleaje a partir del retroanálisis de 44 años de datos atmosféricos obtenidas del modelo REMO (Jacob & Podzum, 1997) que son utilizados como forzamiento para el modelo numérico WAM de oleaje (Komen et al., 1994; The WAMDI Group, 1988).

El proyecto HIPOCAS ha generado una base de datos homogénea de oleaje de 44 años (1958-2001), con una resolución espacial de 0.125° y una resolución temporal horaria. Desafortunadamente, desde un punto de vista cuantitativo, se ha comprobado que dicha base de datos no es del todo correcta. La base de datos HIPOCAS difiere ligeramente de lo registrado en las redes de medida. Para alturas de ola, las mayores variaciones se dan en las zonas más próximas a la costa; siendo los valores dados por el modelo siempre inferiores a los valores obtenidos por teledetección y siendo las desviaciones típicas de las series de datos generadas menores que las dadas mediante teledetección (EPPE, 2003).

En la figura 1 se compara las series temporales de H_s registradas en 5 boyas con las series temporales de los puntos HIPOCAS más cercanos. Para hacer correctamente la comparación de ambas series se tiene que propagar las series de H_s de HIPOCAS hasta las posiciones de las boyas. Esto es debido a que la base de datos del proyecto HIPOCAS está siempre en profundidades indefinidas y las boyas pueden estar en profundidades reducidas o intermedias. Por lo tanto,

los registros de las boyas que no están en profundidades indefinidas están afectados por fondo, mientras que los datos de HIPOCAS no. Por eso se “corrigen” propagando las series de H_s de HIPOCAS hasta las posiciones de las boyas. En el apéndice II se explica con más detalle la metodología utilizada en la propagación. En dicha figura se puede observar que los picos de las dos series (los temporales) coinciden, poniendo de manifiesto que la base de datos de HIPOCAS está bien en fase. Pero la magnitud de las dos series no coincide, por lo que se puede concluir que solamente es necesario corregir la magnitud de H_s .

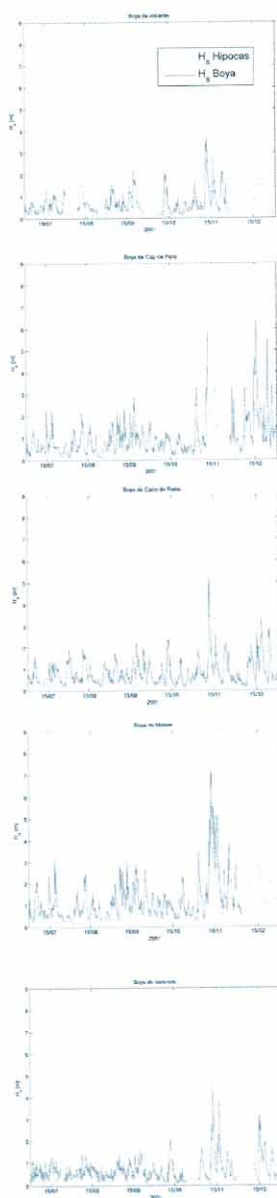


Figura 1. Series de H_s de las boyas y de HIPOCAS en las posiciones de las boyas.

En la figura 2 se compara, percentil a percentil de probabilidad acumulada, las series de H_s de las boyas y las de HIPOCAS propagadas hasta las posiciones de las boyas. Se comprueba que tienen regímenes distintos, ya que si fuesen iguales los puntos se situarían sobre la bisectriz.

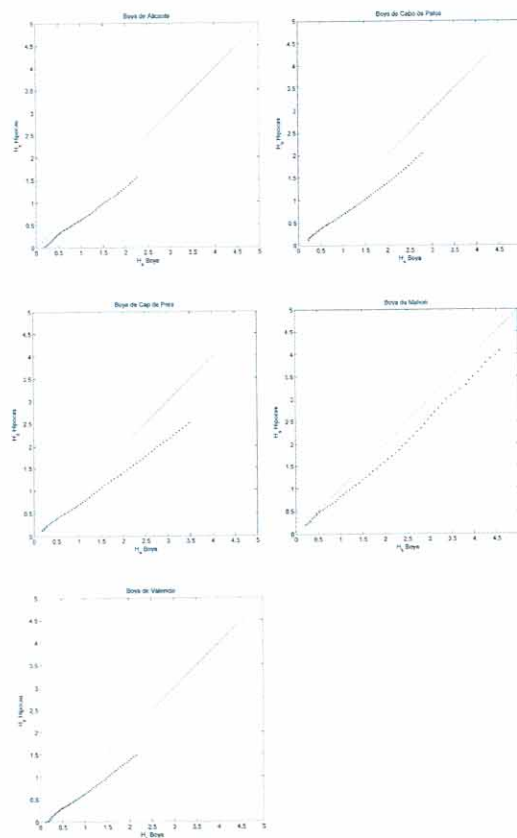


Figura 2. QQ plot (1%-99%) de HIPOCAS frente a las boyas, en la posición de las boyas.

Estas diferencias entre los resultados de los modelos y las medidas son debidas a las limitaciones inherentes a todo modelo numérico. Hoy en día los datos provenientes de los modelos no tienen tanta fiabilidad como los datos medidos directamente. Se pone así de manifiesto la necesidad de realizar una calibración de los datos modelados con los datos registrados, con el fin de mejorar aún más la calidad de los datos de partida y generar una base de datos homogénea y fiable, con largas series temporales y con buenas resoluciones espaciales y temporales.

Por lo tanto, el objetivo de este artículo es definir un método de calibración de modelos de reanálisis a partir de datos observados. En este artículo se va a describir la metodología calibrando la altura de ola significativa (H_s) de la base

de datos de HIPOCAS con la correspondiente altura de ola significativa (H_s) registrada por las boyas, por ser esta base de datos la más fiable. Se calibra el parámetro H_s por ser el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar (Ochi, 1998), pero la metodología es válida para cualquier variable geofísica oceanográfica. Para este artículo se ha calibrado la H_s de una zona del mar Mediterráneo comprendida entre 5°E - 1°O y entre 41°N - 37°N, que abarca las islas Baleares y Valencia (ver figura 3).

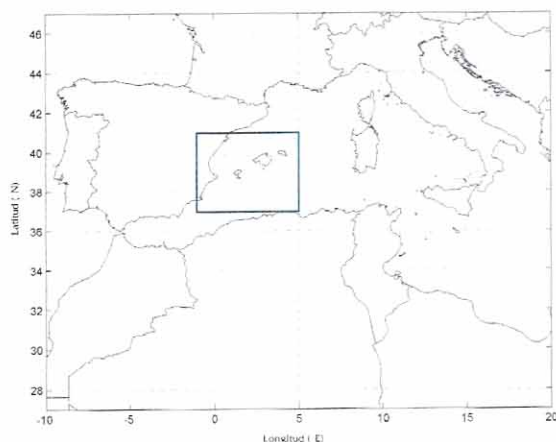


Figura 3. Localización de la zona de estudio.

Se ha recopilado la H_s registrada por las boyas del Ente Público Puertos del Estado (EPPE) de la zona de estudio. En concreto, se recopila las series de H_s de 5 boyas de oleaje (ver figura 4): la boya direccional de Mahón (Wavescan) de la red de boyas de aguas profundas o red EMOD y las cuatro boyas escalares (Waverider) de la red costera o red REMRO (Boyas de Alicante, Cabo de Palos, Cap de Pera y Valencia). Para más detalles de la red de boyas: <http://www.puertos.es/>.

Una vez calibrada la H_s de la base de datos de HIPOCAS con los datos de las 5 boyas de la zona de estudio, se efectuará la validación del método, comparando los resultados de la calibración realizada con otra base de datos no utilizada para calibrar, la base de datos registrados por satélite. En concreto se ha utilizado las medidas de H_s en la zona de estudio de seis años de datos de la misión TOPEX/POSEIDON. En la figura 4 se representa la distribución de las tres bases de datos utilizadas en este artículo: la base de datos modelados (HIPOCAS), la base de datos registrados por boyas (Boyas) y la base de datos registrados por satélite (TOPEX).

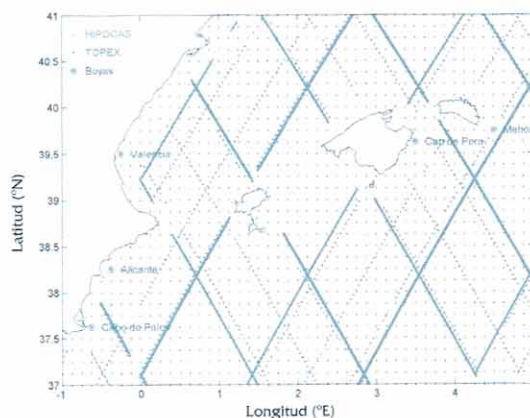


Figura 4. Distribución de la información de las tres bases de datos.

Finalmente, una vez calibrada y validada la base de datos de HIPOCAS, se puede caracterizar el oleaje con una base de datos que cuenta con registros continuos de H_s (hora a hora) de 44 años, distribuidos homogéneamente cada aproximadamente 10 km, y que tiene una excelente calidad. También se proporciona la información de los regímenes medios mensuales de altura de ola significativa. Esta base de datos posibilita un más correcto dimensionamiento de cualquier estructura o sistema marino en cualquier posible ubicación y permite analizar las tendencias del cambio en el oleaje debidas al cambio climático a lo largo de las costas (tanto peninsulares como insulares).

Este artículo está estructurado en seis apartados y dos apéndices. En el segundo apartado se detalla exhaustivamente el método de calibración, aplicándolo a la variable H_s , comentando al mismo tiempo los resultados obtenidos en la calibración realizada para una zona del mar Mediterráneo. En el tercer apartado se valida el método de calibración, utilizando datos registrados por el satélite de la misión TOPEX/POSEIDON para la zona de estudio. Finalmente en el apartado cuatro se comenta las conclusiones a las que se ha llegado. En el apéndice I se muestra la distribución Log-normal utilizada y se definen sus parámetros y en el apéndice II se explica el método de propagación de oleaje utilizado.

MODELO DE CALIBRACIÓN

El objetivo de la calibración es encontrar la transformación del parámetro H_s de la base de datos de HIPOCAS que mejor modele la H_s de la base de datos registrados por las boyas. Es decir,

se debe distorsionar el campo espacio-temporal de HIPOCAS, $H_s(x,t)$, para que se aproxime a lo medido por las boyas. Así, a partir de las posiciones donde se puede comparar las dos bases de datos, las posiciones de las boyas, se calibra toda la base de datos de HIPOCAS.

Es importante señalar que en el proceso de calibración, la información de la base de datos de las boyas es previamente corregida para eliminar la influencia de la propagación del oleaje en zonas someras (ver apéndice II para más detalles sobre la propagación).

Debido a la complejidad del problema para realizar la calibración, es necesario fijar a priori la escala temporal del problema. Así, en este método de calibración se va a utilizar la aproximación probabilista (calibrando la base de datos agregada). De esta manera, el modelo de calibración en lugar de centrarse en las series temporales instantáneas, trabaja con la evolución temporal de los regímenes medios mensuales de H_s . Al agregar los datos se pierde la información instantánea asociada a cada dato, con lo que en la calibración se modificará únicamente la magnitud del parámetro H_s , pues como se comprobó en la figura 1, la fase está bien modelada.

Para conseguir que la calibración tenga efecto en toda la zona de estudio, se descompone cada una de las variables espacio-temporales a calibrar en una suma de modos, los cuales se separan a su vez en dos componentes o funciones, una dependiente únicamente del espacio y otra dependiente únicamente del tiempo. Esta técnica se denomina descomposición en funciones ortogonales empíricas (FOE). Posteriormente, se distorsiona cada uno de estos modos o funciones de manera que en las posiciones de las boyas la diferencia con lo registrado por las boyas sea mínima. Aplicando la distorsión que minimiza la diferencia entre HIPOCAS y las boyas a todo el campo espacio-temporal de HIPOCAS se consigue calibrar espacialmente la base de datos de HIPOCAS. Finalmente, tras la calibración de los regímenes medios mensuales, se recupera la información del tiempo en H_s , a partir de la generación sintética de series de datos.

A continuación se explica con detalle los pasos seguidos en la calibración de la altura de ola significativa, $H_s(x,t)$, aplicándola a la zona de estudio.

Determinación de los regímenes medios mensuales

La variable altura de ola significativa original $H_s(x,t)$ se agrega en las nuevas unidades temporales elegidas, $H_s(x,\tau)$; siendo t la variable tiempo original (resolución horaria de los datos de HIPOCAS), siendo τ la variable tiempo agregada elegida (el mes, ver figura 5) ($\tau \{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{12} \}$) y siendo x la variable que define la posición de los puntos en la malla de HIPOCAS ($x \{ x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n \}$). Se tiene entonces una serie, $H_s(i,j)$ para cada x_i y para cada τ_j . Por lo tanto se define el nuevo campo espacio-temporal del parámetro H_s en 12 unidades de tiempo (agregando mes a mes los datos) en lugar de las unidades de tiempo originales, ($44\text{años} \times 365\text{días} \times 24\text{horas} = 385440$ unidades temporales).

En la figura 5 se esquematiza el proceso seguido para la agregación de los datos. Así, de la serie temporal horaria (t) original de HIPOCAS ($1, \dots, i, \dots, 44$ años) se separa los datos mes a mes, para luego agruparse por meses. De esta manera, se junta los datos de todos los meses enero (de los 44 años), de todos los meses febrero... y así para los doce meses. Se forman 12 nuevas unidades temporales ($\tau_1, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}$) en las que se agregan los datos de altura de ola significativa. Finalmente, para cada mes se define su régimen medio.

De esta manera se reduce notablemente las dimensiones del problema, sin perder la información del régimen medio del oleaje. Aunque se elimina la información instantánea, lo que más interesa es calibrar el clima marítimo del litoral, y no tanto los sucesos instantáneos. Esta hipótesis se considera válida ya que, hoy en día, la caracterización del clima marítimo en una ubicación concreta siempre se realiza mediante parámetros agregados. Así mismo, con la agregación de datos realizada se consigue tener información con la que calibrar en todas las unidades de tiempo agregadas, es decir, que en todos los meses existen datos de las boyas con los que determinar los regímenes medios mensuales de las boyas.

Una vez que se tiene agregada la variable de altura de ola significativa en series mensuales, $H_s(i,j)$, se ajusta, para cada x_i y para cada τ_j , a una función de distribución Lognormal. Se ha utilizado la función de distribución Lognormal para representar el régimen medio de H_s , pues es a la que mejor ajusta hasta probabilidades acumuladas próximas al 99 % (Massel, 1996). El ajuste se realiza por mínimos cuadrados en el papel probabilístico lognormal, en el intervalo de probabilidades acumuladas que va desde el 20 % hasta el 99,5 %. En la figura 6 se presenta un ejemplo donde se puede observar

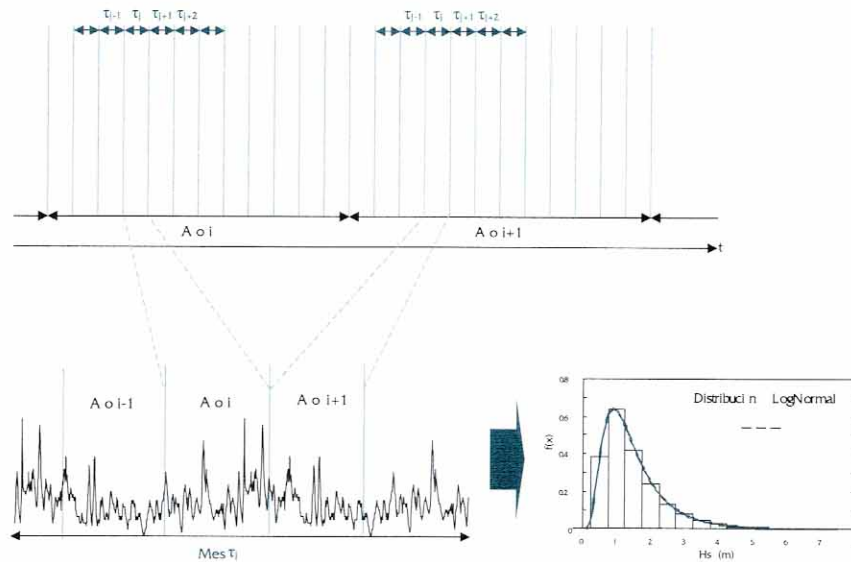


Figura 5. Esquema de agregación mensual de serie temporal de altura de ola significativa.

el buen ajuste de los datos a esta distribución, en este intervalo de probabilidades. Prácticamente en todos los casos analizados se ha obtenido ajustes satisfactorios, permitiendo representar el régimen medio mensual en un punto mediante tan solo dos parámetros que definen la distribución Lognormal (μ^* y σ^*). En el apéndice I se explica la diferencia entre la media, μ , y la desviación típica, σ , de la muestra y los parámetros de localización, μ^* , y de escala, σ^* , de la distribución Lognormal.

Por lo tanto, se determina para cada x_i y para cada τ_j los parámetros que definen el régimen medio mensual de la base de datos de HIPOCAS, es decir $\mu(i,j)$ y $\sigma(i,j)$, donde i oscila entre 1 y 1342 (hay 1342 puntos en la malla de HIPOCAS de la zona de estudio) y j oscila entre 1 y 12 (los 12 meses). A los campos espacio-temporales $\mu(i,j)$ y $\sigma(i,j)$ de HIPOCAS se los denominará de manera genérica $Z(i,j)$.

De igual manera, a partir de la base de datos de H_s de las boyas corregidas (llevada la información a indefinidas) se calculará, para cada x_i y para cada τ_j , los parámetros que definen el régimen medio mensual, es decir $\mu_B(i,j)$ y $\sigma_B(i,j)$, donde i oscila entre 1 y 5 (hay 5 boyas en la zona de estudio) y j oscila entre 1 y 12 (los 12 meses). A los campos espacio-temporales $\mu_B(i,j)$ y $\sigma_B(i,j)$ de las boyas se los denominará de manera genérica $Z_B(i,j)$. Cada $Z_B(i,j)$ debe estar definida en los mismos términos que $Z(i,j)$, esto implica que los regímenes medios mensuales de las boyas deben definirse de la misma manera que los de HIPO-

CAS (ajustando la distribución Lognormal entre 20% y 99,5 % de probabilidad acumulada).

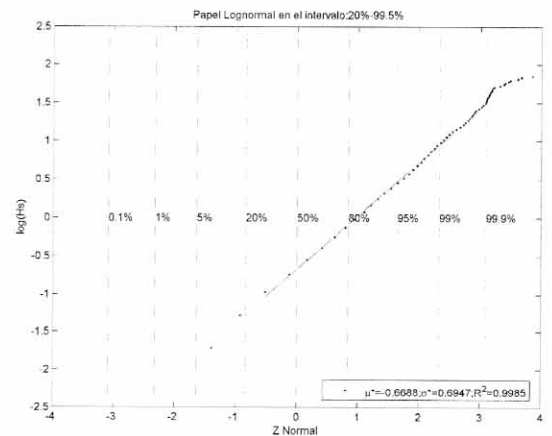


Figura 6. Ajuste del régimen medio de la serie de altura de ola significativa, para un x_i (Cabo de Palos) y un τ_j (enero) dados.

Descomposición mediante FOE

Se aplica la técnica de funciones ortogonales empíricas (FOE) para obtener los modos, descomponiendo cada parámetro espacio-temporal de la base de datos numéricos en una serie de q funciones ortogonales (Baldacci et al., 2001). Por ejemplo, para una variable genérica $Z(i,j)$ (que podría ser $\mu(i,j)$ o $\sigma(i,j)$) se obtiene:

$$Z(i,j) - Z_{MT}(i) = f_1(i)g_1(j) + f_2(i)g_2(j) + \dots + f_q(i)g_q(j) \quad (1)$$

donde $Z_{MT}(i)$ es la media temporal, f_i es el i -ésimo modo espacial y g_i la i -ésima amplitud temporal (ver Figura 7). Para la zona calibrada en este artículo el número total de modos es $q=1342$, que es el número de puntos de la malla HIPOCAS; pues el número de modos es el número de elementos de la mayor de las dos dimensiones de $Z(i, j)$, $(1, \dots, i, \dots, 1342)$, $(1, \dots, j, \dots, 12)$.

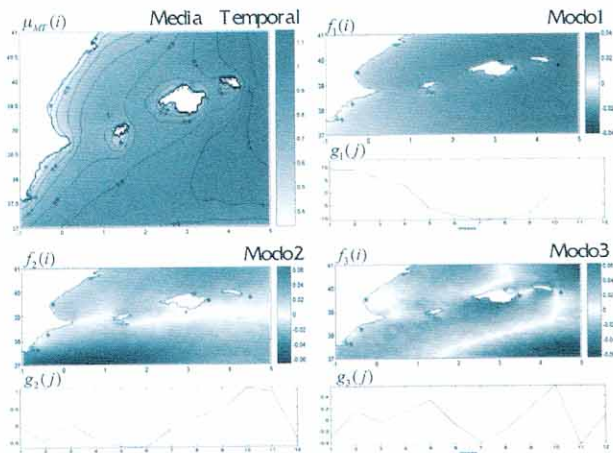


Figura 7. Ejemplo de la media temporal de $\mu(i, j)$ y los tres primeros modos espaciales con sus respectivas amplitudes temporales del parámetro $\mu(i, j) - \mu_{MT}(i)$.

En la figura 7 se representa la media temporal del parámetro $\mu(i, j)$ de la zona de estudio ($\mu_{MT}(i)$) y los tres primeros modos espaciales ($f_1(i)$, $f_2(i)$, $f_3(i)$) con sus respectivas amplitudes temporales ($g_1(j)$, $g_2(j)$, $g_3(j)$) del parámetro $\mu(i, j) - \mu_{MT}(i)$, que es la diferencia entre el parámetro $\mu(i, j)$ y su media temporal ($\mu_{MT}(i)$).

Aunque la descomposición en FOE es una técnica estadística que no tiene sentido físico, nótese como $\mu_{MT}(i)$ es mayor en aguas abiertas, lo que indica que la intensidad del oleaje es mayor en aguas abiertas. Así mismo, la primera amplitud temporal, $g_1(j)$, representa la fluctuación temporal de la intensidad del oleaje, que indica como el oleaje es mayor en los meses de invierno que en los meses de verano. Los modos espaciales podrían identificarse con fluctuaciones del oleaje respecto de la medida: mar adentro el primero, norte-sur el segundo, etc.

Estos patrones de comportamiento se observan también en la descomposición en FOE de $\sigma(i, j)$, donde $\sigma_{MT}(i)$ muestra como el oleaje es más variable en aguas abiertas o $g_1(j)$ que también representa la fluctuación invierno-verano en la variabilidad del oleaje.

De los inicialmente q modos se seleccionan los p primeros modos que deberán explicar como mínimo el 99% de la varianza de la variable $Z(i, j) - Z_{MT}(i)$. Así se simplifica la dimensión del problema; por ejemplo, para la zona de estudio $p=4$, lo que implica que con sólo 4 de los 1342 modos se explica más del 99% de la varianza de cada variable. Por lo que $Z^*(i, j)$ se considera una suficientemente buena aproximación de $Z(i, j)$:

$$Z^*(i, j) - Z_{MT}(i) = f_1(i)g_1(j) + f_2(i)g_2(j) + f_3(i)g_3(j) + f_4(i)g_4(j) \quad (2)$$

Definición del vector de parámetros Θ

Una vez que se tiene la descomposición en FOE de cada $Z(i, j)$ obtenido de datos numéricos, hay que introducir una serie de parámetros que distorsionen estos campos espacio-temporales para permitir que se adapten a lo que registran las boyas. Se asume como hipótesis que el valor calibrado $Z_c(i, j)$ de la variable $Z(i, j)$ es una combinación potencial de su media temporal y cada uno de sus cuatro primeros modos, de tal manera que a partir de $Z^*(i, j)$ se puede expresar $Z_c(i, j)$ como:

$$Z_c(i, j) = a_0 + b_0 Z_{MT}(i)^{c_0} + b_1 f_1(i) g_1(j) |g_1(j)|^{c_1-1} + b_2 f_2(i) g_2(j) + b_3 f_3(i) g_3(j) + b_4 f_4(i) g_4(j) \quad (3)$$

donde $\Theta = \{a_0, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0, c_1\}$ es el vector de parámetros a obtener y $|\cdot|$ significa valor absoluto.

El parámetro a_0 modifica homogéneamente el campo espacio-temporal de $Z_c(i, j)$. Los parámetros b_0, b_1, b_2, b_3 y b_4 son los coeficientes lineales que aumentan (si son mayores que 1) o disminuyen (si son menores que 1) cada uno de los sumandos de $Z_c(i, j)$. Para conseguir distorsionar espacialmente $Z_c(i, j)$, se introduce el coeficiente no lineal c_0 en el término de la media temporal, $Z_{MT}(i)$ (sólo depende de x). Para conseguir distorsionar temporalmente $Z_c(i, j)$, se introduce el coeficiente no lineal c_1 en el término de la amplitud temporal del primer modo, $g_1(j)$ (sólo depende de τ).

Es importante señalar que no se ha introducido más coeficientes no lineales porque se aumenta mucho la no linealidad del problema y no se disminuye sustancialmente el error cometido, pues el primer modo es el que más varianza explica. Otro aspecto a tener en cuenta es que se trata de deformar ligeramente los campos espacio-temporales de las variables.

Si se distorsionan demasiado, se puede llegar a reproducir lo que registran las boyas, pero a costa de dar valores anómalos en otras posiciones en las que no se puede evaluar el error cometido. Por eso se limita el número de términos no lineales y se acota todos los coeficientes a valores comprendidos entre 0 y 2.5.

Minimización de $J(\Theta)$

Para obtener Θ se evaluará la diferencia entre $Z_B(i, j)$ y $Z_c(i, j)$, en los mismos x_1 (en las posiciones de las nb boyas, en la zona seleccionada $nb=5$) y τ_j (los 12 meses), resultando finalmente un problema de optimización en el cual se debe definir la función objetivo a minimizar, $J(\Theta)$, la cual se puede definir como:

$$J(\Theta) = \sum_{i=1}^{nb} \left\{ \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{Z_B(i, j) - Z_c(i, j; \theta)}{R(i, j)} \right]^2 P(i, j) \right\} \quad (4)$$

donde $R(i, j)$ es el término que relativiza el error. Con este término se evita dar más peso en la función objetivo a las boyas que tienen un clima marítimo más activo. En este artículo se ha optado por utilizar la media temporal de cada $Z_B(i, j)$:

$$R(i, j) = R(i) = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} Z_B(i, j) \quad (5)$$

donde $P(i, j)$ es el término que da más o menos peso a cada sumando de la función objetivo (para la zona calibrada de este artículo se ha dado el mismo peso a todos los sumandos).

Una vez definida la función objetivo se elige la combinación de Θ que produce el mínimo error cuadrático relativo ponderado entre los datos numéricos calibrados y los de las boyas. Para ello se minimiza la función objetivo mediante el método *shuffled complex evolution*, SCE-UA (Duan et al., 1992).

Determinación de los regímenes medios mensuales calibrados

Con los valores de Θ obtenidos a partir de la minimización de la función objetivo $J(\Theta)$ se obtiene $Z_c(i, j)$ para cada uno de los parámetros que definen cada régimen medio mensual (es decir, la media μ y la desviación típica σ). Por lo tanto, se tiene, para cada x_i y para cada τ_j , la pareja de parámetros $\mu_c(i, j)$ y $\sigma_c(i, j)$ que definen el régimen medio mensual calibrado.

En la figura 8 se representa la evolución temporal (12 meses) de los dos parámetros (μ y σ) en las cinco boyas de la zona. Se comprueba como, tras la calibración, en todos los casos los parámetros calibrados para la base de datos numérica reproducen casi perfectamente los determinados a partir de los datos de las boyas. Se puede obtener, por tanto, unos regímenes medios mensuales de gran calidad en los puntos de la malla de HIPO-CAS próximos a las boyas que han servido de referencia para realizar la calibración.

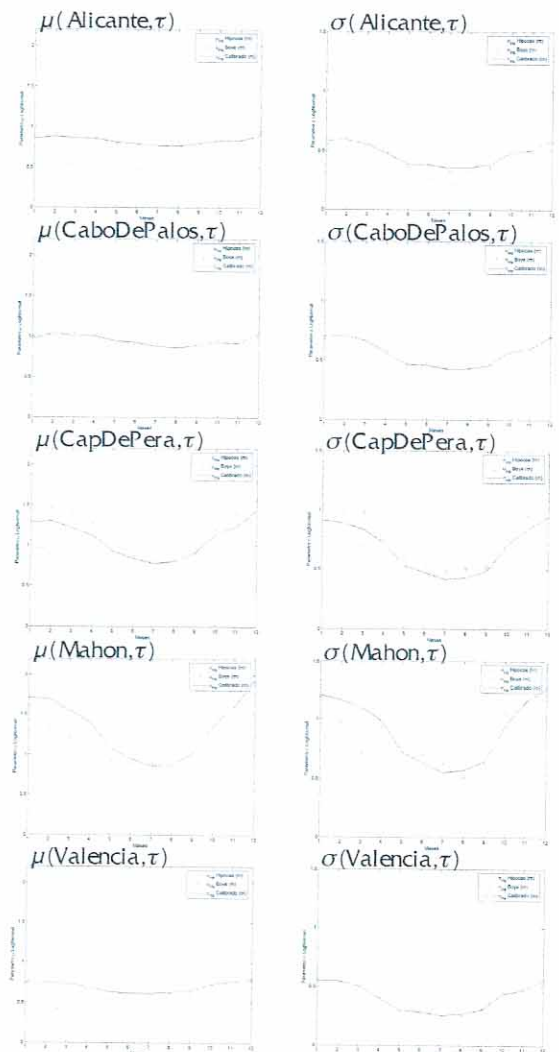


Figura 8. Evolución temporal de μ y σ en las boyas de la zona calibrada.

Se puede observar como la bondad en la calibración es similar en todas las boyas (no depende del grado de actividad del clima marítimo de cada boya). También se constata la fluctuación anual invierno-verano en los parámetros de la distribución Lognormal, o lo que es lo mismo,

la evolución temporal de los regímenes medios mensuales (Ochi, 1998). Esta misma fluctuación se presenta siempre en la amplitud temporal del primer modo ($g_1(j)$) de la descomposición en FOE de ambos parámetros. Hay que destacar que el método permite distorsionar la fluctuación invierno-verano para conseguir que se ajuste a las distintas oscilaciones temporales existentes en la zona de estudio.

Gracias al calibrado espacial, al igual que en la posición de las boyas, se puede definir el régimen medio mensual en toda la zona de estudio. En la figura 9 se muestra la distribución espacial de los parámetros μ y σ en la zona, tanto para la media temporal de los regímenes medios mensuales como para el régimen medio mensual de enero (mes 1) y de julio (mes 7). En dicha figura se puede observar como el oleaje en enero (invierno) es mayor y más variable que en julio (verano).

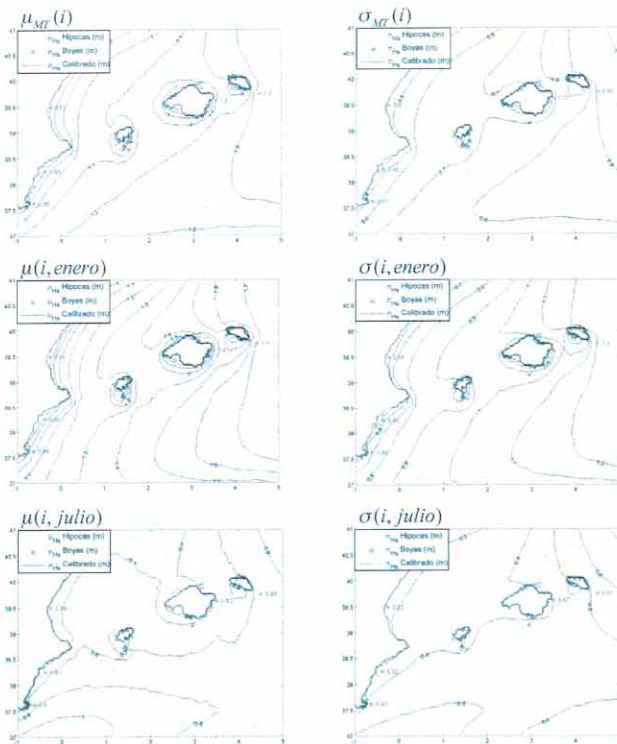


Figura 9. Evolución espacial de μ y σ en la zona calibrada, para sus medias temporales, el mes de enero y el mes de junio.

Calibración de las series temporales de H_s .

Dado que el método de calibración trabaja con regímenes, es decir, con datos agregados, se ha perdido la información del tiempo, por lo que, en principio, no se conoce cuál es la transformación

de $Z_c(i, j)$ que recupera las series temporales de H_s . Por lo tanto, la calibración de las series temporales se va a hacer definiendo una función de transformación entre las series temporales numéricas de H_s originales (sin calibrar) y unas series temporales sintéticas de H_s calibradas. Estas series temporales sintéticas de H_s calibradas van a ser el resultado de unas simulaciones de Montecarlo cuyos regímenes medios mensuales sean los regímenes medios mensuales calibrados.

Por lo tanto, una vez que se tienen calibrados todos los parámetros de los regímenes medios mensuales de H_s ($Z_c(i, j)$), se hace una simulación de Montecarlo con cada par de parámetros calibrados para construir una serie sintética de alturas de ola significantes para cada x_i y para cada τ_j . Así se obtiene una serie simulada de H_s calibrada para cada x_i y para cada τ_j .

Uniendo para cada posición x_i sus 12 series simuladas se crea un conjunto de series simuladas calibradas ($H_{s,cal}$) cuyos regímenes medios mensuales coinciden con los calibrados, pero cada dato de H_s no está asociado a ningún instante de tiempo. Las series de H_s que conservan la información del tiempo son las series temporales originales de H_s de HIPOCAS sin calibrar. Por tanto, se define una función de transformación entre ambas series temporales. Esta función de transformación es una función potencial que compara, para cada x_i , la serie de H_s inicial (H_s) con la serie H_s calibrada ($H_{s,cal}$) percentil a percentil:

$$H_{s,cal}(\mathbf{x}) = a(\mathbf{x}) + b(\mathbf{x})H_s(\mathbf{x})^{c(\mathbf{x})} \quad (6)$$

siendo:

$H_{s,cal}(x)$ la serie temporal simulada de H_s calibrada
 $H_s(x)$ la serie temporal original de H_s sin calibrar
 $a(x)$, $b(x)$, $c(x)$ los parámetros finales de la calibración de H_s

Ajustando a esta función potencial ambas series de datos, se determina los parámetros finales $a(x)$, $b(x)$, $c(x)$ para cada x_i , en los que se resume toda la información de la calibración de la base de datos de HIPOCAS y se recupera la información instantánea. En la figura 10 se muestra el ajuste a la función potencial en Cabo de Palos. Cabe señalar que en este trabajo se ha impuesto $a(x)=0$, determinando únicamente los parámetros $b(x)$ y $c(x)$; esta función de transformación pasa por el origen, asumiendo que la calibración de las H_s próximas a cero resultan $H_{s,cal}$ también próximas a cero.

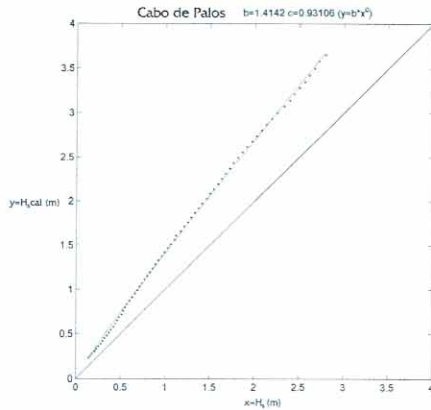


Figura 10. Ejemplo del ajuste a la función potencial $H_{s,cal}=b H_s^c$ en Cabo de Palos.

En la figura 11 se representa la distribución espacial de los parámetros $b(x)$ y $c(x)$ del ajuste potencial $H_{s,cal} = b(x) H_s(x)^{c(x)}$ realizado en todas las posiciones de la zona de estudio. Se puede comprobar como la calibración realizada no modifica drásticamente la base de datos de HIPOCAS, pues los parámetros b y c no difieren mucho de 1, salvo en las proximidades de la costa.

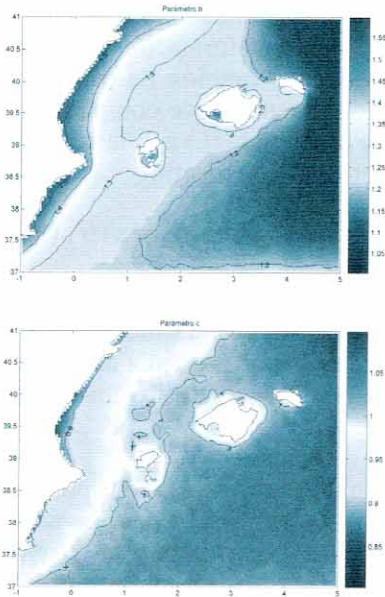


Figura 11. Evolución espacial de los parámetros b y c en la zona de estudio.

VALIDACIÓN

Para comprobar que la calibración realizada es correcta, en una primera aproximación se puede

ver como, para las posiciones de las boyas en profundidades indefinidas, los regímenes medios mensuales de H_s de las boyas y de la base de datos numérica y calibrada prácticamente coinciden, como se ve en la figura 8. Una verificación más rigurosa sería la comparación en la propia boya (a la profundidad en la que está), comparando la serie numérica de H_s calibrada y propagada hasta la posición de la boya con la serie original de la boya. Esto es lo que se presenta en la figura 12, donde se puede apreciar la mejora con respecto a lo mostrado en la figura 1.

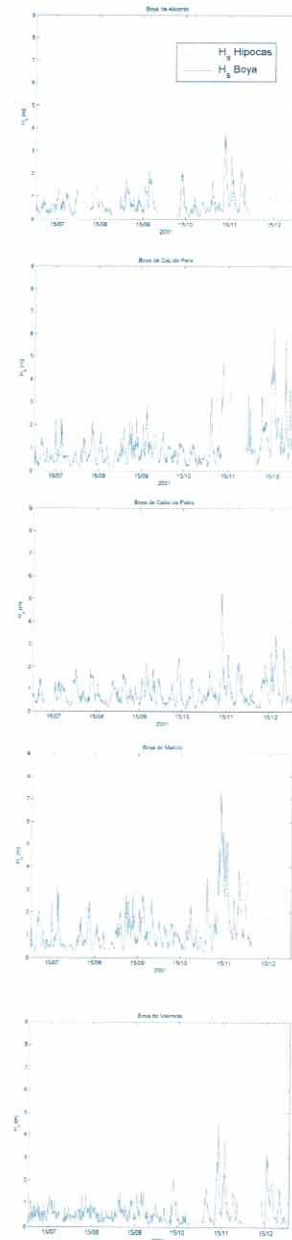


Figura 12. Series de H_s de las boyas y de HIPOCAS calibrado en la posición de las boyas.

Sin embargo, donde verdaderamente se comprueba la mejora conseguida es comparando los regímenes de oleaje de las boyas con los datos numéricos calibrados y propagados, que es lo que se representa en la figura 13, en la que se comparan los percentiles de probabilidad acumulada de ambas series de H_s . Se verifica la mejora realizada con la calibración pues los puntos se aproximan a la bisectriz (mucho más que en la figura 2), lo que indica la igualdad probabilística de ambas series, es decir, que presentan regímenes medios iguales.

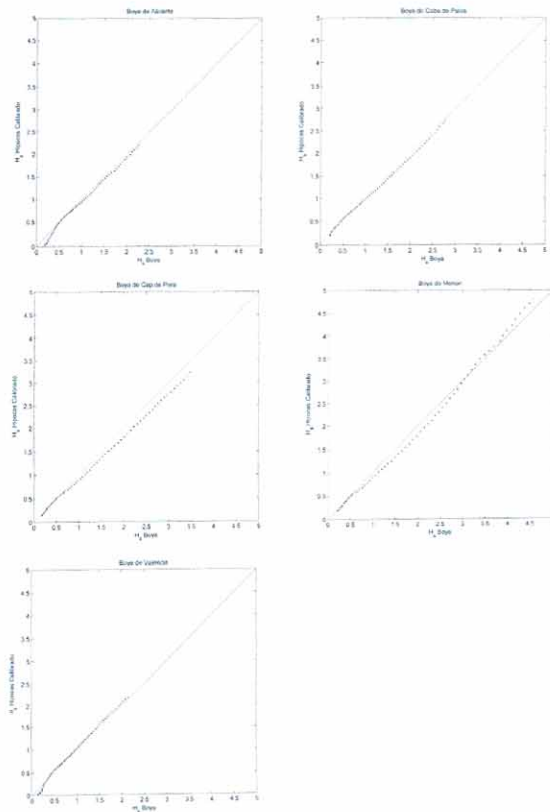


Figura 13. QQ plot (1%-99%) de HIPOCAS calibrado frente a las boyas, en la posición de las boyas.

La validación espacial del modelo se ha realizado de dos maneras. La primera validación consiste en hacer una calibración utilizando sólo tres de las cinco boyas disponibles, para después validar los resultados de la calibración en las dos boyas que no se utilizan. En concreto, se calibra con la información de las boyas de Valencia, Cabo de Palos y Mahón; después de calibrar, se propaga hasta las posiciones de las boyas de Alicante y Cap de Pera las series de H_s de HIPOCAS calibrado. En la figura 14 se representa las series de H_s de las dos boyas con las que se valida y las series de H_s de HIPOCAS calibrado con las otras tres boyas en las posiciones de Alicante y Cap de Pera.

En la figura 15 se compara percentil a percentil de probabilidad acumulada las series de H_s de HIPOCAS calibrado con las series de H_s de las boyas.

En las figuras 14 y 15 se aprecia cierta mejora con respecto a las figuras 1 y 2 pero no llegan a igualar los resultados de las figuras 12 y 13. Es de reiterar, que en la calibración de HIPOCAS para la validación de las figuras 14 y 15 no se ha utilizado las series de H_s de las boyas de Alicante y Cap de Pera. Lógicamente la calibración con un mayor número de boyas permite una calibración más correcta, por lo que no se va a “despreciar” información de las boyas para el proceso de validación del modelo, por eso la calibración de la zona de estudio se ha realizado con las 5 boyas. Esta primera validación trata de demostrar que al calibrar con información de boyas en unas posiciones determinadas, en el resto de posiciones la calibración mejora los resultados, aunque no se pueda evaluar esa mejora. Es una validación del método de calibración y no de los resultados obtenidos.

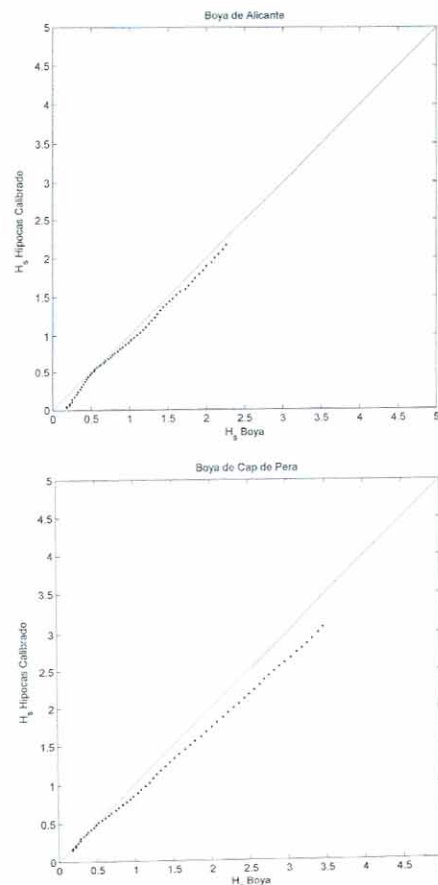


Figura 15. QQ plot (1%-99%) de HIPOCAS calibrado frente a las boyas, en la posición de las boyas de Alicante y Cap de Pera.

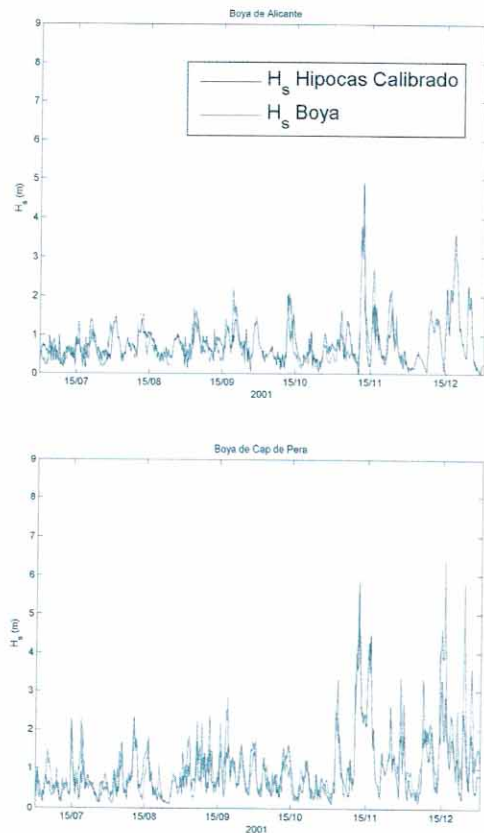


Figura 14. Series de H_s de las boyas y de HIPOCAS calibrado en la posición de las boyas de Alicante y Cap de Pera.

La segunda validación consiste en validar los resultados obtenidos en la calibración realizada en la zona de estudio (utilizando las cinco boyas) con las mediciones obtenidas por los satélites. Así, para este artículo, se ha contado con las medidas de H_s en la zona de estudio desde mayo de 1995 hasta agosto de 2003, de la misión TOPEX/POSEIDON. Esta base de datos fue obtenida del *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC)* de la *NASA Jet Propulsion Laboratory* (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>). Esta base de datos ha sido calibrada con la expresión de Barstow et al.: $H_{s,corr} = 1.1H_s - 0.165$ (Krogstad & Barstow, 1999).

La base de datos de H_s de satélites no es suficiente para definir el régimen medio en un punto, por lo que se agregan los datos en una malla de 1° por 1° y se compara con los de HIPOCAS calibrados en esas cuadrículas (20 en total). En la figura 16 se representa los percentiles de H_s del satélite TOPEX frente a los de HIPOCAS antes y después de la calibración. Sólo se dibuja hasta el percentil del 95 % debido a que con la cantidad de datos de satélite de que se dispone no es posible definir correctamente el régimen medio para probabilidades acumuladas altas. Nótese como en la figura, en todas las posiciones, los percentiles de HIPOCAS calibrado se acercan más a la bisectriz

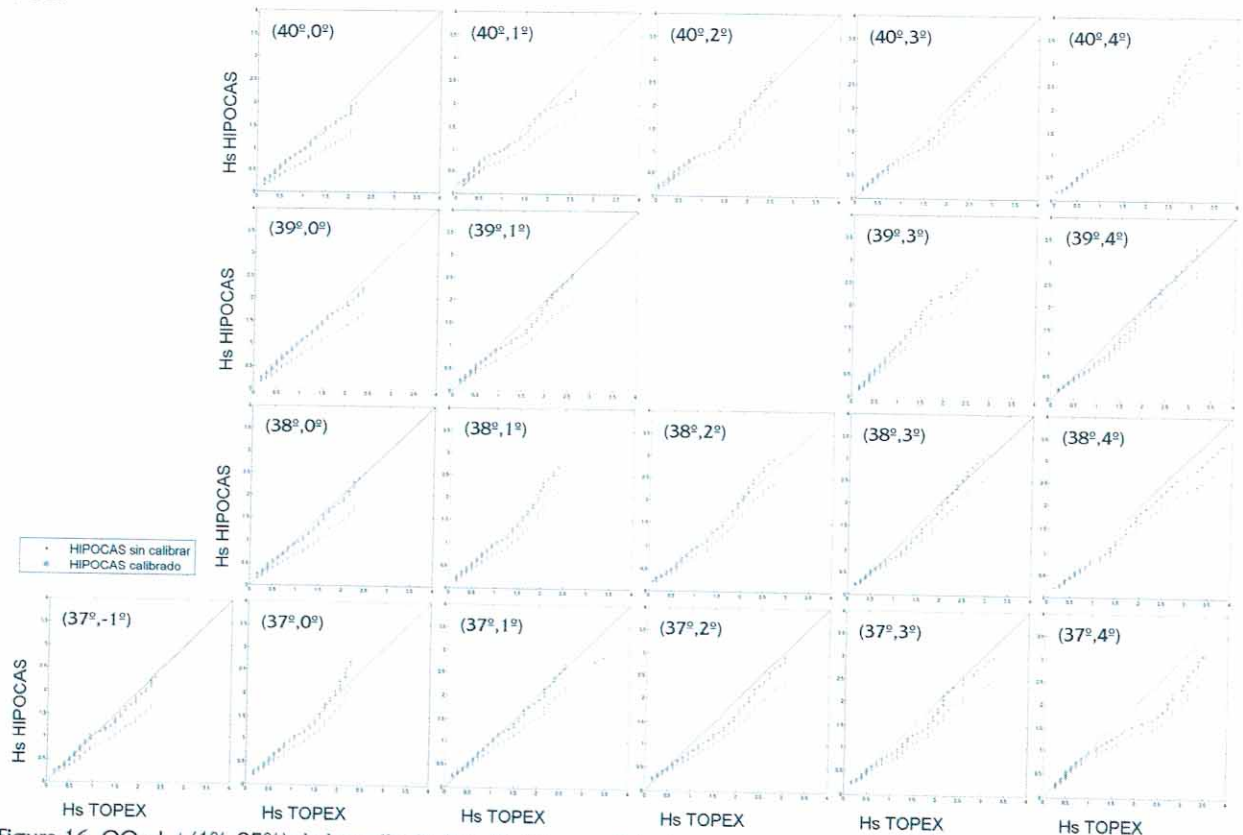


Figura 16. QQ plot (1%-95%) de la malla de $1^\circ \times 1^\circ$. Entre paréntesis se representa la latitud sur de la cuadrícula y la longitud oeste de la cuadrícula.

$$\mu = \exp\left(\mu^* + \frac{\sigma^{*2}}{2}\right) \quad (2AI)$$

$$\sigma^2 = \exp(2\mu^* + 2\sigma^{*2}) - \exp(2\mu^* + \sigma^{*2}) \quad (3AI)$$

y despejando μ^* y σ^* de μ y σ :

$$\mu^* = \log(\mu) - \frac{1}{2} \log\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right) \quad (4AI)$$

$$\sigma^{*2} = \log\left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1\right) \quad (5AI)$$

APÉNDICE II MÉTODO DE PROPAGACIÓN

Para realizar la propagación de las series de HIPOCAS de un punto cercano a una boya hasta la posición de esa boya se ha utilizado la metodología de propagación que a continuación se explica.

Como las boyas de la red costera del Ente Público Puertos del Estado se encuentran en profundidades reducidas o intermedias, el oleaje que les llega está afectado de todas las transformaciones propias de la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas, asomeramiento, refracción y difracción; no siendo así con los datos del modelo WAM, pues no se ha tenido en cuenta los procesos de propagación del oleaje en aguas poco profundas.

La base de datos del proyecto HIPOCAS son series continuas de datos que tienen una resolución espacial de 0.125° y una resolución temporal de 1 hora, además están caracterizados por un espectro multidireccional, $S(f, \theta)$. Este espectro está formado a su vez, por tres componentes del estado de mar (un oleaje tipo "sea" y dos oleajes tipo "swell"), definidos a partir de la altura de ola significativa, H_s , el periodo medio de pasos ascendentes por cero, T_m y la dirección media, θ_0 . Cada componente del estado de mar, se ha asociado a un espectro multidireccional JONSWAP en frecuencias, y con una dispersión direccional tipo coseno. De esta forma, cada espectro está definido de la siguiente manera:

$$S_1(f, \theta_0) = E_1(H_{S1}, T_{m1}) \cdot D(\theta_1) \quad (1AII)$$

$$S_2(f, \theta_0) = E_2(H_{S2}, T_{m2}) \cdot D(\theta_2) \quad (2AII)$$

$$S_3(f, \theta_0) = E_3(H_{S3}, T_{m3}) \cdot D(\theta_3) \quad (3AII)$$

siendo el espectro resultante, la suma de los diferentes espectros que caracterizan el estado de mar, en cada punto de la malla de HIPOCAS.

$$E_H(f, \theta_0) = S_1(f, \theta_0) + S_2(f, \theta_0) + S_3(f, \theta_0) \quad (4AII)$$

La metodología empleada para la propagación de la base de datos del proyecto HIPOCAS puede ser sintetizada de la forma que sigue:

1. Se ha realizado más de 50 propagaciones de oleaje monocromático, en cada una de las boyas de la red costera de la zona de estudio. Para ello, se ha obtenido en primer lugar las batimetrías detalladas de las zonas próximas donde se encuentran situadas las boyas. Para realizar las propagaciones se ha utilizado el modelo de propagación de oleaje monocromático OLUCA-RD, con el que se ha propagado cada una de las componentes del oleaje desde profundidades indefinidas hasta cada una de las boyas, de forma que cada componente del oleaje propagada está caracterizada por una frecuencia y una dirección.
2. De cada una de las propagaciones realizadas se obtiene un coeficiente de propagación, y todos los coeficientes de propagación conforman una matriz de coeficientes de propagación, de la cual se obtiene la función de transferencia, $K_p(f, \theta)_0$, que determina el coeficiente de propagación de un oleaje monocromático, propagado desde profundidades indefinidas hasta la boya y la función $\theta(f, \theta_0)$ determina el ángulo de llegada a la posición de la boya.
3. Una vez que se conocen las funciones de transferencia para cada boya entre profundidades indefinidas y el punto objetivo (posición de la boya), se propaga todos los estados de mar desde el punto HIPOCAS hasta la boya, resultando (Massel, 1996):

$$S_p(f, \theta(T, \theta_0)) d\theta = E_H(f, \theta_0) \left| K_p(f, \theta_0) \right|^2 d\theta_0 \quad (5AII)$$

4. Se obtiene a partir del espectro propagado, $S_p(f, \theta)$, los nuevos parámetros corregidos de altura de ola significativa, H_{sp} , periodo medio, T_{mp} y dirección media del oleaje propagado,

θ_{0p} , expresados de la siguiente manera:

$$H_{sp} = 4.004 \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S_p(f, \theta) df d\theta} \quad (6AII)$$

$$T_{mp} = \frac{\sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S_p(f, \theta) df d\theta}}{\sqrt{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^2 S_p(f, \theta) df d\theta}} \quad (7AII)$$

$$\theta_{0p} = \arctan \left[\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin \theta S_p(f, \theta) df d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos \theta S_p(f, \theta) df d\theta} \right] \quad (8AII)$$

Por lo tanto se tiene el clima marítimo propagado, caracterizado a partir de la variable tridimensional $(H_{sp}(t), T_{mp}(t), \theta_{0p}(t))$ ($H_{sp}(t), T_{mp}(t), \theta_0(t)$), es decir, cada estado de mar, t , definido por su altura de ola significativa, su periodo medio y su dirección media.

LISTA DE SÍMBOLOS

$D(\theta)$: Dispersión direccional tipo coseno
 $E(f, \theta)$: Espectro JONSWAP
 H_s, H_{sp} : Altura de ola significativa de un estado de mar. Sin subíndice p indica que es de un punto de profundidades indefinidas y con subíndice p indica que es del punto objetivo (propagado)
 $H_{s,cal}$: H_s de HIPOCAS calibrada
 $H_{s,corr}$: H_s del TOPEX/POSEIDON calibrada
 $J(\Theta)$: Función objetivo a minimizar para obtener los parámetros de calibración Θ
 $K_p(f, \theta)$: Coeficiente de propagación de un oleaje monocromático propagado desde profundidades indefinidas hasta el punto objetivo
 $P(i, j)$: Término de la función objetivo que pondera el error
 $R(i, j)$: Término de la función objetivo que relativiza el error
 $S(f, \theta), S_p(f, \theta)$: Espectro multidireccional de un estado de mar. Sin subíndice p indica que es de un punto de profundidades indefinidas y con subíndice p indica que es del punto objetivo (propagado)
 T_m, T_{mp} : Periodo medio de pasos ascendentes por cero de un estado de mar. Sin subíndice p indica que es de un punto de profundidades indefinidas y con subíndice p indica que es del punto objetivo (propagado)
 $Z(i, j), Z_B(i, j), Z_C(i, j)$: Variable genérica ($\mu(i, j)$ o $\sigma(i, j)$) en la posición x_i y tiempo τ_j . Sin subíndice indica que es una variable de la base de datos de HIPOCAS, el subíndice B indica que es una variable de la base de datos de las Boyas y el subíndice c indica que es una variable de la base de datos de HIPOCAS calibrado

$a(x), b(x), c(x)$: Parámetros finales de calibración de la H_s para cada posición

nb : Número de boyas del interior de la zona de estudio

p : Número de modos utilizados en la descomposición en FOE

q : Número de puntos de la malla de HIPOCAS en la zona de estudio

t : Variable que define la unidad de tiempo de una determinada variable, para el caso de la base de datos de HIPOCAS, son 44 años con una resolución temporal horaria

x : Variable que define la posición de los puntos en la malla de HIPOCAS, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, siendo n el número total de puntos

Θ : Vector de parámetros a obtener para realizar la calibración de $Z_c(i, j)$, $\Theta = \{a_0, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, c_0, c_1\}$

$\theta(f, \theta_0)$: Angulo de llegada al punto objetivo de un oleaje monocromático

θ_0, θ_{0p} : Dirección media de un estado de mar. Sin subíndice p indica que es de un punto de profundidades indefinidas y con subíndice p indica que es del punto objetivo (propagado)

μ : Media de una muestra

μ^* : Media de la distribución normal del logaritmo de una muestra (parámetro de localización de la distribución lognormal)

σ : Desviación típica de una muestra

σ^* : Desviación típica de la distribución normal del logaritmo de una muestra (parámetro de escala de la distribución lognormal)

τ : Variable que define la unidad de tiempo de agregación de una determinada variable, para el caso de la base de datos de HIPOCAS, se agrega en doce unidades de tiempo, $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_{12}\}$, 12 meses

REFERENCIAS

- BALDACCII, A.; COSINI, G.; GRASSO, R.; MANZELLA, G.; ALLEN, J. T.; CIPOLLINI, P.; GUYMER, T. H.; SNAITH, H. M. (2001). *A study of the Alboran sea mesoscale system by means of empirical orthogonal function decomposition of satellite data*. Journal of Marine Systems, 29, pp 293-311.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. (1992). *Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models*. Water Resources Research, Vol. 28 (4), pp 1015-1031.
- EPPE (2003). *Reanálisis de 44 años (1958-2001) del clima oceánico y atmosférico en el Mar Mediterráneo: Informe Técnico de la contribución de Puertos del Estado al proyecto europeo HIPOCAS*. 305 pags.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. Summary for Policymakers*, 145 pags.

- JACOB, D.; PODZUM, R. (1997). *Sensitivity studies with regional climate model REMO*. Meteorol. Atmos. Phys., 63, 119-129
- KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M. ; HASSELMAN, K. ; JANSSEN, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, UK.
- KROGSTAD, H. E. ; BARSTOW, S. F. (1999). *Satellite wave measurements for coastal engineering applications*. Coastal Engineering, 37 283-307.
- MASSEL, S. R. (1996). *Ocean Surface Waves: their Physics and Prediction*. World Scientific. 491 pp.
- OCHI, M. K. (1998). *Ocean Waves: the Stochastic Approach*. Cambridge University Press. 319 pp.
- OECC (2002). *Principales conclusiones del Tercer Informe de Evaluación*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Cambio Climático: ciencia, Impactos, Adaptación y Mitigación. Ministerio de Medio Ambiente. 35 pags.
- SOARES, C. G.; CARRETERO, J. C.; WEISSE, R.; ALVAREZ, E. (2002). *A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters*. Proceedings of OMAE 2002: 21^o International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE 2002-28604.
- The WAMDI Group: HASSELMAN, S. & K.; JANSSEN, P. A. E. M.; KOMEN, G. J.; BERTOTTI, L.; LIONELLO, P.; GUILLAUME, A.; CARDONE, V. C.; GREENWOOD, J. A.; REISTAD, M.; ZAMBRESKY, L.; EWING, J. A. (1998). *The WAM model – A third generation ocean wave prediction model* J. Phys. Oceanogr., 18, 1775-1810.
- WOLF, J. (2002). *Efficient computation of wave*